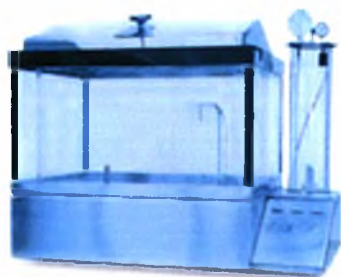




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική εργασία

Σχεδιασμός και κατασκευή θαλάμου αλατονέφωσης



υπό

Σεραφείμ Γεωργίου Μισδανίτη

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

Βόλος, Οκτώβριος 2005



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 3515/1
Ημερ. Εισ.: 14-07-2006
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2005
ΜΙΣ

Copyright © Σεραφείμ Γ. Μισδανίτης, 2005

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Μποντόζογλου Βασίλειος

Καθηγητής Φαινομένων Μεταφοράς – Συσκευών
Θερμικών Διεργασιών
Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόριος

Καθηγητής Φυσικής Μεταλλουργίας-
Ανάπτυξης Κραμάτων & Σύγχρονων Κατεργασιών
Εργαστήριο Υλικών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Βλαχογιάννης Μιχαήλ

Διδάσκων Π.Δ. 407/80
Ερευνητικό Προσωπικό εργαστηρίου Φυσικών & Χημικών
Διεργασιών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Με την ευκαιρία της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας για την καθοδήγησή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Κυρίαρχο στοιχείο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η συνεργασία μου με τον Καθηγητή του τμήματος κ. Βασίλειο Μποντόζογλου και τον Διδάσκοντα κ. Μιχαήλ Βλαχογιάννη. Θέλω να τους ευχαριστήσω θερμά για την εξαιρετική διδασκαλία τους στα προπτυχιακά τους μαθήματα και για την συνεχή υποστήριξή τους. Ευχαριστίες οφείλω και στον Καθηγητή του τμήματος κ. Χαϊδεμενόπουλο Γρηγόριο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου Φυσικών & Χημικών Διεργασιών και κυρίως τους φίλους και φίλες μου για την ηθική υποστήριξή τους.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Γεώργιο και Ελένη που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένειά μου.

Σεραφείμ Μισδανίτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συνεχείς προσπάθειες για ελαχιστοποίηση του κόστους και της περιβαλλοντικής ρύπανσης οδήγησαν στην ανάγκη για χρήση νέων κραμάτων στις διάφορες εφαρμογές. Τα κράματα μαγνησίου -με πολύ μικρή πυκνότητα και βάρος- αποτελούν μια επαναστατική ιδέα για τον τομέα της αεροναυπηγικής. Ωστόσο, η είσοδος στον τομέα αυτό θα πρέπει να συνοδευτεί από μια σειρά πειραμάτων για την καταλληλότητα και την πλήρωση των προϋποθέσεων λειτουργίας των κραμάτων αυτών.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αντοχή των κραμάτων μαγνησίου απέναντι στη διάβρωση. Η σημασία της έρευνας αυτής προκύπτει αν αναλογιστεί κανείς το γεγονός ότι η διάβρωση αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες πρόκλησης καταστροφών. Το υψηλό κόστος των καταστροφών αυτών τόσο από οικονομική σκοπιά, όσο και από την άποψη των ανθρώπινων ζωών, καθιστά αναγκαία τη συνεχή έρευνα για την καλύτερη αντιμετώπιση των συνεπειών της ή ακόμα και την πρόληψή της.

Οι διάφορες μορφές διάβρωσης που μπορεί να αποτελέσουν την αιτία της αστοχίας του εκάστοτε υλικού αποτελούν στόχο μεγαλύτερης έρευνας και μελέτης. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των μορφών αυτών καθώς και οι παράγοντες που οδηγούν στην εμφάνιση και ανάπτυξή τους, οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα σε ανάπτυξη ορισμένων πειραμάτων διάβρωσης. Τα επιταχυνόμενα πειράματα διάβρωσης αποτελούν, ίσως, το σημαντικότερο εργαλείο για την κατανόηση των φαινομένων της διάβρωσης.

Το πείραμα της αλατονέφωσης περιγράφεται εκτενώς μέσα στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Η σημασία του πειράματος για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων για την αντιδιαβρωτική συμπεριφορά των υλικών, οδήγησε στην κατασκευή μιας ιδιοσυσκευής αλατονέφωσης στο εργαστήριο του τμήματος για τον έλεγχο των κραμάτων μαγνησίου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών θα αποτελέσουν τη βάση για την αξιολόγηση των κραμάτων μαγνησίου και την ευρύτερη εφαρμογή τους στον τομέα της αεροναυπηγικής.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ^ο Εισαγωγή.....	1
1.1 Κράματα μαγνησίου και αεροναυπηγικές εφαρμογές.....	2
1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	5
1.3 Το κόστος της διάβρωσης.....	5
1.4 Περιπτώσεις φαινομένων διάβρωσης με καταστροφικά αποτελέσματα	7
1.4.1 Έκρηξη υπονόμων, Μεξικό.....	7
1.4.2 Απώλεια μαχητικού αεροσκάφους F16.....	7
1.4.3 Το περιστατικό των αερογραμμών Aloha.....	8
1.4.4 Το αεροπλανοφόρο KIRKI.....	8
1.4.5 Διάβρωση στις κατασκευές.....	9
1.5 Η συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα.....	10
Κεφάλαιο 2 ^ο Διάβρωση.....	16
2.1 Μηχανισμοί, μορφές, και είδη αστοχίας λόγω διάβρωσης.....	17
2.1.1 Μορφές διάβρωσης.....	17
Ομοιόμορφη διάβρωση (Uniform corrosion).....	18
Τρηματική διάβρωση (Pitting).....	20
Διάβρωση εγκοπών (Crevice corrosion).....	21
Γαλβανική διάβρωση (Galvanic corrosion).....	26
Εκλεκτική δύλιση (Selective leaching).....	28
Διάβρωση λόγω εκτριβής (Erosion corrosion).....	29
Διάβρωση λόγω τριβής (Fretting corrosion).....	30
Ρηγματώσεις από το περιβάλλον Environmental cracking (EC).....	30
Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular corrosion).....	34
Διάβρωση αποφλοιώσεως (Exfoliation corrosion).....	35
2.1.2 Παράγοντες διάβρωσης.....	37
2.1.3 Διαφοροποίηση ανάμεσα στους μηχανισμούς διάβρωσης και στα αίτια εμφάνισής της.....	38
2.2 Πρόληψη της διάβρωσης.....	39
2.2.1 Ομοιόμορφη Διάβρωση (Uniform corrosion).....	40
2.2.2 Γαλβανική Διάβρωση (Galvanic corrosion).....	41
2.2.3 Τρηματική διάβρωση (Pitting).....	42
2.2.4 Διάβρωση εγκοπών (Crevice corrosion).....	42
2.2.5 Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion).....	43
2.2.6 Εκλεκτική δύλιση (Selective leaching).....	44
2.2.7 Διάβρωση λόγω εκτριβής (Erosion corrosion).....	44
2.2.8 Εργο-διάβρωση (Stress corrosion cracking).....	45
2.3 Ανάλυση αστοχίας λόγω διάβρωσης με συμβολή στοιχείων από το παρελθόν.....	46
Κεφάλαιο 3ο Πειράματα διάβρωσης – Το πείραμα της αλατονέφωσης....	48
3.1 Πειράματα διάβρωσης.....	48
3.1.1 Πειράματα διάβρωσης και προδιαγραφές.....	52
3.1.2 Εργαστηριακά Πειράματα.....	54
3. 2 Το πείραμα της αλατονέφωσης.....	59

3.2.1 Η διαδικασία του πειράματος.....	60
3.2.2 Σημασία και εφαρμογή του πειράματος	60
3.2.3 Προετοιμασία των δοκιμίων	62
3.2.4 Τοποθέτηση δοκιμίων κατά τη διάρκεια του πειράματος.....	62
3.2.5 Διάλυμα χλωριούχου νατρίου	63
3.2.6 Παροχή αέρα	63
3.2.7 Διατήρηση λειτουργίας του πειράματος	64
3.2.8 Διάρκεια έκθεσης	64
3.2.9 Καθαρισμός των δοκιμίων	64
3.2.10 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων	64
3.2.11 Καταγραφή και αναφορά δεδομένων	64
<i>Κεφάλαιο 4ο Σχεδιασμός και κατασκευή θαλάμου αλατονέφωσης.....</i>	<i>66</i>
<i>4.1 Συνθήκες λειτουργίας του πειράματος.....</i>	<i>66</i>
4.1.1 Θερμοκρασία.....	66
4.1.2 Δημιουργία και ποσότητα εκνέφωσης.....	67
<i>4.2 Κατασκευή θαλάμου.....</i>	<i>67</i>
4.2.1 Έλεγχος θερμοκρασίας.....	70
4.2.2 Επιλογή ακροφυσίου	71
4.2.3 Η παροχή του αέρα.....	72
4.2.4 Κάλυμμα συσκευής.....	73
<i>Κεφάλαιο 5ο Συμπεράσματα</i>	<i>75</i>
<i>Παράρτημα Α Διάβρωση μαγνησίου και των κραμάτων του.....</i>	<i>77</i>
<i>Παράρτημα Β Σχέδια Συσκευής.....</i>	<i>90</i>
<i>Βιβλιογραφία</i>	<i>94</i>

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Το αεροσκάφος των αερογραμμών Aloha στο Αεροδρόμιο του Μάουι της Χαβάη.....	9
Σχήμα 1.2 Δενδροειδές διάγραμμα αστοχίας λόγω διάβρωσης.....	11
Σχήμα 1.3 Διάγραμμα πίτας που παρουσιάζει την κατανομή των αιτιών για τις αστοχίες λόγω διάβρωσης σε μια μεγάλη εταιρία χημικών.....	14
Σχήμα 2.1 Οι κυριότερες μορφές διάβρωσης ανάλογα με την ευκολία προσδιορισμού τους.....	19
Σχήμα 2.2 Επίδραση ομοιόμορφης διάβρωσης σε ένα βλήμα.....	20
Σχήμα 2.3 Χαρακτηριστικές παραλλαγές στη μορφή των κοιλοτήτων.....	22
Σχήμα 2.4 “Μικροπεριβάλλον” που δημιουργείται από τη διάβρωση σε μια ρωγμή.....	23
Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση του περιστατικού των αερογραμμών Aloha.....	24
Σχήμα 2.6 Οι τρεις βασικοί τύποι συναρμογών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της ατράκτου των αεροσκαφών.....	25
Σχήμα 2.7 “Pillowing” στα σημεία σύνδεσης της ατράκτου.....	26
Σχήμα 2.8 Σχετικός όγκος των προϊόντων διάβρωσης του αργιλίου.....	27
Σχήμα 2.9 Ευκολία διάβρωσης κάποιων εμπορικών μετάλλων απέναντι στο θαλασσινό νερό.....	28
Σχήμα 2.10 Παράγοντες που επηρεάζουν τη γαλβανική διάβρωση.....	29
Σχήμα 2.11 Συνέχεια μεταξύ μορφών αστοχίας	32
Σχήμα 2.12 Οι τρεις κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνιση της SCC.....	33
Σχήμα 2.13 Περικρυσταλλική διάβρωση SCC σε δοκούς στήριξης από ανοξείδωτο χάλυβα.....	34
Σχήμα 2.14 Ευαισθητοποίηση του ανοξείδωτου χάλυβα στις περιοχές συγκόλλησης λόγω υψηλής θερμότητας.....	36
Σχήμα 2.15 Συσχέτιση μορφής-παράγοντα διάβρωσης στην καταχώρηση βάσης δεδομένων.....	38
Σχήμα 2.16 Αερισμός και αποφυγή δημιουργίας συμπυκνωμάτων	41
Σχήμα 2.17 Μόνωση δυο ανόμοιων μετάλλων για προστασία από τη γαλβανική διάβρωση.....	43
Σχήμα 3.1 Δενδροειδές διάγραμμα για την επιλογή κατάλληλων	

πειραμάτων απέναντι στην ευαισθησία σε εργο-διάβρωση (SCC) των χαλύβων.....	51
Σχήμα 3.2 Η συσχέτιση των πειραμάτων διάβρωσης με τις μορφές διάβρωσης, το περιβάλλον λειτουργίας, το εκάστοτε υλικό και τον αντίστοιχο τομέα εφαρμογής.....	55
Σχήμα 3.3 Ένας τυπικός θάλαμος αλατονέφωσης.....	60
Σχήμα 4.1 Τυπική μορφή τοποθέτησης των συλλεκτών μέσα στη ζώνη έκθεσης του θαλάμου αλατονέφωσης.....	66
Σχήμα 4.2 Ράβδος και κύβοι Plexiglas για την καλύτερη στήριξη και στεγανοποίηση του θαλάμου αλατονέφωσης.....	69
Σχήμα 4.3 Χρήση o-ring για τη στεγανοποίηση των επιφανειών μεταξύ τους.....	70
Σχήμα 4.4 Το κάλυμμα της συσκευής που κατασκευάστηκε.....	73
Σχήμα 4.5 Φωτογραφία της συσκευής.....	73
Σχήμα I.1 Σύγκριση των ποσοστών διάβρωσης καθαρού μαγνήσιου (99.98%) και κραμάτων μαγνησίου που καθορίζονται από τις ηλεκτρο- χημικές τεχνικές και τις τεχνικές μέτρησης απώλειας μάζας.....	85
Σχήμα I.2 Επίδραση της συγκέντρωσης του στοιχείου X στη διάβρωση του μαγνησίου. Ο ρυθμός της διάβρωσης αυξάνεται δραματικά πάνω από το ανώτατο όριο των 50 ppm.....	87

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του κόστους της διάβρωσης στις Η.Π.Α. κατά το 1975 και 1995.....	5
Πίνακας 1.2	Θέσεις και σχετικές αρμοδιότητές για τη διαχείριση συστημάτων.....	12
Πίνακας 1.3	Σημαντικές ανακαλύψεις σχετικές με την κατανόηση και τη διαχείριση της διάβρωσης.....	15
Πίνακας 2.1	Χαρακτηριστικά ρηγματώσεων από το περιβάλλον	31
Πίνακας 2.2	Ταξινόμηση της σοβαρότητας των αιτιών που οδήγησαν σε αστοχία του μηχανισμού πέδησης των αεροσκαφών της πολεμικής αεροπορίας του Καναδά.....	47
Πίνακας 3.1	Πειραματικές μέθοδοι για διάφορα περιβάλλοντα κατά ASTM.....	54
Πίνακας 3.2	Μέγιστα επιτρεπτά όρια μολυσματικών παραγόντων στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου.....	62
Πίνακας 4.1	Συγκεντρωτικός πίνακας των ιδιοτήτων του Plexiglas.....	67
Πίνακας 4.2	Χαρακτηριστικά λειτουργίας ακροφυσίου.....	71
Πίνακας 4.3	Θερμοκρασίες και πιέσεις για τη σωστή λειτουργία του πειράματος στους 95°F.....	72

1

Εισαγωγή

Η διάβρωση είναι η καταστρεπτική επίθεση που δέχεται ένα υλικό από την αντίδρασή του με το περιβάλλον. Οι σοβαρές συνέπειες της διαδικασίας διάβρωσης έχουν αναχθεί σε ένα πρόβλημα παγκόσμιας σημασίας. Εκτός από την καθημερινή παρατήρηση του φαινομένου αυτού της “σταδιακής υποβάθμισης”, η διάβρωση είναι υπεύθυνη για το κλείσιμο εργοστασίων, την απώλεια πολύτιμων πόρων, την απώλεια ή μόλυνση του προϊόντος, τη μείωση της αποδοτικότητας, τη δαπανηρή συντήρηση καθώς και τον ακριβό επανασχεδιασμό ενώ παράλληλα διακινδυνεύει την ασφάλεια και εμποδίζει την τεχνολογική πρόοδο.

Η διεπιστημονική πτυχή των προβλημάτων διάβρωσης, συνδυασμένη με τις διανεμημένες ευθύνες που συνοδεύονται τέτοια προβλήματα, καταφέρει μόνο να αυξήσει την πολυπλοκότητα του θέματος. Ο έλεγχος διάβρωσης επιτυγχάνεται μόνο με την αναγνώριση και την κατανόηση των μηχανισμών διάβρωσης, με τη χρησιμοποίηση ανθεκτικών στη διάβρωση υλικών και με τη χρησιμοποίηση προστατευτικών συστημάτων, συσκευών και τις ανάλογες τεχνικές. Σημαντικές εταιρίες, βιομηχανίες και κυβερνητικές αντιπροσωπείες έχουν δημιουργήσει ομάδες και επιτροπές που φροντίζουν τα σχετικά με τη διάβρωση ζητήματα, αλλά σε πολλές περιπτώσεις οι ευθύνες είναι μεταξύ των κατασκευαστών ή των παραγωγών των συστημάτων και τους χρήστες.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται τόσο η σημασία της εισαγωγής της ευρύτερης χρήσης των κραμάτων μαγνησίου στην αεροναυπηγική, όσο και η

σημασία του ρόλου της διάβρωσης στις εκφάνσεις της καθημερινής ζωής. Ο εφησυχασμός μπορεί να αποδειχθεί πολύ δαπανηρός, όχι μόνο από την άποψη των χρημάτων, αλλά και των ανθρώπινων ζωών.

1.1 Κράματα μαγνησίου και αεροναυπηγικές εφαρμογές

Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σήμερα στις αεροδιαστημικές εφαρμογές βελτιστοποιούνται ήδη σχετικά με τις αεροναυτικές απαιτήσεις όπως οι ιδιότητες ανοχής σε δύναμη, κόπωση και αστοχία. Επομένως η μείωση βάρους είναι όλο και περισσότερο δύσκολο να επιτευχθεί με μόνο τη μικρή πρόοδο στην ανάπτυξη υλικών με βάση το αλουμίνιο.

Λόγω του γεγονότος ότι η μείωση βάρους είναι ένας πολύ σημαντικός στόχος για την ανταγωνιστικότητα ολόκληρης της ευρωπαϊκής αεροναυτικής βιομηχανίας, διάφορες εναλλακτικές λύσεις για την επίτευξη αυτού του στόχου πρέπει να ερευνηθούν. Μια εναλλακτική λύση μπορεί να είναι η χρήση των νέων αρχών σχεδιασμού ή η χρήση φύλλων πλαστικού. Μια άλλη εναλλακτική λύση θα μπορούσε να είναι η εφαρμογή των δομικών πλαστικών χαμηλής πυκνότητας ή σύνθετων ενισχυμένων με ίνες. Ωστόσο, η εφαρμογή των μη μεταλλικών υλικών είναι σε μερικές περιπτώσεις μη δυνατή λόγω των περιορισμένων ιδιοτήτων κάτω από χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, την ελλιπή ηλεκτρική αγωγιμότητα ή την χαμηλή ανοχή σε ζημιά. Τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά είναι ένα μάλλον δαπανηρό υλικό που χρησιμοποιείται μόνο για τις δομικές εφαρμογές με τις υψηλότερες απαιτήσεις.

Η οικογένεια των κραμάτων μαγνησίου και ειδικά των επεξεργασμένων κραμάτων μαγνησίου μπορεί να είναι μια άριστη εναλλακτική λύση λόγω της χαμηλής πυκνότητας, των καλών μηχανικών ιδιοτήτων, του μέτριου κόστους και του μεταλλικού χαρακτήρα τους (για την κατασκευή, επισκευή, συντήρηση έναντι στα σύνθετα). Στην προηγούμενη δεκαετία πολλές ερευνητικές δραστηριότητες και αναπτυξιακά έργα εκτελέστηκαν με βάση τα χυτά υλικά του μαγνησίου κυρίως για τις εφαρμογές τους στην αυτοκινητοβιομηχανία.. Το φάσμα των επεξεργασμένων κραμάτων μαγνησίου είναι ακόμα πολύ περιορισμένο. Οι αεροναυτικές απαιτήσεις και οι εφαρμογές των επεξεργασμένων προϊόντων έχουν αξιολογηθεί μόνο σε μερικές δευτερεύουσες υποχρεώσεις σχετικών προγραμμάτων.

Η αύξηση της έρευνας για τα επεξεργασμένα κράματα μαγνησίου θα προωθήσει μια νέα κατηγορία μεταλλικών υλικών για τις αεροναυτικές εφαρμογές για να ξεπεράσουν τον ανταγωνισμό απέναντι στα πλαστικά και ενισχυμένα με ίνες πλαστικά. Επομένως, το φάσμα των διαθέσιμων μεταλλικών υλικών θα διευρυνθεί, όχι μόνο για τα αεροσκάφη, αλλά και για τις διαστημικές, στρατιωτικές και δορυφορικές εφαρμογές. Κατά συνέπεια, θα υποκινήσει επίσης την έρευνα στον τομέα άλλων υλικών εφαρμοσμένης μηχανικής.

Μέσα σε αυτό το πρόγραμμα ο γενικός στόχος είναι να καταδειχθεί ότι το μαγνήσιο είναι ένα κατάλληλο υλικό εφαρμοσμένης μηχανικής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του βάρους μέχρι 35% έναντι στο αλουμίνιο. Για να επιτύχει αυτόν τον στόχο το μαγνήσιο πρέπει να παραδώσει τις σημαντικά υψηλότερες συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες βάρους έναντι στο αλουμίνιο. Οι στόχοι για την αντικατάσταση του αλουμινίου μπορούν να διαιρεθούν σε δύο διαφορετικά στάδια με βάση το χρονικό διάστημα και τον κίνδυνο:

1. αντικατάσταση των μέσων κραμάτων αλουμινίου δύναμης 5xxx για τις εφαρμογές στα πιλοτήρια και στις καμπίνες
2. αντικατάσταση των μέσων-υψηλών αντοχής κραμάτων αλουμινίου 2xxx για τις δευτερεύουσες εφαρμογές ή για τις εφαρμογές των ατράκτων που δε διατηρούνται σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση

Επομένως νέα κράματα θα αναπτυχθούν και τα υπάρχοντα κράματα θα εξεταστούν. Οι κατάλληλες διαδικασίες κατασκευής (κύλισμα, εξώθηση) θα ρυθμιστούν μεταξύ στους προμηθευτές των υλικών και τα πανεπιστήμια. Οι κατάλληλες τεχνολογίες κατασκευής (κύλισμα, εξώθηση), διαμόρφωσης και ένωσης απαιτούν την ανάπτυξη, την προσομοίωση και την επικύρωση για το καινοτόμο υλικό και την εφαρμογή του στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συνήθως μέσα στην αεροπορική βιομηχανία.

Η διάβρωση είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που καλούνται να λυθούν με τα φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα προστασίας επιφάνειας σύμφωνα με τις αεροδιαστημικές απαιτήσεις. Προηγμένες σχεδιαστικές εφαρμογές απαιτούνται για την αποτροπή φαινομένων γαλβανικής διάβρωσης μέσα στις ενώσεις των συστατικών που γίνονται από τα ανόμοια υλικά.

Η ευφλεκτότητα θα εξεταστεί με την προσθήκη των χημικών στοιχείων και τις ειδικές επεξεργασίες της επιφάνειας σε συνδυασμό με συγκριτικές έρευνες στα κράματα αλουμινίου. Τα όρια ευφλεκτότητας για τις διάφορες περιοχές των αεροσκαφών θα είναι η βάση για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των επιλεγμένων συστημάτων προστασίας.

Ένας περαιτέρω ουσιαστικός στόχος είναι η ανάπτυξη μοντέλων και των κριτηρίων αστοχίας για την πρόβλεψη των διαδικασιών διαμόρφωσης, της πλαστικής παραμόρφωσης και της συμπεριφοράς των συστατικών σε περιπτώσεις αστοχίας. Τελικά, η αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς θα ερευνηθεί για να κλείσει η διαδικασία και η αλυσίδα ανάπτυξης για τα υλικά που βρίσκουν εφαρμογή στην αεροναυτική.

Η εργασία αυτή αναφέρεται ιδιαίτερα στην ικανότητα διάβρωσης του μαγνησίου και των κραμάτων μαγνησίου που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στις αεροδιαστημικές εφαρμογές. Για την επίτευξη αυτού του στόχου παρουσιάζεται αναγκαία η μελέτη και η κατασκευή ενός θαλάμου αλατονέφωσης ο οποίος και θα αποτελέσει τον πυρήνα του πειραματικού εξοπλισμού.

Μια σειρά από κράματα θα τοποθετηθούν μέσα στο θάλαμο και θα υποβληθούν σε πολύωρη έκθεση σε περιβάλλον αλατονέφωσης. Στόχος είναι ο έλεγχος των ήδη υπαρκτών κραμάτων απέναντι στη διάβρωση και ο έλεγχος συμμόρφωσής τους με τις προδιαγραφές για χρήση τους σε αεροδιαστημικές εφαρμογές.

1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία αυτή εντάσσεται στο πλαίσιο ερευνητικής δραστηριότητας που εξετάζει την αντοχή σε διάβρωση του μαγνησίου και των κραμάτων μαγνησίου που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Η συμπεριφορά των διαφόρων υλικών σε διάβρωση ελέγχεται πειραματικά με ειδικές εργαστηριακές δοκιμές. Μία από αυτές, που αποτελεί την κυρίαρχη επιλογή για κράματα μαγνησίου, είναι η δοκιμή αλατονέφωσης. Έτσι, ο σχεδιασμός και κατασκευή μίας συσκευής αλατονέφωσης σύμφωνα με τα έγκυρα διεθνή πρότυπα συνιστά αναγκαίο βήμα για

την επιτυχή υλοποίηση της ερευνητικής δραστηριότητας, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί ενδιαφέρουσα πρόκληση για έναν τελειόφοιτο μηχανικό.

Ως συνέπεια των παραπάνω, η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τα εξής:

- Ανασκόπηση των προβλημάτων που προκαλούνται από τη διάβρωση
- Ανασκόπηση των κυριότερων μορφών διάβρωσης
- Περιγραφή των εργαστηριακών δοκιμών διάβρωσης με έμφαση στη δοκιμή αλατονέφωσης
- Περιγραφή των διαδικασιών σχεδιασμού και κατασκευής μίας συσκευής αλατονέφωσης στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας.

1.3 Το κόστος της διάβρωσης

Αν και οι δαπάνες που αποδίδονται σε ζημίες λόγω διάβρωσης -όλων των μορφών- υπολογίζονται να είναι της τάξης του 3 έως 5 τοις εκατό του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος των βιομηχανοποιημένων χωρών (ΑΕΠ), οι ευθύνες που συνδέονται με αυτά τα προβλήματα είναι μερικές φορές αρκετά διάχυτες. Από την πρώτη σημαντική αναφορά από τον Uhlig¹ το 1949 ότι το κόστος της διάβρωσης για τα έθνη είναι πράγματι μεγάλο, το συμπέρασμα όλων των επόμενων μελετών είναι ότι η διάβρωση αντιπροσωπεύει μια σταθερή δαπάνη στο ΑΕΠ² ενός έθνους. Ένα συμπέρασμα της χρηματοδοτούμενης από την βρετανική κυβέρνηση έκθεσης του 1971 από τον Hoar³ ήταν ότι ένα μεγάλο ποσοστό των αποτυχιών διάβρωσης είναι δυνατόν να αποφευχθεί και ότι η καλύτερη εκπαίδευση ήταν ένας καλός τρόπος για την αποφυγή των φαινομένων διάβρωσης.

Η διάβρωση των μετάλλων κόστισε στην Αμερικάνικη οικονομία σχεδόν \$300 δισεκατομμύρια ανά έτος σε τιμές του 1995⁴. Ευρύτερη εφαρμογή των αντιδιαβρωτικών υλικών και η εφαρμογή των καλύτερων -σχετικά με τη διάβρωση- τεχνικών εφαρμογών, θα μπορούσε να μειώσει περίπου το ένα τρίτο αυτών των δαπανών. Οι εκτιμήσεις αυτές είναι αποτέλεσμα μιας πρόσφατης αναπροσαρμογής σε μια έκθεση δημοσιευμένη το 1978⁵. Η αρχική εργασία, βασισμένη σε ένα πρότυπο περισσότερων από 130 οικονομικών τομέων, αποκάλυψε ότι η μεταλλική διάβρωση

κόστισε στις Ηνωμένες Πολιτείες \$82 δισεκατομμύρια το 1975, ή 4.9 τοις εκατό του ΑΕΠ . Επίσης διαπιστώθηκε ότι το 60 τοις εκατό του κόστους ήταν αναπόφευκτο. Τα υπόλοιπα \$33 δισεκατομμύρια (40 τοις εκατό) θα μπορούσαν να αποφευχθούν αν είχαν χρησιμοποιηθεί οι τότε καλύτερες τεχνικές.

Στη αρχική μελέτη, σχεδόν 40 τοις εκατό των δαπανών της μεταλλικής διάβρωσης του 1975 αποδόθηκαν στην παραγωγή, τη χρήση, και τη συντήρηση των μηχανοκίνητων οχημάτων. Κανένας άλλος τομέας δεν συνετέλεσε περισσότερο από το 4 τοις εκατό του συνολικού ενώ οι περισσότεροι τομείς συνετέλεσαν σε λιγότερο από 1 τοις εκατό. Η μελέτη του 1995 έδειξε ότι ο τομέας των μηχανοκίνητων οχημάτων είχε συγκεντρώσει τη μέγιστη αντιδιαβρωτική προσπάθεια για κάθε βιομηχανία. Πρόοδος έχει παρατηρηθεί τόσο στη χρήση των ανοξειδωτων χαλύβων, όσο και στη χρήση των μετάλλων με επιστροφή. Επιπλέον, διάφορες αντικαταστάσεις των υλικών που γίνονται πρώτιστα για λόγους μείωσης βάρους έχει μειώσει επίσης τη διάβρωση. Επίσης, το 15% των δαπανών της διάβρωσης που είχαν χαρακτηριστεί ως αναπόφευκτες μπορούν να αξιολογηθούν πλέον σαν αποφευκτές . Η βιομηχανία υπολογίζεται ότι έχει αποβάλει περίπου το 35% της "αποφευκτής" διάβρωσής κάνοντας χρήση βελτιωμένων πρακτικών.

Πίνακας 1.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του κόστους της διάβρωσης στις Η.Π.Α. κατά το 1975 και 1995

	1975	1995
All industries		
Total (billions of 1995 dollars)	\$82.5	\$296.0
Avoidable	\$33.0	\$104.0
Avoidable	40%	35%
Motor vehicles		
Total	\$31.4	\$94.0
Avoidable	\$23.1	\$65.0
Avoidable	73%	69%
Aircraft		
Total	\$3.0	\$13.0
Avoidable	\$0.6	\$3.0
Avoidable	20%	23%
Other industries		
Total	\$47.6	\$189.0
Avoidable	\$9.3	\$36.0
Avoidable	19%	19%

1.4 Περιπτώσεις φαινομένων διάβρωσης με καταστροφικά αποτελέσματα

1.4.1 Έκρηξη υπονόμων, Μεξικό

Ένα παράδειγμα των ζημιών διάβρωσης με κοινές ευθύνες ήταν η έκρηξη υπονόμων που σκότωσε πάνω από 200 ανθρώπους στη Γουαδαλαχάρα του Μεξικό, στα μέσα του Απριλίου του 1992⁶. Εκτός από τις απώλειες, η αλληλουχία των εκρήξεων κατέστρεψε 1600 κτίρια και τραυμάτισε 1500 ανθρώπους. Το κόστος των ζημιών υπολογίστηκε σε \$75 εκατομμύρια. Η αιτία ανιχνεύθηκε στην εγκατάσταση σωληνώσεων νερού αρκετά χρόνια πριν από την έκρηξη οι οποίες έσταζαν σε έναν αγωγό πετρελαίου που περνούσε από κάτω. Η επικείμενη διάβρωση του σωλήνα πετρελαίου οδήγησε στη διαρροή καυσίμου στους υπονόμους. Ο γενικός εισαγγελέας απήγγειλε κατηγορίες για ανθρωποκτονία από αμέλεια σε τέσσερις ανώτερους υπαλλήλους της Pemex, της κυβερνητικής επιχείρησης πετρελαίου. Επίσης κατηγορήθηκαν τρεις αντιπρόσωποι του περιφερειακού συστήματος υπονόμων καθώς και ο δήμαρχος της πόλης.

1.4.2 Απώλεια μαχητικού αεροσκάφους F16

Αυτό το παράδειγμα επεξηγεί μια περίπτωση που έχει δημιουργήσει πρόσφατα προβλήματα μέσα στο στόλο των μαχητικών αεροσκαφών F16. Η λίπανση με βάση το γραφίτη είναι ένα πολύ κοινό λιπαντικό επειδή ο γραφίτης είναι εύκολα διαθέσιμος από τις βιομηχανίες χάλυβα. Η εναλλακτική λύση, μια φόρμουλα που περιέχει δισουλφίδιο του μολυβδενίου, είναι πολύ ακριβότερη. Δυστυχώς, η λίπανση με βάση το γραφίτη είναι γνωστό ότι προκαλεί γαλβανική διάβρωση στα διμεταλλικά ζεύγη. Σε έναν στόλο με πάνω από 3000 μονοκινητήρια F16, η λίπανση με βάση το γραφίτη χρησιμοποιήθηκε από μια ανάδοχο εταιρία παρά τη ρητή διαταγή από την Πολεμική Αεροπορία που απαγόρευσε τη χρήση του στα αεροσκάφη⁷. Με την κίνηση των πτερυγίων, το λιπαντικό εξωθήθηκε σε ένα μέρος των αεροσκαφών όπου γινόταν ο έλεγχος της βαλβίδας παροχής καυσίμου με τη βοήθεια ηλεκτρικών συνδετήρων κατασκευασμένων από ένα συνδυασμό επιχρυσωμένων και επικασσιτερωμένων ατσάλινων ακίδων. Σε πολλές περιπτώσεις εμφανίστηκε διάβρωση μεταξύ αυτών των μετάλλων και προκλήθηκε απώλεια του ελέγχου της βαλβίδα, η οποία και προκάλεσε διακοπή της παροχής καυσίμου στη μηχανή κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τουλάχιστον επτά αεροσκάφη θεωρείται ότι χάθηκαν με αυτό τον τρόπο, χωρίς να

συνυπολογίζεται ο αριθμός από άλλα παρόμοια ατυχήματα καθώς και το τεράστιο κόστος της επιπρόσθετης συντήρησης.

1.4.3 Το περιστατικό των αερογραμμών Aloha

Η αστοχία στη δομή ενός 19-χρονου Boeing 737 των αερογραμμών Aloha στις 28 Απριλίου 1988, ήταν ένα γεγονός που οδήγησε στη συνειδητοποίηση του προβλήματος των γερασμένων αεροσκαφών τόσο από το ευρύ κοινό όσο και από την κοινότητα της αεροπορίας. Το συγκεκριμένο αεροσκάφος έχασε ένα σημαντικό κομμάτι από το πάνω μέρος της ατράκτου κοντά στο μπροστινό μέρος του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια πτήσης στα 24000 πόδια⁸. Ως εκ θαύματος, ο πιλότος κατάφερε να προσγειώσει το αεροσκάφος στο νησί Μάουι της Χαβάη (Σχήμα 1.1). Μία αεροσυνοδός έχασε τη ζωή της. Πολλαπλές ρωγμές από κόπωση ανιχνεύθηκαν στο υπόλοιπο αεροσκάφος, στις τρύπες της ανώτερης σειράς των καρφιών σε διάφορα σημεία των ενώσεων της ατράκτου. Οι ενώσεις αυτές χρησιμοποιούνται για να συνδέουν μεγάλα κομμάτια κατά μήκος της ατράκτου μεταξύ τους. Οι ρωγμές από κόπωση δεν αναμενόταν να αποτελέσουν πρόβλημα, με δεδομένο ότι τα κομμάτια της επιφάνειας θα παρέμεναν συνδεδεμένα μεταξύ τους. Ο έλεγχος σε παρόμοια αεροσκάφη αποκάλυψε αποσυνδέσεις, διάβρωση και ρωγμές σε αρκετές από τις εν λόγω ενώσεις. Η διάβρωση και η συνεχής συγκέντρωση διαβρωτικών υλικών μέσα στις ενώσεις οδήγησε τελικά στον διαχωρισμό των επιφανειών. Για την ανίχνευση της επικίνδυνης αυτής κατάστασης αναπτύχθηκε ειδικός εξοπλισμός. Το πρόβλημα των γερασμένων αεροσκαφών δεν θα εξαλειφθεί ακόμα και αν οι εταιρίες παραγγείλουν πρωτοφανή αριθμό από νέα αεροσκάφη. Τα παλιά αεροπλάνα σπάνια αποσύρονται, και σε μερικές περιπτώσεις τα αεροπλάνα που αντικαθίστανται από μερικές εταιρίες καταλήγουν στην υπηρεσία κάποιας άλλης. Επομένως, τα θέματα ασφαλείας που αφορούν τα γερασμένα αεροσκάφη πρέπει να γίνουν απολύτως κατανοητά, ενώ τα προγράμματα ασφαλείας θα πρέπει να εφαρμόζονται σε συνεπή και αυστηρή βάση.

1.4.4 Το αεροπλανοφόρο KIRKI

Ένα ακόμα παράδειγμα σοβαρών ζημιών εξαιτίας της διάβρωσης το οποίο θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί και δεν είχε κάνει την εμφάνισή του μέχρι το 1960 σχετίζεται με το σχέδιο, την κατασκευή και την επιχειρησιακή λειτουργία των



Σχήμα 1.1 Το αεροσκάφος των αερογραμμών Aloha στο αεροδρόμιο του Μάουι της Χαβάη

μεγάλων αεροπλανοφόρων. Το 1991 πάνω από 44 αεροπλανοφόρα είτε βυθίστηκαν είτε υπέστησαν σοβαρές ζημιές και πάνω από 120 ναυτικοί έχασαν τη ζωή τους⁹. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το αεροπλανοφόρο Kirki το οποίο κατασκευάστηκε στην Ισπανία το 1969 σύμφωνα με σχέδια Δανών μηχανικών. Το 1990, ενώ βρισκόταν στα ανοιχτά της Αυστραλίας, ολόκληρο το κομμάτι της πλώρης αποκολλήθηκε από το σκάφος. Σαν από θαύμα, δεν χάθηκαν ανθρώπινες ζωές, υπήρξε μόνο μια μικρή εστία ρύπανσης ενώ το σκάφος σώθηκε. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου δεν χρησιμοποιούταν ούτε αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις, ούτε καθοδική προστασία μέσα στις δεξαμενές έρματος. Συνέπεια αυτής της, λανθασμένης, όπως αποδείχτηκε, τακτικής ήταν η υπερβολική μείωση του πάχους των τοιχωμάτων που σε συνδυασμό με τον ελλειπή σχεδιασμό για την αντοχή σε κόπωση αποτέλεσαν τον κυριότερο λόγο της αστοχίας. Η υπόθεση αυτή οδήγησε την Κυβέρνηση της Αυστραλίας στη έκδοση μιας αναφοράς με τίτλο “Τα πλοία της ντροπής”. Το Kirki δεν αποτελεί μια μεμονωμένη περίπτωση. Υπήρξαν πολλές άλλες περισσότερο καταστροφικές αν και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία όταν τα πλοία καταλήγουν στο βυθό.

1.4.5 Διάβρωση στις κατασκευές

Ένα από τα πιο σύγχρονα παραδείγματα καταστροφών λόγω της διάβρωσης αποτελεί η σημερινή κατάσταση της σταδιακής φθοράς της υποδομής της Βορείου Αμερικής, κυρίως στις περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις, όπου η χρήση αλατιού από 0.6Mtons

το 1950 έφτασε στους 10.5Mtons το 1988. Η δομική ακεραιότητα σε χιλιάδες γέφυρες, δρόμους καθώς και σε άλλες τσιμεντένιες κατασκευές έχει πληγεί από τη δράση της διάβρωσης, κάνοντας επιτακτική την ανάγκη για άμεση συντήρηση και διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας. Μια έκθεση του τμήματος μεταφορών της Νέας Υόρκης αναφέρει ότι, μέχρι το 2010, το 95% των γεφυρών δεν θα είναι ασφαλείς αν η συντήρηση παραμείνει στα ίδιο επίπεδα με αυτά του 1981. Η αποκατάσταση αυτών των γεφυρών έχει αναδειχθεί σε μια σημαντική εφαρμοσμένη μηχανική πρακτική¹⁰. Αλλά τα προβλήματα στο ενισχυμένο σκυρόδεμα επεκτείνονται πολύ πιο πέρα από την υποδομή των μεταφορών. Μια έρευνα στα κτίρια που είχαν καταρρεύσει κατά τη διάρκεια της περιόδου από το 1974 ως το 1978 στην Αγγλία έδειξε ότι η άμεση αιτία της αστοχίας τουλάχιστον οκτώ κτιρίων, τα οποία ήταν από 12 μέχρι 40 ετών, ήταν η διάβρωση της ενίσχυσης ή του προεντεταμένου χάλυβα¹¹.

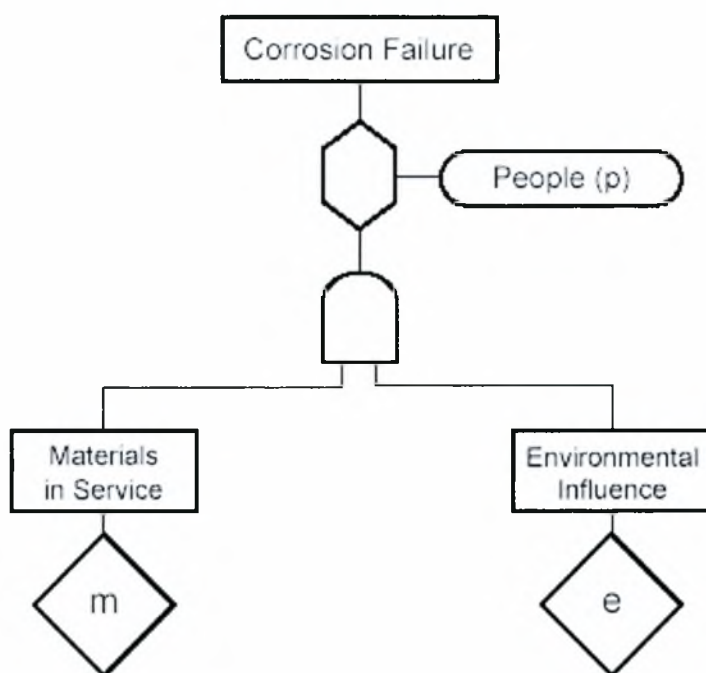
1.5 Η συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα

Η επίδραση των φαινομένων της διάβρωσης στη διατήρηση της σταθερής απόδοσης των υλικών θα μειωνόταν στο ελάχιστο αν η παρακολούθηση και ο έλεγχος τόσο του περιβάλλοντος, όσο και του ανθρώπινου παράγοντα συντελούσαν στη δημιουργία ενός σωστού σχεδιασμού. Όταν ένα σύστημα εφαρμοσμένης μηχανικής λειτουργεί σύμφωνα με μια προδιαγραφή, δημιουργείται μια τριπλή αλληλεπίδραση με σύνθετες μεταβλητές από ανθρώπους (**P**eople), υλικά (**M**aterials) και το περιβάλλον (**E**nvironment)¹². Μια προσπάθεια για την εξήγηση του φαινομένου αυτού με ένα δένδροειδές διάγραμμα, οδήγησε στο διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 1.2, όπου η διάβρωση εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα των τριών στοιχείων που προηγούνται. Με αυτή τη μορφή, η πιθανότητα διάβρωσης (P_{sf}) μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της άλγεβρας Μπουλ η οποία και οδηγεί στη σχέση που φαίνεται παρακάτω όπου τα P_m και P_e είναι η πιθανότητα διάβρωσης λόγω του υλικού και του περιβάλλοντος αντίστοιχα, ενώ ο $Factor_p$ περιγράφει την επίδραση του ανθρώπου στη διάρκεια ζωής ενός συστήματος. Στη σχέση αυτή, ο $Factor_p$ μπορεί να παίρνει τιμές είτε μικρότερες είτε μεγαλύτερες από τη μονάδα

$$P_{sf} = P_m P_e Factor_p$$

Η αιτιολόγηση για το συνυπολογισμό του ανθρώπινου παράγοντα στο διάγραμμα σαν ένα μη κύριο γεγονός θα πρέπει να γίνεται εύκολα αντιληπτή. (η

διάβρωση αποτελεί μια φυσική διαδικασία που δεν χρειάζεται την ανθρώπινη παρέμβαση για να εμφανιστεί). Αυτό που μπορεί να χαρακτηριστεί σαν καθαρά μηχανικές αποτυχίες παρουσιάζεται όταν το P_m παίρνει μεγάλες τιμές και το P_e μικρές. Τα περισσότερα καλά σχεδιασμένα συστήματα εφαρμοσμένης μηχανικής στα οποία το P_e είναι περίπου 0 επιτυγχάνουν καλά επίπεδα αξιοπιστίας.



Σχήμα 1.2 Δενδροειδές διάγραμμα αποτυχίας λόγω διάβρωσης

Τα πιο αξιόπιστα συστήματα είναι συνήθως εκείνα στα οποία η περιβαλλοντική επίδραση είναι πολύ μικρή και συνεχίζει να παραμένει μικρή σε όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Όταν το P_e επηρεάζει σημαντικά τον παράγοντα P_{sf} αυξάνει σημαντικά και η πιθανότητα εμφάνισης διάβρωσης.

Η ελαχιστοποίηση του P_{sf} μόνο μέσα από το σωστό σχεδιασμό είναι δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη λόγω των μεγάλων διαφοροποιήσεων που μπορεί να δεχθούν οι παράγοντες P_m , P_e και $Factor_p$ κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Οι τύποι ανθρώπων που μπορούν να έχουν επιπτώσεις στη ζωή και την απόδοση των συστημάτων εφαρμοσμένης μηχανικής έχουν ανασυγκροτηθεί σε έξι κατηγορίες (Πίνακας 1.2).¹³ Ο πίνακας 1.2 οι οποίες επίσης περιέχουν μια συνοπτική περιγραφή από τις κύριες συνεισφορές που κάθε κατηγορία ανθρώπων μπορεί να έχει στην επιτυχία ή πρόωρη αποτυχία ενός συστήματος.

Εντούτοις, η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα σε μια αποτυχία είναι εξαιρετικά δύσκολη να προβλεφθεί γεγονός που οφείλεται στην συχνή μεταβλητότητα των ανθρώπινων αποφάσεων. Τα περισσότερα καλά σχεδιασμένα συστήματα εφαρμοσμένης μηχανικής λειτουργούν σύμφωνα με προδιαγραφές, κατά ένα μεγάλο μέρος, επειδή οι αλληλεπιδράσεις των ανθρώπων με αυτά τα συστήματα ελέγχονται στενά και ρυθμίζονται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής των συστημάτων.

Πίνακας 1.2 Θέσεις και σχετικές αρμοδιότητες για τη διαχείριση συστημάτων

Προμηθευτής

- Ποιο είναι το κύριο σύστημα;
- Ποια είναι η λειτουργία του κύριου συστήματος;
- Ο προϋπολογισμός ήταν χαμηλός για τις ανάγκες του σωστού σχεδιασμού;
- Πώς ένα υποσύστημα ενσωματώθηκε στο κύριο σύστημα;

Σχεδιαστής

- Ποιο είναι το υποσύστημα;
- Ποια είναι η λειτουργία του υποσυστήματος;
- Ποια είναι η βέλτιστη επιλογή υλικών;
- Έχει εφαρμοστεί ο σωστός καθορισμός του λειτουργικού περιβάλλοντος;
- Με ποια μέσα θα κατασκευαστεί το συστατικό;
- Ποιος είναι ο καλύτερος γεωμετρικός σχεδιασμός;
- Τα προστατευτικά επιστρώματα, ή οι τεχνικές ελέγχου διάβρωσης έχουν διευκρινιστεί;
- Οι παράμετροι σωστής λειτουργίας έχουν διευκρινιστεί;
- Έχει διευκρινιστεί το καλύτερο πρόγραμμα συντήρησης;
- Το σχέδιο ενσωματώνει τα χαρακτηριστικά γνώρισμα που επιτρέπουν να ακολουθηθούν οι σωστές διαδικασίες συντήρησης;

Κατασκευαστής

- Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια υλικά όπως είχε καθοριστεί αρχικά;
- Η διαδικασία κατασκευής έχει πραγματοποιηθεί σωστά;
- Έχει τηρηθεί ακριβώς ο αρχικός σχεδιασμός και η προδιαγραφή των υλικών;
- Έχουν χρησιμοποιηθεί οι σωστές τεχνικές;
- Οι καταλληλότερες τεχνικές ένωσης έχουν υιοθετηθεί;
- Το συστατικό προσαρμόστηκε στα κατάλληλα πρότυπα ποιοτικού ελέγχου;
- Το σχέδιο για τη σωστή συναρμογή του υποσυστήματος εφαρμόστηκε σωστά έτσι ώστε η εγκατάσταση να μπορεί να γίνει σωστά;

Εφαρμοστής

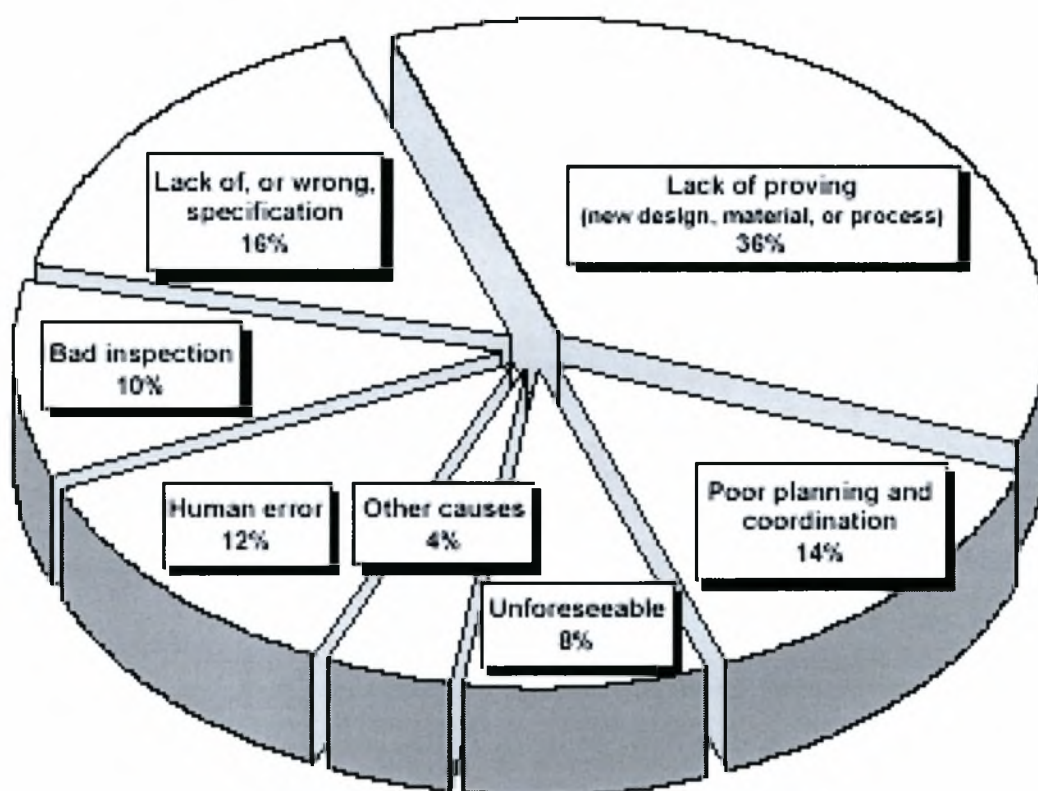
- Το σύστημα έχει εγκατασταθεί σύμφωνα με την προδιαγραφή;
- Εφαρμόστηκε κανονικά η διαδικασία εκκίνησης του συστήματος;
- Έχουν προσδιοριστεί όλα τα νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα στο περιβάλλον που είναι πιθανό να ασκήσουν μια επιρροή και δεν προβλέφθηκαν από τη διαδικασία σχεδίου;

Συντηρητής

- Έχει ακολουθηθεί το ιδανικό πρόγραμμα συντήρησης;
- Έχουν χρησιμοποιηθεί τα σωστά ανταλλακτικά στις επισκευές;
- Έχουν πραγματοποιηθεί οι σωστές διαδικασίες συντήρησης;
- Επιβλέπεται τακτικά η κατάσταση του συστήματος;

Χρήστης

- Το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί μέσα στις προκαθορισμένες συνθήκες λειτουργίας;
- Υπάρχει μια επαναληψιμότητα παρόμοιων αποτυχιών ή αποτελούν ένα μεμονωμένο περιστατικό;
- Υπάρχουν οποιαδήποτε στοιχεία ότι το σύστημα δεν έχει χρησιμοποιηθεί σωστά και από αναρμόδιο προσωπικό;



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα πίτας που παρουσιάζει την κατανομή των αιτιών για τις αστοχίες λόγω διάβρωσης σε μια μεγάλη εταιρία χημικών.

Το σχήμα 1.3 παρουσιάζει τις αιτίες που είναι υπεύθυνες για κάποιες αστοχίες όπως αυτές διερευνήθηκαν από μια μεγάλη εταιρία χημικών¹⁵. Ο πίνακας 1.3 παρουσιάζει μερικά ιστορικά ορόσημα των ανακαλύψεων σχετικά με την κατανόηση και τη διαχείριση της διάβρωσης. Αν και οι μελλοντικές επιτυχίες θα αφορούν ακόμα τις βελτιώσεις στα υλικά και την απόδοσή τους, αυτό που μπορεί να αναμένεται σαν κύρια πρόοδος στην πρόληψη της διάβρωσης θα συνδέεται με την ανάπτυξη καλύτερων στρατηγικών επεξεργασίας και την παραγωγή αποδοτικότερων μέσων παρατήρησης που θα συντελούν σημαντικά στα προγράμματα πρόληψης της διάβρωσης.

Πίνακας 1.3 Σημαντικές ανακαλύψεις σχετικές με την κατανόηση και τη διαχείριση της διάβρωσης

Ημερομηνία	Ορόσημο	Πηγή
1675	Μηχανική προέλευση της διαβρωτικότητας και της οξειδωτικότητας	Boyle
1763	Διμεταλλική διάβρωση	HMS Alarm report
1788	Το νερό γίνεται αλκαλικό κατά τη διάβρωση του σιδήρου	Austi
1791	Ηλεκτρολυτική γαλβανική σύζευξη χαλκού-σιδήρου	Galvani
1819	Αναφορά στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης	Thenard
1824	Καθοδική προστασία του Cu από Zn ή Fe	Sir Humphrey Davy
1830	Επίδραση της διάβρωσης στη μικροδομή (Zn)	De la Rive
1834–1840	Σχέση ανάμεσα στη χημική δράση και την παραγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων	Faraday
1836	Παθητικότητα του σιδήρου	Faraday, Schoenbein
1904	Υπέρταση υδρογόνου	Tafel
1905	Τα ανθρακικά και άλλα οξέα δεν είναι επαρκή για τη διάβρωση του σιδήρου	Dunstan, Jowett, Goulding, Tilden
1907	Δράση οξυγόνου ως καθοδικός καταλύτης	Walker, Cederholm
1908–1910	Σύνταξη των ποσοστών διάβρωσης σε διαφορετικά μέσα	Heyn, Bauer
1913	Μελέτη της υψηλής θερμοκρασίας οξείδωσης, κινητικές του βολφραμίου	Langmuir
1916	Διαφορικά ρεύματα αερισμού	Aston
1920–1923	Περικρυσταλλική Διάβρωση	Moore, Beckinsale
1923	Υψηλής θερμοκρασίας σχηματισμός οξειδίων	Pilling, Bedworth
1924	Γαλβανική διάβρωση	Whitman, Russell
1931–1939	Ποσοτική ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης	Evans
1938	Ανοδικοί και καθοδικοί ανασταλτικοί παράγοντες	Chyzewski, Evans
1938	E-pH θερμοδυναμικά διαγράμματα	Pourbaix
1950	Αυτοκαταλυτική φύση της διάβρωσης	Uhlig
1956	Παρέκταση Tafel για τη μέτρηση κινητικών παραμέτρων	Stern, Geary
1968	Ηλεκτροχημικός θόρυβος σαν αποτέλεσμα διάβρωσης	Iverson
1970	Μελέτη των διαδικασιών διάβρωσης με ηλεκτροχημικά φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (EIS)	Epelboin

2

Διάβρωση

Οι αστοχίες των συστημάτων και οι έρευνες που συνεπάγονται οι αστοχίες αυτές, τείνουν να αποκτήσουν ένα σημαντικό ρόλο στο σύγχρονο κόσμο. Εκτός από τα ζητήματα αξιοπιστίας, ένας σημαντικός λόγος για τη διενέργεια τέτοιων ερευνών είναι ο προσδιορισμός των μηχανισμών και των αιτιών του προβλήματος καθώς και η αποφυγή της μελλοντικής επανεμφάνισής του. Η λήψη κάποιων μέτρων αντιμετώπισης του προβλήματος είναι πράγματι μια σημαντική πτυχή που απορρέει από τη διαδικασία ανάλυσης της αστοχίας. Η απουσία τέτοιων ερευνών για τον εντοπισμό των αιτιών της αστοχίας του προϊόντος και η λήψη διορθωτικών μέτρων μπορεί να οδηγήσουν μια εταιρία στο δικαστήριο, να πλήξουν την αξιοπιστία της καθώς και την εμπιστοσύνη του αγοραστικού κοινού απέναντι στα προϊόντα της. Μια τέτοια πολιτική χαρακτηρίζεται σαν απαράδεκτη για το σύγχρονο επιχειρησιακό περιβάλλον.

Η πραγματοποίηση μιας ανάλυσης για μια αστοχία δεν είναι ένα εύκολο έργο. Ο έγκαιρος εντοπισμός της διάβρωσης σαν παράγοντα που οδηγεί σε αστοχία αποκτά μεγάλη σημασία αν αναλογιστεί κανείς το μέγεθος των πληροφοριών που μπορεί να χαθούν αν τα στοιχεία αυτά αλλοιωθούν πριν να γίνουν οι κατάλληλες δοκιμές και μετρήσεις. Για την αποφυγή τέτοιων περιπτώσεων, έχουν προταθεί κάποιες συστηματικές διαδικασίες σύμφωνα με τις οποίες ένας ερευνητής μπορεί να ολοκληρώσει με επιτυχία τη διαδικασία ανάλυσης μιας αστοχίας. Αλλά μια τέτοια

ανάλυση μαθαίνεται καλύτερα μέσα από την εμπειρία καθώς και την ενεργή συμμετοχή του ερευνητή και την επιτυχή επίλυση ποικίλων προβλημάτων.

Η χρήση της σωστής και συνεπούς ορολογίας στις αναλύσεις αστοχίας είναι ζωτικής σημασίας. Την αξία των πληροφοριών στις αναφορές μικραίνει πολύ από την έλλειψη προσοχής σε αυτήν την λεπτομέρεια, ειδικά εάν οι πληροφορίες πρόκειται να αποθηκευτούν, να ανακτηθούν και να επεξεργαστούν από υπολογιστές. Δυστυχώς, η σωστή ορολογία χρησιμοποιείται συχνά πάρα πολύ αόριστα στην πράξη. Αυτό το κεφάλαιο αρχίζει με τις βασικές έννοιες για τον προσδιορισμό της ζημίας λόγω της διάβρωσης. Στη συνέχεια παρατίθεται μια αναθεώρηση των οδηγιών για τη διεξαγωγή των ερευνών αστοχίας και μια αναφορά σχετικά με τη χρησιμότητα των ιστορικών στοιχείων στην ανάλυση αστοχίας. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την αναφορά σε κάποια μέτρα αντιμετώπισης και πρόληψης του φαινομένου της διάβρωσης.

2.1 Μηχανισμοί, μορφές, και είδη αστοχίας λόγω διάβρωσης

Στην καθημερινή πρακτική, οι όροι *μηχανισμοί*, *μορφές* και *είδη αστοχίας* λόγω διάβρωσης χρησιμοποιούνται συγκεχυμένα. Η επιμελής δουλειά που έχει γίνει τα προηγούμενα χρόνια για τον καθορισμό των διαφορών ανάμεσα στους παραπάνω όρους, προϋποθέτει και την αυστηρή χρήση τους.

2.1.1 Μορφές διάβρωσης

Οι *μορφές της διάβρωσης* είναι γενικότερα γνωστές μέσα από ένα από τα σημαντικότερα βιβλία που αναφέρονται στη διάβρωση και τους μηχανισμούς της¹⁶. Οι διαφορετικές μορφές της διάβρωσης, αντιπροσωπεύουν φαινόμενα διάβρωσης που ταξινομούνται σύμφωνα με το αποτέλεσμα της δράσης τους. Ο Dillon¹⁷ αφού εξέτασε τις βασικές μορφές στις οποίες είχε οδηγηθεί ο Fontana, τις χώρισε σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την ευκολία προσδιορισμού τους. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- *Κατηγορία 1.* Ευπροσδιόριστες μορφές μέσα από τη συνηθισμένη οπτική εξέταση.

- *Κατηγορία 2.* Μορφές που μπορεί να απαιτούν επιπρόσθετες μεθόδους εξέτασης.
- *Κατηγορία 3.* Μορφές που η αναγνώρισή τους απαιτεί συνήθως τη χρήση μικροσκοπίου.

Οι κυριότερες μορφές διάβρωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1, σύμφωνα με τις τρεις ομάδες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στο σχήμα αυτό, ο αριθμός των μορφών που παραθέτονται είναι κάπως αυξημένος σε σχέση με τις οχτώ κατηγορίες μορφών στις οποίες είχε καταλήξει ο Fontana. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή καθώς και ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα για κάθε μια από τις βασικές μορφές διάβρωσης.

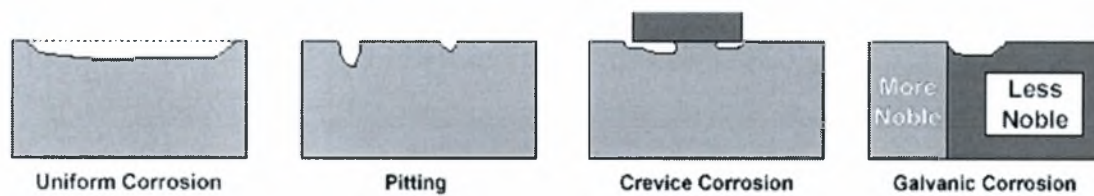
Ομοιόμορφη (ή γενική) διάβρωση (Uniform (or general) corrosion)

Η ομοιόμορφη διάβρωση χαρακτηρίζεται από τη διαβρωτική επίθεση που προχωρά ομοιόμορφα πάνω σε ολόκληρη την επιφάνεια της περιοχής ή σε ένα μεγάλο μέρος της συνολικής περιοχής. Συνεχής μείωση του πάχους της επιφάνειας παρατηρείται μέχρι την τελική αστοχία. Εντούτοις, η ομοιόμορφη διάβρωση μετριέται και προβλέπεται σχετικά εύκολα, καθιστώντας τις καταστρεπτικές αστοχίες σχετικά σπάνιες. Η καταστροφή των προστατευτικών επιστρώσεων στις δομές οδηγεί συχνά σε αυτήν την μορφή διάβρωσης. Εξασθένηση μιας φωτεινής ή γυαλισμένης επιφάνειας, χάραξη από τους όξινους παράγοντες, ή η οξείδωση (αποχρωματισμός) του χάλυβα είναι παραδείγματα της διάβρωσης της επιφάνειας. Τα αντιδιαβρωτικά κράματα και οι ανοξείδωτοι χάλυβες μπορούν να οξειδωθούν στα διαβρωτικά περιβάλλοντα. Η διάβρωση της επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε μια δυσλειτουργία στην προστατευτική επίστρωση της δομής η οποία και πρέπει να εξεταστεί βαθύτερα για τη ανίχνευση ή όχι άλλων μορφών διάβρωσης. Εάν η διάβρωση της επιφάνειας επιτραπεί να συνεχιστεί, η επιφάνεια μπορεί να αποκτήσει τραχύτητα και η διάβρωση της επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρότερες μορφές διάβρωσης.

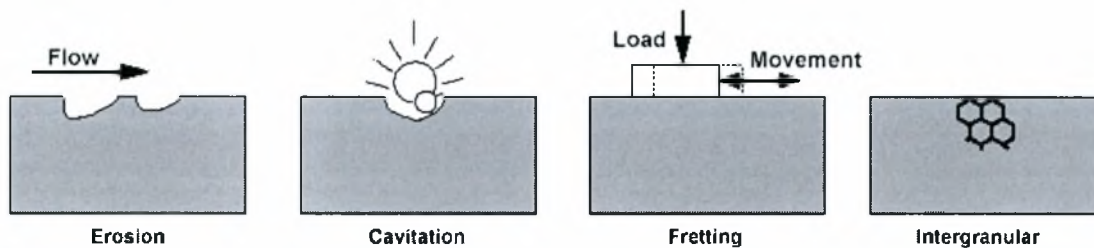
Ένα παράδειγμα της ζημίας λόγω ομοιόμορφης διάβρωσης σε ένα βλήμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2¹⁸. Η αιτία της αστοχίας ήταν η φτηνή κατασκευή η οποία αποτελούταν από τη χρήση όξινης επίστρωσης πριν από την επίστρωση του φωσφορικού άλατος, ανεπαρκές ξέπλυμα μετά από τη διαδικασία επίστρωσης φωσφορικού άλατος, υπερβολικές θερμοκρασίες ξήρανσης και μιας χαμηλής

ποιότητας εξωτερική επίστρωση που δεν παρείχε την κατάλληλη προστασία. Τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα της διάβρωσης αυτής περιλαμβάνουν την απώλεια της αυτοπεποίθησης του στρατού, αφού κανείς δεν ήθελε να χρησιμοποιήσει ένα σκουριασμένο βλήμα, και μια πιθανή απώλεια στην ακρίβεια.

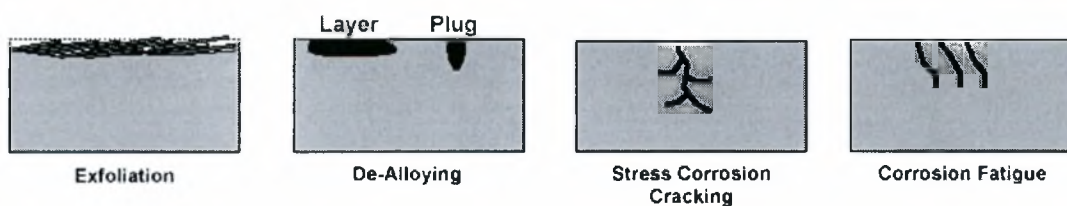
Κατηγορία 1: Ευπροσδιόριστες μορφές μέσα από τη συνηθισμένη οπτική εξέταση.



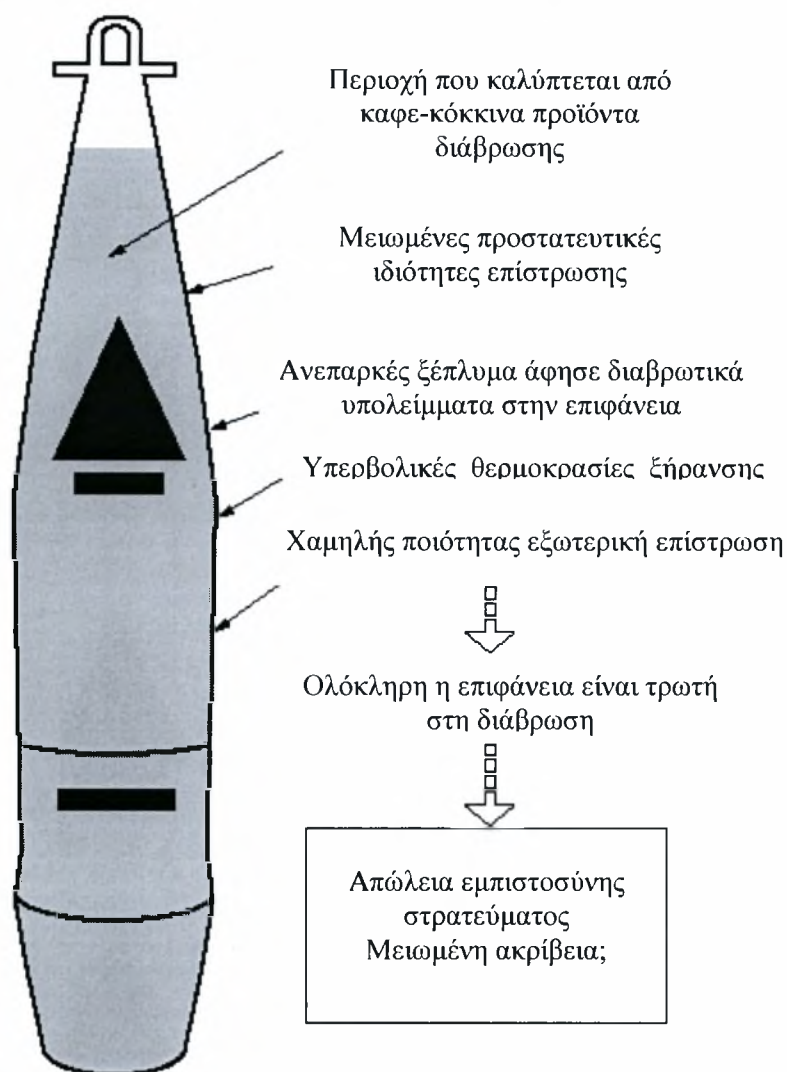
Κατηγορία 2: Μορφές που μπορεί να απαιτούν επιπρόσθετες μεθόδους εξέτασης.



Κατηγορία 3: Μορφές που η αναγνώρισή τους απαιτεί συνήθως τη χρήση μικροσκοπίου



Σχήμα 2.1 Οι κυριότερες μορφές διάβρωσης ανάλογα με την ευκολία προσδιορισμού τους



Σχήμα 2.2 Επίδραση ομοιόμορφης διάβρωσης σε ένα βλήμα

Τρηματική διάβρωση (Pitting)

Η τρηματική διάβρωση είναι μια τοπική μορφή διάβρωσης από την οποία κοιλότητες, ή "τρύπες", δημιουργούνται στο υλικό. Η μορφή αυτή της διάβρωσης θεωρείται σαν πιο επικίνδυνη από την ομοιόμορφη διάβρωση αφού είναι πιο δύσκολη η ανίχνευσή της, η πρόβλεψή της και, επομένως, η λήψη προληπτικών μέτρων. Τα προϊόντα της διάβρωσης συχνά καλύπτουν τις κοιλότητες αυτές.. Μια μικρή, στενή κοιλότητα με μια σχετικά μικρή απώλεια μάζας του μετάλλου μπορεί να οδηγήσει στη αστοχία ολόκληρης της κατασκευής. Αυτή η μορφή διάβρωσης αποτελεί -σχεδόν πάντα- ένα κοινό παρονομαστή στις τοπικές μορφές διάβρωσης και μπορεί να εμφανισθεί με διάφορα σχήματα όπως αυτά εμφανίζονται στο σχήμα 2.3. Η τρηματική διάβρωση

μπορεί να δημιουργήσει ανοιχτές κοιλότητες ή κοιλότητες καλυμμένες από μια ημιπερατή μεμβράνη που έχει δημιουργηθεί από τα προϊόντα της διάβρωσης. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να είναι είτε ημισφαιρικές, είτε κυπελλοειδείς. Σε μερικές περιπτώσεις έχουν επίπεδα τοιχώματα, αποκαλύπτοντας έτσι την κρυσταλλική δομή του μετάλλου, ή ακόμα μπορεί να έχουν ένα εντελώς ακανόνιστο σχήμα¹⁹.

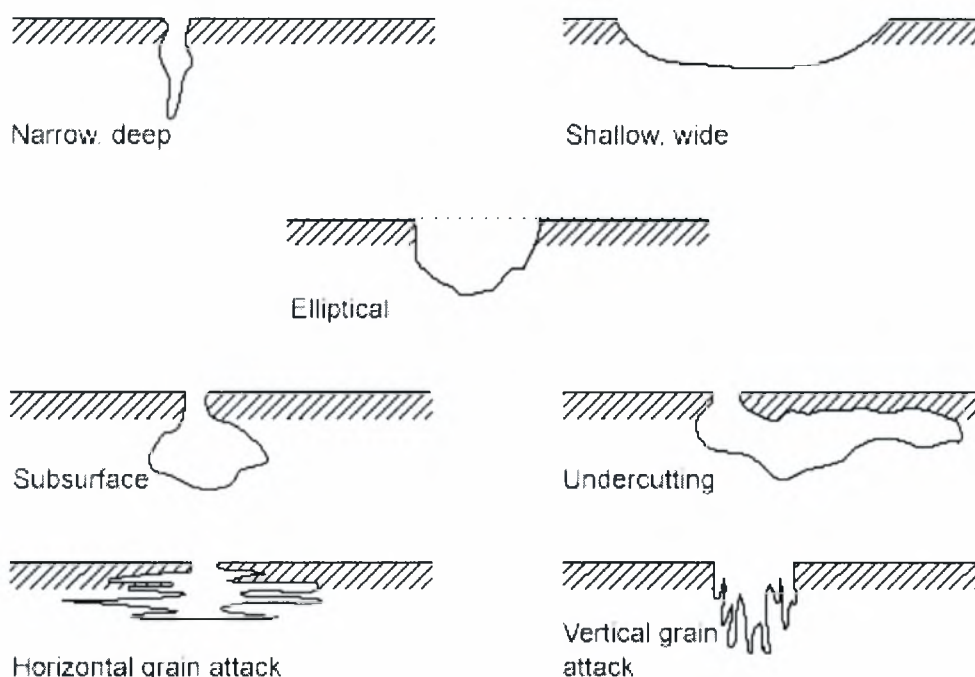
Η μορφή αυτή της διάβρωσης παρατηρείται όταν συγκεκριμένα μέρη του υλικού είναι εντελώς απροστάτευτα απέναντι σε διαβρωτικές επιθέσεις ενώ οι παρακείμενες επιφάνειες είναι απόλυτα προστατευμένες. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζεται από το λόγο Sa/Sc , όπου ο όρος Sa αναφέρεται στην ανοδική αντίδραση και ο Sc στην καθοδική. Ο λόγος Sa/Sc , μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό παράγοντα για όλες τις περιπτώσεις της τοπικής μορφής διάβρωσης αφού μια τέτοια κατάσταση σχετίζεται τόσο με την ανοδική, όσο και με την καθοδική αντίδραση. Τα διαβρωτικά “μικροπεριβάλλοντα”, τα οποία τείνουν να είναι πολύ διαφορετικά από το ευρύ περιβάλλον, συχνά συμβάλλουν σημαντικά στην εκκίνηση και τη διάδοση αυτής της μορφής διάβρωσης. Το γεγονός αυτό κάνει ακόμα πιο δύσκολη την πρόβλεψη της ζημιάς. Εκτός από την τοπική μείωση του πάχους του μετάλλου, η δημιουργία κοιλοτήτων μπορεί επίσης να γίνει επικίνδυνη σαν σημεία εφαρμογής υψηλών πιέσεων. Φαινόμενα Κόπωσης-Διάβρωσης και Εργο-Διάβρωσης (Fatigue and stress corrosion cracking) μπορεί να παρατηρηθούν στη βάση των κοιλοτήτων αυτών.

Διάβρωση εγκοπών (Crevice corrosion)

Η διάβρωση εγκοπών είναι μια τοπική μορφή διάβρωσης που συνήθως σχετίζεται με την παραμονή μιας ουσίας ή ενός διαλύματος σε επίπεδο “μικροπεριβάλλοντος”. Τέτοια φαινόμενα οδηγούν στη δημιουργία ρωγμών (σε προφυλαγμένες επιφάνειες) παρόμοιες με αυτές που παρατηρούνται κάτω από φλάντζες, μονωτικά υλικά, συνδέσεις, σφικτήρες κ.α.. Επειδή η διάχυση του οξυγόνου στη ρωγμή είναι περιορισμένη, ένα διαφορετικό σημείο αερισμού τείνει να δημιουργηθεί μεταξύ της ρωγμής και της εξωτερικής επιφάνειας. Η καθοδική αντίδραση μείωσης του οξυγόνου δεν μπορεί να εμφανισθεί στην περιοχή της ρωγμής, προσδίδοντας στο σημείο αερισμού έναν ανοδικό χαρακτήρα. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη ιδιαίτερα διαβρωτικών συνθηκών στην περιοχή της ρωγμής και επομένως

στη ζημιά των μετάλλων. Η δημιουργία ενός όξινου μικροπεριβάλλοντος σε συνδυασμό με μια υψηλή συγκέντρωση ιόντων χλωρίου παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.

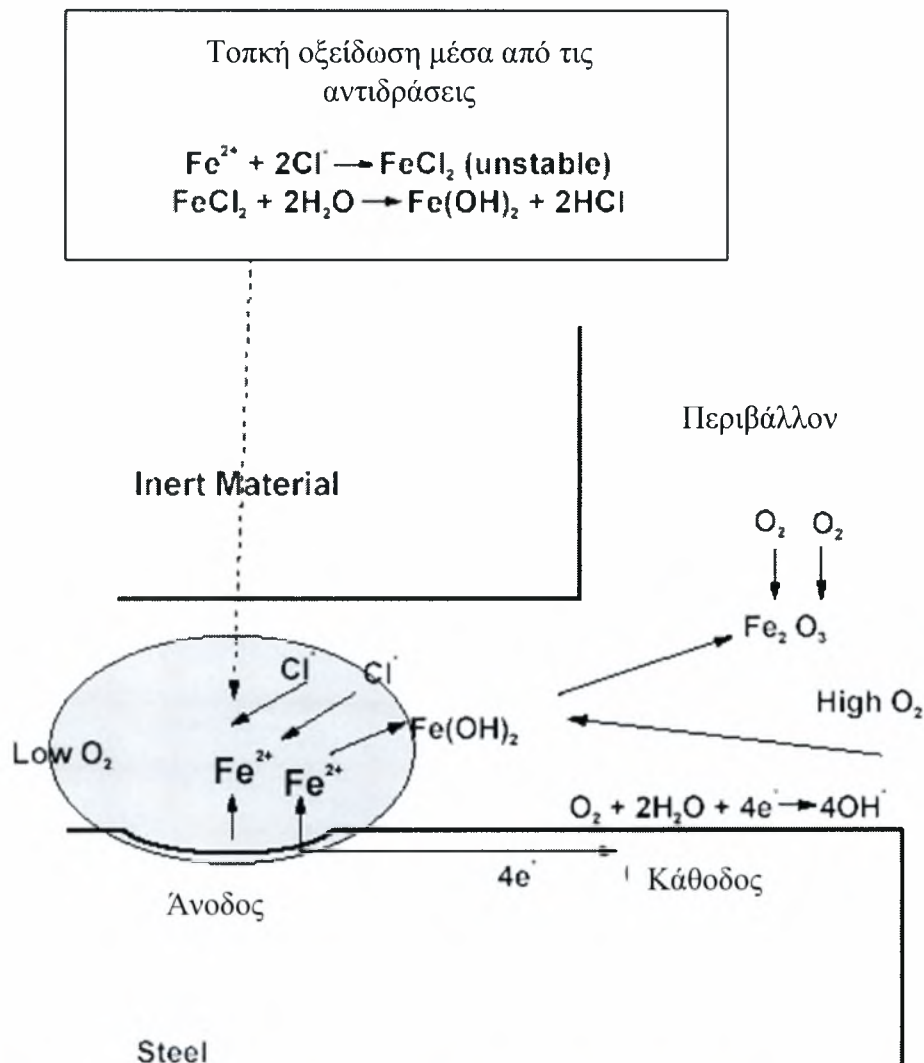
Αυτού του είδους η διάβρωση στις ενώσεις της ατράκτου των αεροσκαφών αναδείχτηκε σε ένα σοβαρό θέμα ασφάλειας, κυρίως μετά το περιστατικό των αερογραμμών Aloha. Στις 28 Απριλίου 1988, ένα 19-χρονο Boeing 737 έχασε ένα σημαντικό κομμάτι από το πάνω μέρος της ατράκτου κοντά στο μπροστινό μέρος του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια πτήσης στα 24000 πόδια⁸. Το μέγεθος της ζημιάς παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.3 Χαρακτηριστικές παραλλαγές στη μορφή των κοιλοτήτων

Ως εκ θαύματος, ο πιλότος κατάφερε να προσγειώσει το αεροσκάφος στο νησί Μάουι της Χαβάη. Μία αεροσυνοδός έχασε τη ζωή της ενώ πολλοί επιβάτες τραυματίστηκαν. Πολλαπλές ρωγμές από κόπωση ανιχνεύθηκαν στο υπόλοιπο αεροσκάφος. Το πόρισμα της αρμόδιας επιτροπής που εκδόθηκε το 1989 απέδωσε το γεγονός στο ελλιπές πρόγραμμα συντήρησης της ιδιοκτήτριας εταιρίας²⁰. Νωρίτερα, το 1981, ένα παρόμοιο αεροσκάφος υπέστη ανάλογη ζημιά κατά τη διάρκεια της

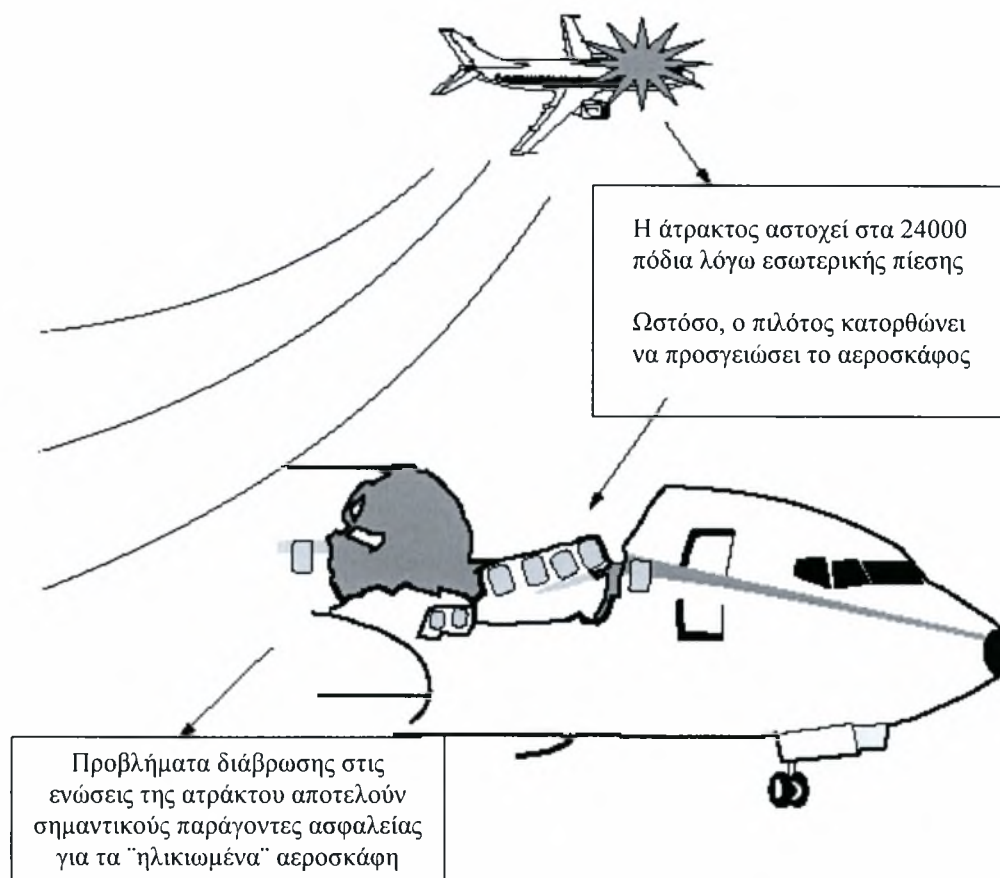
πτήσης με πάνω από 100 απώλειες. Οι έρευνες απέδωσαν το γεγονός σο αστοχία της ατράκτου λόγω αυξημένης κόπωσης και της διάβρωσης²¹.



Σχήμα 2.4 “Μικροπεριβάλλον” που δημιουργείται από τη διάβρωση σε μια ρωγμή

Οι τρεις βασικοί τρόποι συναρμογής που χρησιμοποιούνται στις ατράκτους των αεροσκαφών παρουσιάζονται στο σχήμα 2.6. Ένα σχέδιο αεροσκαφών ενσωματώνει κανονικά δύο ή τρεις διαφορετικούς τύπους συναρμογών στην άτρακτο. Οι κομμάτια της ατράκτου καρφώνονται και σφραγίζονται από μερικούς κατασκευαστές, ενώ άλλοι υιοθετούν έναν συνδυασμό καρφώματος και συγκολλητικής σύνδεσης²². Η διάβρωση στις ενώσεις της ατράκτου είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη. Η κόπωση στο περιστατικό των αερογραμμών Aloha δεν αναμενόταν

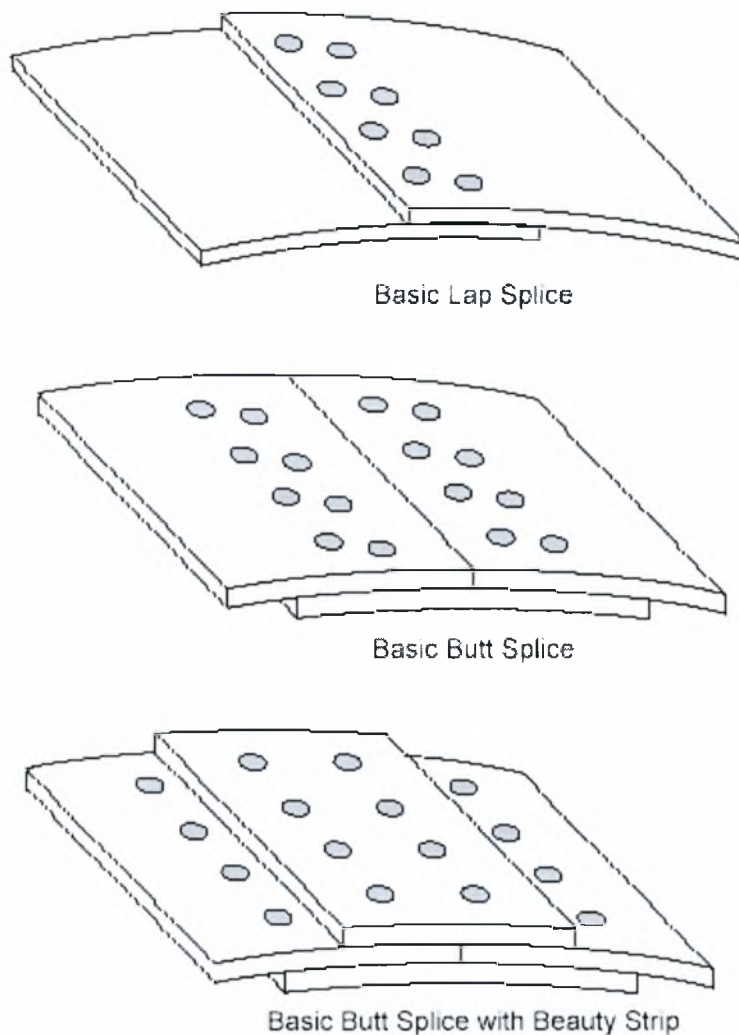
να αποτελέσει πρόβλημα θεωρώντας σαν δεδομένο ότι τα κομμάτια της ατράκτου θα παρέμεναν σταθερά συνδεδεμένα μεταξύ τους²³.



Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση του περιστατικού των αερογραμμών Aloha

Οι μηχανισμοί διάβρωσης σε αυτές τις γεωμετρίες οδηγούν στη συγκέντρωση των προϊόντων της διάβρωσης ανάμεσα στις ενώσεις και στην ανάπτυξη ενός φαινομένου που είναι ευρύτερα γνωστό σαν "*pillowing*", μια επικίνδυνη κατάσταση η οποία και οδηγεί στο διαχωρισμό των επιφανειών (σχήμα 2.7). Το κυρίαρχο προϊόν διάβρωσης που προσδιορίζεται στις ενώσεις των ατράκτων είναι το οξειδίο του αργιλίου ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Η συγκέντρωση των προϊόντων

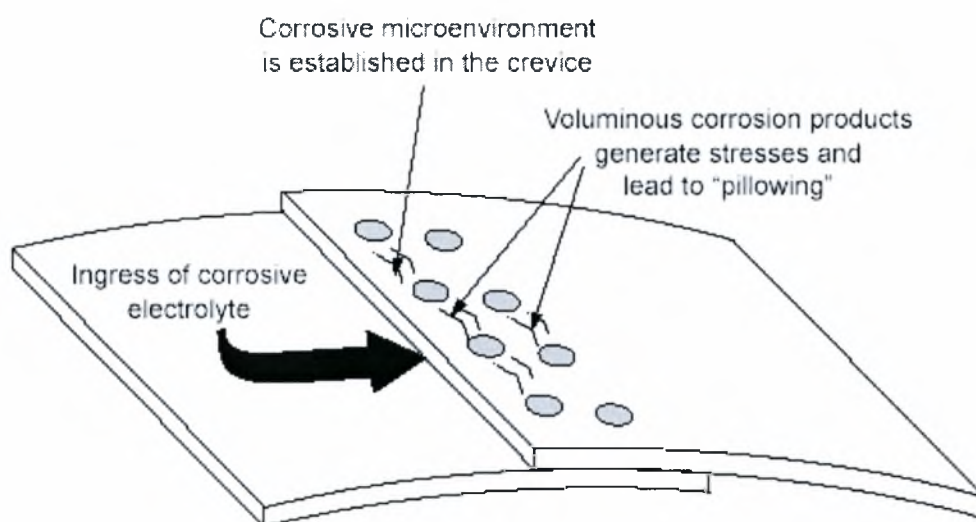
της διάβρωσης οδηγεί επίσης σε μια ανεπιθύμητη αύξηση της πίεσης κοντά στις συνδέσεις με αποτέλεσμα τη θραύση των συνδετικών καρφιών.²⁴



Σχήμα 2.6 Οι τρεις βασικοί τύποι συναρμογών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της ατράκτου των αεροσκαφών.

Ζημιά στα εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη, όπως στις συναρμογές που περιγράφονται παραπάνω, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες ασφαλείας για τα "ηλικιωμένα" αεροσκάφη. Μέχρι το τέλος του αιώνα, το 64% του στόλου των Αμερικάνικων εμπορικών μεταφορέων θα είναι τουλάχιστον 20 ετών. Το 1970, η μέση ηλικία αυτού του στόλου ήταν κάτω από 5 έτη.²¹ Είναι ευρέως γνωστό ότι οι δαπάνες και οι κίνδυνοι ασφαλείας που συνδέονται με τα αεροσκάφη και τις ζημιές λόγω διάβρωσης είναι υψηλότερη στους γηρασμένους στόλους. Μεγάλες και λεπτομερές διαδικασίες επιθεώρησης και συντήρησης, ως τμήμα των περιοδικών

ελέγχων, αντιπροσωπεύουν μια ουσιαστική μερίδα των δαπανών διάβρωσης. Ένα σχετικό παράδειγμα που περιλαμβάνει ένα πρόσφατα επιθεωρημένο Boeing 747 28 χρονών παρουσιάζεται παρακάτω.²⁰ Το συγκεκριμένο αεροσκάφος, εισήχθη σε ένα πιο αυστηρό πρόγραμμα επιθεώρησης και χρειάστηκε 65 μέρες και 90.000 ώρες εργασίας. Εκτός από τα μέρη που χρειάστηκε να αντικατασταθούν και τις δαπάνες του προσωπικού, το κόστος της παραμονής του αεροσκάφους στο υπόστεγο για ένα τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα επιβάρυνε ακόμα περισσότερο την ιδιοκτήτρια εταιρία.



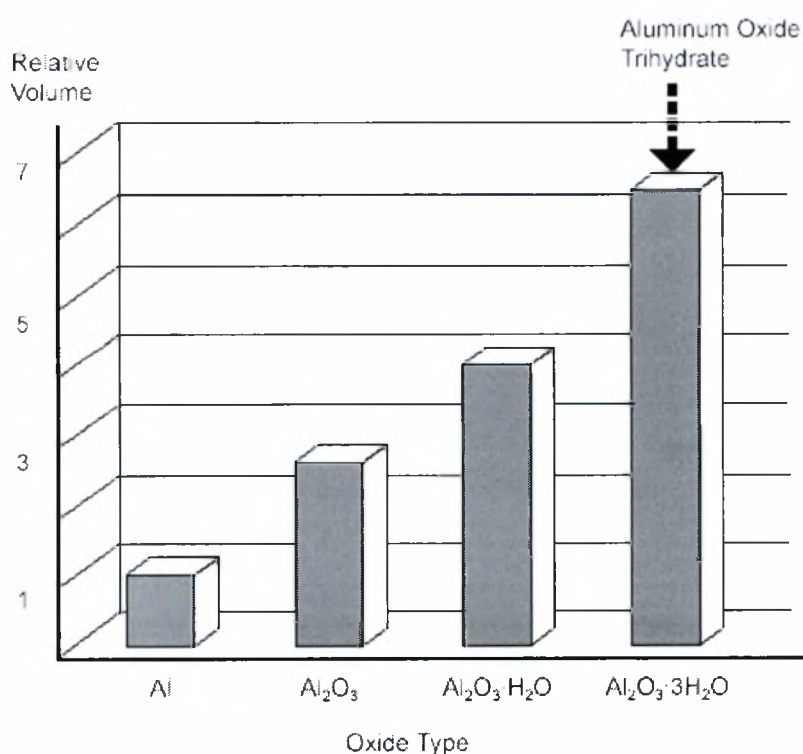
Σχήμα 2.7 “Pillowing” στα σημεία σύνδεσης της ατράκτου

Γαλβανική διάβρωση (Galvanic corrosion)

Η γαλβανική διάβρωση εμφανίζεται όταν ανόμοια μεταλλικά υλικά που έρχονται σε επαφή παρουσία ενός ηλεκτρολύτη. Τέτοιου είδους διάβρωση μπορεί επίσης να εμφανιστεί μεταξύ των μετάλλων και των κραμάτων και άλλων υλικών όπως ο άνθρακας ή ο γραφίτης. Ένα ηλεκτροχημικό κύτταρο διάβρωσης δημιουργείται λόγω των διαφορών στις δυνατότητες διάβρωσης ανάμεσα στα ανόμοια υλικά. Το υλικό που διαβρώνεται λιγότερο εύκολα γίνεται η κάθοδος του κυττάρου διάβρωσης, ενώ το υλικό με τη μεγαλύτερη ευκολία διάβρωσης καταναλώνεται από την ανοδική διάλυση. Η αναλογία της περιοχής των δύο ανόμοιων υλικών είναι εξαιρετικά σημαντική. Αν ο λόγος S_a/S_c είναι μεγάλος, το γαλβανικό ρεύμα μπορεί να

συγκεντρωθεί σε μια μικρή ανοδική περιοχή. Το ποσοστό διάβρωσης, ορατό σαν απώλεια μάζας στη διάρκεια του χρόνου, μπορεί να γίνει πολύ υψηλό στην άνοδο. Για παράδειγμα, εάν καρφιά αργιλίου χρησιμοποιηθούν σε πλάκες χάλυβα, τα καρφιά θα διαβρωθούν εξαιρετικά γρήγορα.

Το σχήμα 2.9 δείχνει την ευκολία διάβρωσης κάποιων μετάλλων απέναντι στο θαλασσινό νερό. Γενικά, όσο πιο πολύ απέχουν δυο μέταλλα μεταξύ τους στη στήλη, τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανότητα εμφάνισης γαλβανική διάβρωσης. Εντούτοις, αυτή η σειρά δεν δίνει πληροφορίες για το ποσοστό της διάβρωσης. Επιπλέον, η σχετική θέση των υλικών μπορεί να αλλάξει μέσα σε άλλα περιβάλλοντα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της γαλβανικής διάβρωσης παρατηρούνται όχι μόνο σε μακροσκοπικό επίπεδο, αλλά και στη μικροδομή του υλικού. Ορισμένες φάσεις ή ιζήματα θα δεχθούν ανοδική διάλυση κάτω από την επίδραση των φαινομένων της μικρογαλβανικής διάβρωσης. Επειδή η αρχή της γαλβανικής διάβρωσης είναι ευρέως γνωστή, είναι αξιοπρόσεκτο ότι ακόμα και σήμερα αποτελεί μία από τις κύριες μορφές διάβρωσης. Το σχήμα 2.10 παρουσιάζει τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση γαλβανικής διάβρωσης.²⁵



Σχήμα 2.8 Σχετικός όγκος των προϊόντων διάβρωσης του αργιλίου

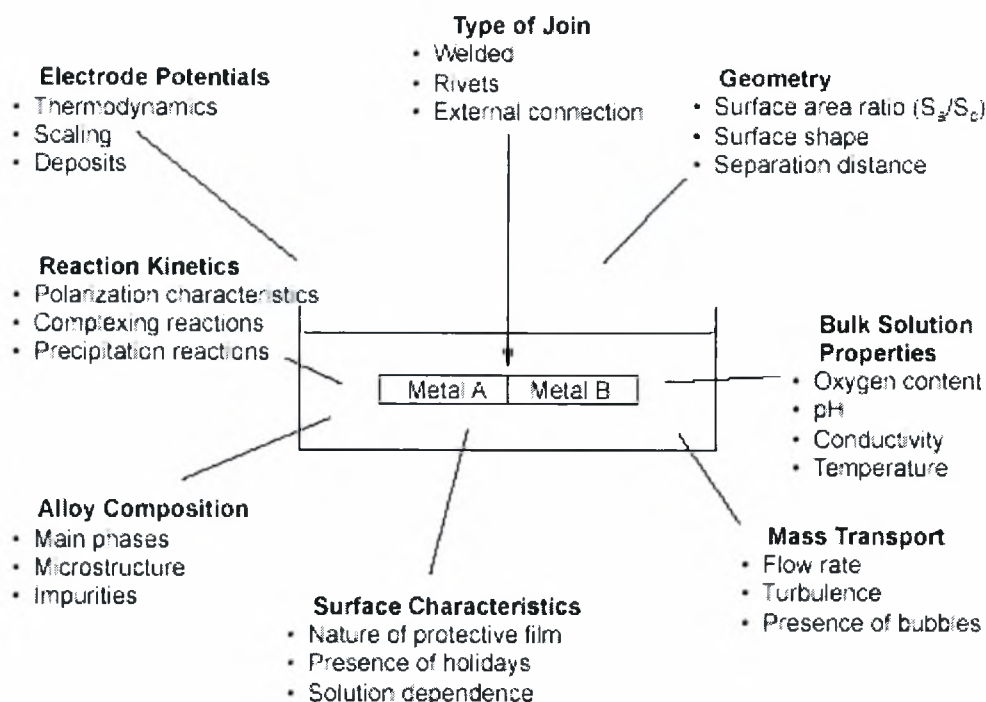
Noble or cathodic	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	Chlorimet 3
	Hastelloy C
	18-8 Mo stainless steel (passive)
	18-8 stainless steel (passive)
	Chromium steel >11% Cr (passive)
	Inconel (passive)
	Nickel (passive)
	Silver solder
	Monel
	Bronzes
	Copper
	Brasses
	Chlorimet 2
	Hastelloy B
	Inconel (active)
	Nickel (active)
	Tin
	Lead
Lead-tin solders	
18-8 Mo stainless steel (active)	
18-8 stainless steel (active)	
Ni-resist	
Chromium steel >11% Cr (active)	
Cast iron	
Steel or iron	
2024 aluminum	
Cadmium	
Commercially pure aluminum	
Zinc	
Magnesium and its alloys	
Active or anodic	

Σχήμα 2.9 Ευκολία διάβρωσης κάποιων εμπορικών μετάλλων απέναντι στο θαλασσινό νερό

Εκλεκτική διύλιση (Selective leaching)

Η εκλεκτική διύλιση αναφέρεται στην εκλεκτική αφαίρεση ενός στοιχείου από ένα κράμα με τις διαδικασίες της διάβρωσης. Ένα κοινό παράδειγμα αποτελεί η αφαίρεση του ψευδάργυρου από τον ασταθή ορείχαλκο από όπου προκύπτει μια πορώδης δομή χαλκού. Η εκλεκτική αφαίρεση του ψευδάργυρου μπορεί να γίνει με ομοιόμορφο τρόπο σε ολόκληρη την επιφάνεια του κράματος, ή σε τοπική κλίμακα. Πιστεύεται ότι ο ορείχαλκος διαλύεται με τον ψευδάργυρο που βρίσκεται στο διάλυμα και

παρατηρείται εκ νέου επικάλυψη του χαλκού από το διάλυμα¹⁶. Η εμφάνιση γραφίτη από τον γκρίζο χυτοσίδηρο, από όπου ένας εύθραυστος από γραφίτη σκελετός παραμένει μετά από την εκλεκτική διύλιση του σιδήρου, είναι ένα ακόμα παράδειγμα της εκλεκτικής διύλισης.



Σχήμα 2.10 Παράγοντες που επηρεάζουν τη γαλβανική διάβρωση

Διάβρωση λόγω εκτριβής (Erosion corrosion)

Η διάβρωση λόγω εκτριβής είναι η ζημία που προκαλείται από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις διάβρωσης και τα μηχανικά αποτελέσματα από τη σχετική κίνηση μεταξύ του ηλεκτρολύτη και της επιφάνειας διάβρωσης. Η μορφή αυτή της διάβρωσης ορίζεται ως η επιταχυνόμενη υποβάθμιση παρουσία αυτής της σχετικής κίνησης. Η κίνηση είναι συνήθως υψηλής ταχύτητας, με μηχανικές φθορές φαινόμενα γδαρσίματος. Τα αυλάκια, οι στρογγυλεμένες άκρες, και οι κυματοειδείς επιφάνειες χαρακτηρίζουν αυτήν την μορφή ζημίας. Η διάβρωση λόγω εκτριβής βρίσκεται σε συστήματα όπως σωληνώσεις (ειδικά γωνίες και ενώσεις), βαλβίδες, αντλίες, ακροφύσια, εναλλάκτες θερμότητας, λεπίδες στροβίλων, και διαφράγματα. Η διάδοση και η δημιουργία κοιλοτήτων είναι ειδικές μορφές της διάβρωσης λόγω

εκτριβής. Στην αρχή, κινούμενα υγρά μόρια προκαλούν φθορά, ενώ στη συνέχεια, οι φυσαλίδες ατμού που πέφτουν (ασταθείς) προκαλούν τη ζημία στην επιφάνεια.

Διάβρωση λόγω τριβής (Fretting corrosion)

Η διάβρωση λόγω τριβής αναφέρεται στην τραχύτητα των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, μπορεί επίσης να περιληφθεί σε αυτήν την κατηγορία. Αυτού του είδους η ζημία προκαλείται κάτω από την ύπαρξη φορτίου και παρουσία συνεχούς κίνησης της επιφάνειας, όπως προκαλείται, παραδείγματος χάριν, από τις δονήσεις. Κοιλότητες ή αυλάκια καθώς και κατάλοιπα οξειδίων χαρακτηρίζουν αυτήν την ζημία, που βρίσκεται στα μηχανήματα, στις συναρμογές και στα σφαιρικά ή κυλινδρικά ρουλεμάν. Οι επιφάνειες που εκτίθενται σε δονήσεις κατά τη διάρκεια της μεταφοράς εκτίθενται στον κίνδυνο αυτής της μορφής διάβρωσης.

Ρηγματώσεις από το περιβάλλον Environmental cracking (EC). Οι ρηγματώσεις από το περιβάλλον (EC) είναι μια οξεία μορφή τοπικής διάβρωσης. Λόγω της εγγενούς πολυπλοκότητας των περιπτώσεων που οδηγούν στις διαφορετικές μορφές της EC, οι παράμετροι που οδηγούν σε αυτή την κατηγορία προβλημάτων έχουν περιγραφεί συχνά με ποιοτικούς όρους όπως αυτοί που αναφέρονται στον πίνακα 2.1. Ο πίνακας 2.1 απαριθμεί τους παράγοντες που συμβάλλουν σε μια από τρεις μορφές EC, όπως, εργο-διάβρωση (stress corrosion cracking SCC), κόπωση-διάβρωση (fatigue corrosion), και “ψαθυροποίηση” λόγω απορρόφησης υδρογόνου (hydrogen embrittlement).

SCC είναι το ράγισμα που προκαλείται από τη συνδυασμένη επίδραση πίεσης και ενός διαβρωτικού μέσου. Το αποτέλεσμα της SCC σε ένα υλικό φαίνεται να βρίσκεται μεταξύ της θραύσης και του κατώτερου ορίου κόπωσης του υλικού (σχήμα 2.11). Η ψυχρή παραμόρφωση, η διαμόρφωση, η συγκόλληση, η θερμική επεξεργασία, μπορεί να εισάγουν πιέσεις στο σύστημα. Το μέγεθος και η σημασία τέτοιων πιέσεων είναι συχνά υποτιμημένες. Η συγκέντρωση των προϊόντων της διάβρωσης σε περιορισμένα συστήματα μπορεί επίσης να οδηγήσει σε δημιουργία σημαντικών πιέσεων οι οποίες και δεν πρέπει να αγνοηθούν. SCC συνήθως

εμφανίζεται σε συγκεκριμένο συνδυασμό κράματος-περιβάλλοντος-πίεσης (σχήμα 2.12)

Συνήθως, το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας παραμένει αλώβητο, αλλά με λεπτές ρωγμές που διαπερνούν το υλικό. Στη μικροδομή, αυτές οι ρωγμές μπορούν να έχουν μια περικρυσταλλική ή διακρυσταλλική μορφολογία. Η SCC είναι ταξινομημένη ως μια καταστροφική μορφή διάβρωσης επειδή η ανίχνευση τέτοιων λεπτών ρωγμών μπορεί να είναι πολύ δύσκολη και η ζημία να μην προβλεφθεί έγκαιρα. Τα πειραματικά δεδομένα της SCC παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά. Μια καταστρεπτική αστοχία μπορεί να εμφανιστεί απροσδόκητα, με ελάχιστη απώλεια υλικού.

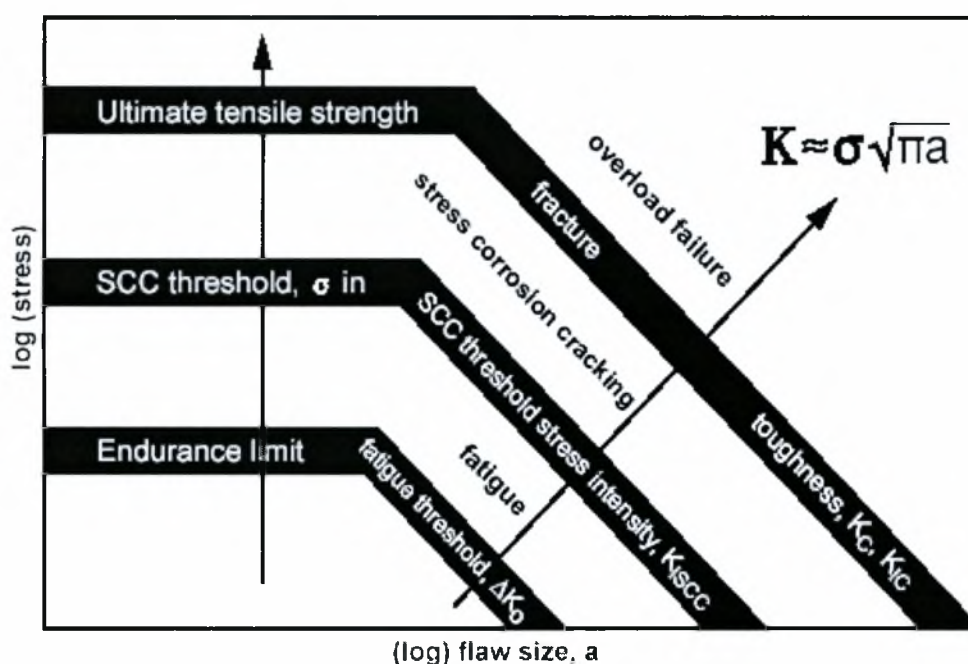
Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά ρηγματώσεων από το περιβάλλον

Factor	SCC	Fatigue corrosion	Hydrogen induced cracking
Stress	Static tensile	Cyclic + tensile	Static tensile
Aqueous corrosive	Specific to the alloy	Any	Any
Temperature increase	Accelerates	Accelerates	< Ambient: increases < Ambient: increases
Pure metal	Resistant	Susceptible	Susceptible
Crack morphology	Transgranular Intergranular Branched	Transgranular Unbranched Blunt tip	Transgranular Intergranular Unbranched Sharp tip
Corrosion products in cracks	Absent	Present	Absent
Crack surface appearance	Cleavagelike	Beach marks and/or striations	Cleavagelike
Cathodic polarization	Suppresses	Suppresses	Accelerates
Near maximum strength	Susceptible but minor	Accelerates	Accelerates

Η “ψαθυροποίηση” λόγω απορρόφησης υδρογόνου ταξινομείται μερικές φορές ξεχωριστά από την SCC. Αναφέρεται στον όρο “ψαθυροποίηση” ο οποίος οδηγεί στην αύξηση του κινδύνου δημιουργίας ρωγμών εξ’ αιτίας της απορρόφησης υδρογόνου από το σύστημα. *Hydrogen stress cracking* και *sulfide stress cracking*

είναι όροι που χρησιμοποιούνται για “ψαθυροποίηση” λόγω υδρογόνου από τις αλληλεπιδράσεις με αέριο υδρογόνο και σουλφίδιο υδρογόνου, αντίστοιχα.

Στην πράξη, υλικά που χρησιμοποιούνται για την αντοχή τους, είναι τα πιο ευαίσθητα απέναντι στην SCC στην περίπτωση που συγκεκριμένα στοιχεία του περιβάλλοντος τα καθιστούν ευάλωτα.. Παράδειγμα τέτοιας ευαισθησίας παρουσιάζεται για τους ανοξείδωτους χάλυβες όταν στο περιβάλλον υπάρχουν ιόντα χλωριδίου, ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις.. Δυστυχώς, ο όρος *ανοξείδωτος χάλυβας* αποδίδεται μερικές φορές μόνο σημασιολογικά. Οι μηχανικοί πρέπει να γνωρίζουν ότι οι ανοξείδωτοι χάλυβες δεν είναι άτρωτοι απέναντι στις επιθέσεις διάβρωσης και μπορούν να παρουσιάσουν ιδιαίτερη ευαισθησία απέναντι στις



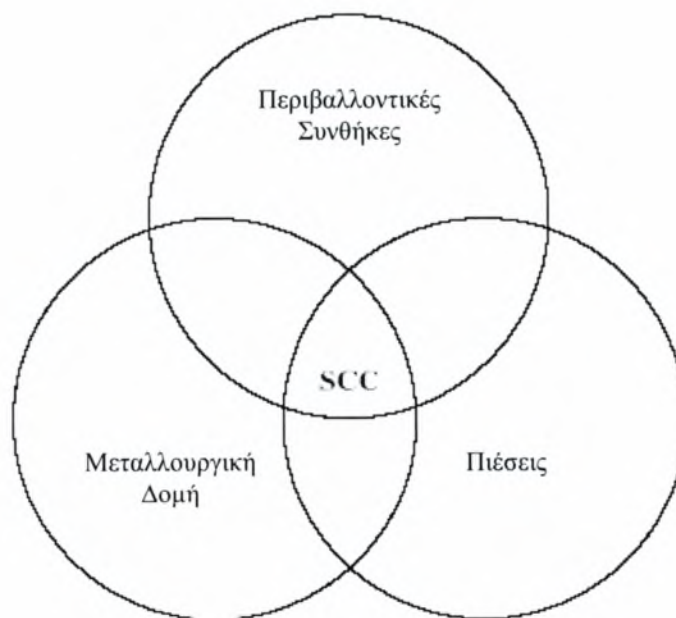
Σχήμα 2.11 Συνέχεια μεταξύ μορφών αστοχίας

τοπικές μορφές διάβρωσης και την SCC. Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες, κυρίως οι UNS S30400 και UNS S31600, χρησιμοποιούνται εκτενώς στον κλάδο των οικοδομικών και τεχνικών έργων. Η ανάπτυξη SCC σε ράβδους S30400, πάνω στις οποίες στηριζόταν η τσιμεντένια οροφή ενός κολυμβητηρίου είχε καταστροφικές συνέπειες.

Τον Μάιο του 1985, η βαριά οροφή ενός κολυμβητηρίου της Ελβετίας κατέρρευσε ύστερα από 13 χρόνια λειτουργίας²⁶. Η αιτία της αστοχίας θεωρήθηκε ότι

ήταν περικρυσταλλική δυναμο-διάβρωση όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.13. Η δημιουργία πίεσης πάνω στα δοκάρια ανοξειδωτου χάλυβα οφείλεται στο μεγάλο βάρος της οροφής. Χλωρίδια διασκορπίστηκαν στην ατμόσφαιρα σε συνδυασμό με την παρουσία υγρασίας, η οποία και αποτέλεσε το διαβρωτικό περιβάλλον. Ένα μακροσκοπικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των ράβδων ανοξειδωτου χάλυβα ήταν η εύθραυστη φύση των ρωγμών SCC, που δεν παρουσίαζαν καμία ολκιμότητα.

Παρά αυτή την αστοχία, παρόμοια γεγονότα αναφέρθηκαν σε Αγγλία, Γερμανία, Δανία και Σουηδία, ευτυχώς αυτή τη φορά χωρία θύματα. Αν και η επίδραση του χλωριδίου σε αυτή τη μορφή διάβρωσης αποτελεί ένα κοινό μηχανισμό αστοχίας του ανοξειδωτου χάλυβα, αίσθηση προκάλεσε το γεγονός ότι η αστοχία συνέβη σε θερμοκρασία δωματίου. Ως τότε ήταν γενικά παραδεκτό ότι αυτού του είδους η διάβρωση στον ανοξειδωτο χάλυβα δεν αποτελούσε πρόβλημα για θερμοκρασίες κάτω από 60°C.



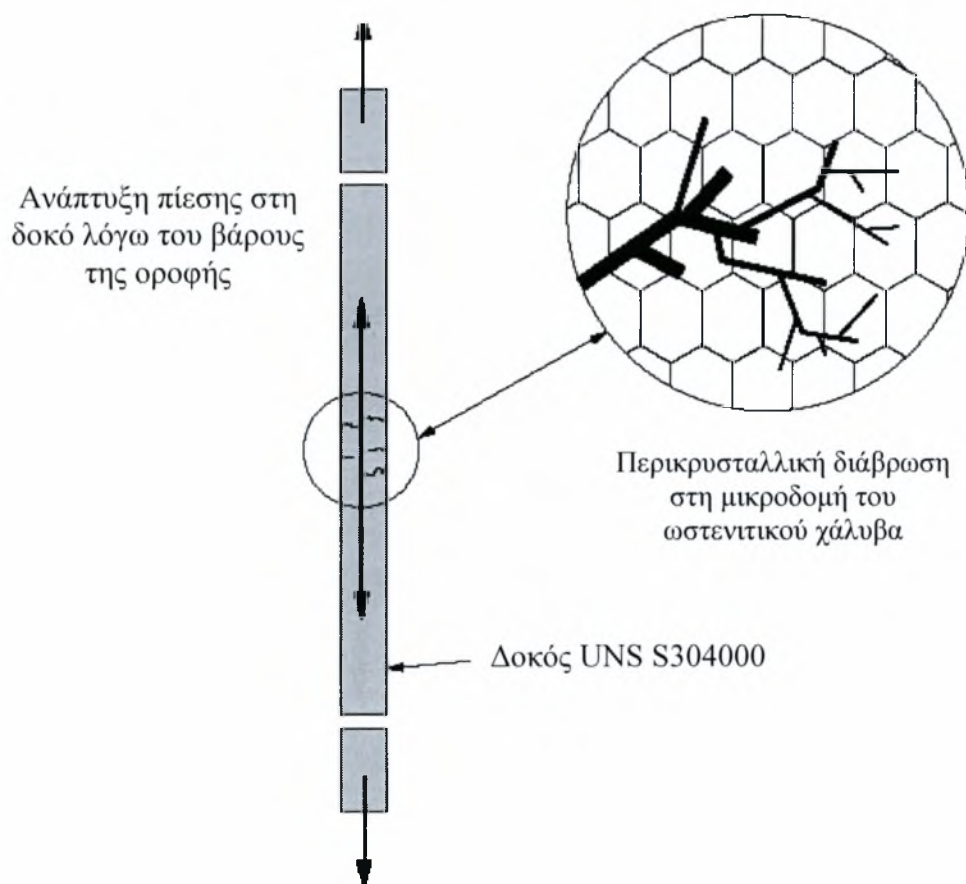
Σχήμα 2.12 Οι τρεις κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνιση της SCC

Λαμβάνοντας σαν δεδομένο ότι ο συνδυασμός χαμηλού pH και συγκέντρωσης χλωριδίων αποτελεί το λόγο της αστοχίας SCC, διάφοροι παράγοντες στο

περιστατικό της Αγγλίας αναγνωρίστηκε ότι θα μπορούσαν να επιδεινώσουν τη ζημιά. Οι λειτουργικές αλλαγές περιελάμβαναν τη μεγαλύτερη χρήση της πισίνας καθώς και τη χρήση σιντριβανιών και μηχανών κυματισμού, με συνέπεια τη μεγαλύτερη διασπορά του νερού από τις πισίνες (και επομένως χλωριδίων) στην ατμόσφαιρα. Η σημασία της εξάλειψης της χρήσης των κραμάτων S30400 και S31600 σε παρόμοια περιβάλλοντα είναι προφανής μέσα από το παραπάνω παράδειγμα.

Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular corrosion)

Η μικροδομή των μετάλλων και των κραμάτων αποτελείται από κρυστάλλους. Η περικρυσταλλική διάβρωση είναι μια τοπική μορφή διάβρωσης κατά μήκος των



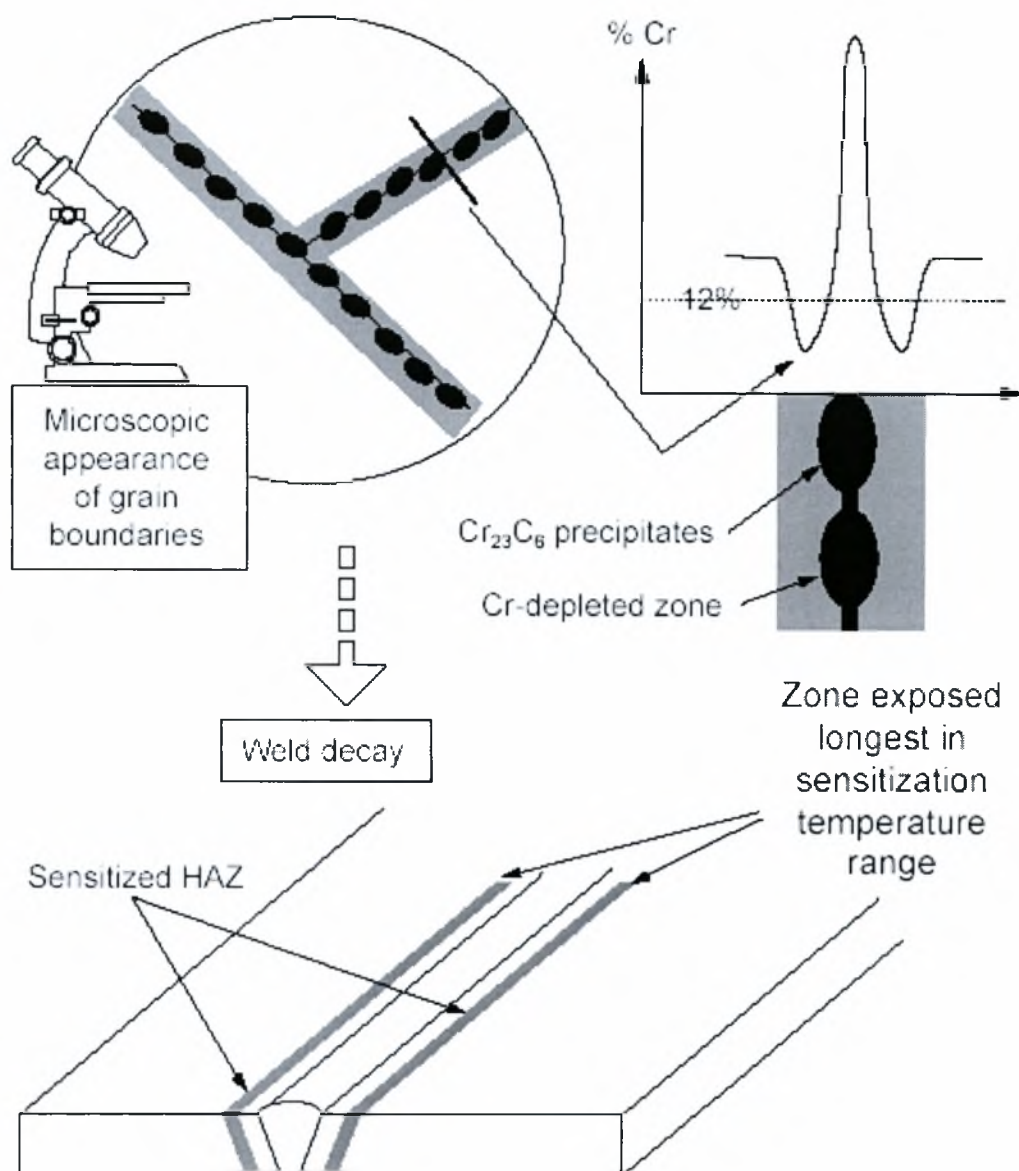
Σχήμα 2.13 Περικρυσταλλική διάβρωση SCC σε δοκούς στήριξης από ανοξείδωτο χάλυβα

ορίων των κρυστάλλων ή ακριβώς δίπλα στα όρια, ενώ η πλειοψηφία των κρυστάλλων παραμένει ανεπηρέαστη. Αυτή η μορφή διάβρωσης συνδέεται συνήθως με φαινόμενα χημικού διαχωρισμού (διάφορες ουσίες έχουν την τάση να συσσωρεύονται στα όρια των κρυστάλλων) ή συγκεκριμένες φάσεις που κατακρημνίζονται στα όρια των κρυστάλλων. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να δημιουργήσει ζώνες μειωμένης αντίστασης στη διάβρωση. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η “ευαισθητοποίηση” των ανοξειδωτων χαλύβων. Ιζήματα πλούσια σε χρώμιο στα όρια των κρυστάλλων οδηγούν σε σημαντική μείωση της συγκέντρωσης του χρωμίου στις περιοχές ακριβώς δίπλα στα όρια των κρυστάλλων, δημιουργώντας ένα περιβάλλον ευάλωτο στις επιθέσεις διάβρωσης από συγκεκριμένους ηλεκτρολύτες. (σχήμα 2.14). Αυτό το πρόβλημα παρουσιάζεται συχνά μέσα στις ζώνες που έχουν επηρεαστεί από τη θερμότητα των συγκολλήσεων, όπου έχει δημιουργηθεί μια ευαίσθητη δομή.

Η φθορά που παρατηρείται αμέσως δίπλα στο μέταλλο συγκόλλησης, είναι μια ειδική μορφή ευαισθητοποίησης στους ωστενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες. Στοιχεία όπως Ti και Nb προσθέτονται στους ανοξειδωτους χάλυβες για την αποφυγή της περικρυσταλλικής διάβρωσης με τον περιορισμό του σχηματισμού ιζημάτων πλούσιων σε χρώμιο στα όρια των κρυστάλλων. Τα στοιχεία αυτά δημιουργούν καρβίδια με προτίμηση στο χρώμιο των ωστενιτικών χαλύβων. Εντούτοις, στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται αμέσως δίπλα στη ζώνη συγκόλλησης, τα καρβίδια διαλύονται και παραμένουν κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης. Με αυτόν τον τρόπο η ζώνη αυτή αφήνεται ευάλωτη εάν το κράμα θερμανθεί εκ νέου σε μια θερμοκρασία όπου τα καρβίδια χρωμίου στα όρια των κρυστάλλων σχηματίζονται. Η αναθέρμανση για τη μείωση των τάσεων που έχουν αναπτυχθεί λόγω της συγκόλλησης είναι μια κοινή αιτία αυτού του προβλήματος. Με την απουσία της διαδικασίας της αναθέρμανσης, το κράμα δεν θα κινδύνευε απέναντι σε επιθέσεις περικρυσταλλικής διάβρωσης.

Διάβρωση αποφλοίωσης (Exfoliation corrosion)

Η διάβρωση αποφλοίωσης είναι μια ακόμα μορφή περικρυσταλλικής διάβρωσης που συνδέεται με τα κράματα αργιλίου υψηλής αντοχής. Κράματα που έχουν εξωθηθεί ή



Σχήμα 2.14 Ευαισθητοποίηση του ανοξείδωτου χάλυβα στις περιοχές συγκόλλησης λόγω υψηλής θερμότητας.

ειδάλλως έχουν επεξεργαστεί βαριά, με μια μικροδομή από επιμηκυμένους, ισιωμένους κρυστάλλους, είναι ιδιαίτερα επιρρεπής σε αυτή τη μορφή ζημίας. Τα προϊόντα της διάβρωσης που συσσωρεύονται κατά μήκος των ορίων των κρυστάλλων, ασκούν υψηλή πίεση στους κρυστάλλους οδηγώντας σε φαινόμενα ανύψωσης. Το πρόβλημα συχνά αρχίζει από τους ακριανούς κρυστάλλους και μπορεί να προχωρήσει σταδιακά μέσω ενός ολόκληρου τμήματος.

2.1.2 Παράγοντες διάβρωσης

Έξι σημαντικοί παράγοντες που οδηγούν στη διάβρωση εντοπίστηκαν μέσα στα πλαίσια μιας επιστημονικής εργασίας πάνω στη δυναμο-διάβρωση²⁸. Σύμφωνα με το μοντέλο του Staehle για την υποβάθμιση των υλικών, η δύναμη των υλικών είναι ποσοτικά προσδιορίσιμη, υπό τον όρο ότι όλες οι μεταβλητές που περιλαμβάνονται σε μια δεδομένη κατάσταση εντοπίζονται κατάλληλα και οι αλληλεπιδράσεις τους στο σύστημα γίνονται κατανοητές. Για τον χαρακτηρισμό της έκτασης της εργο-διάβρωσης οι παράγοντες ήταν το υλικό, το περιβάλλον, η πίεση, η γεωμετρία, η θερμοκρασία και ο χρόνος. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν την έκταση αυτής της μορφής διάβρωσης.

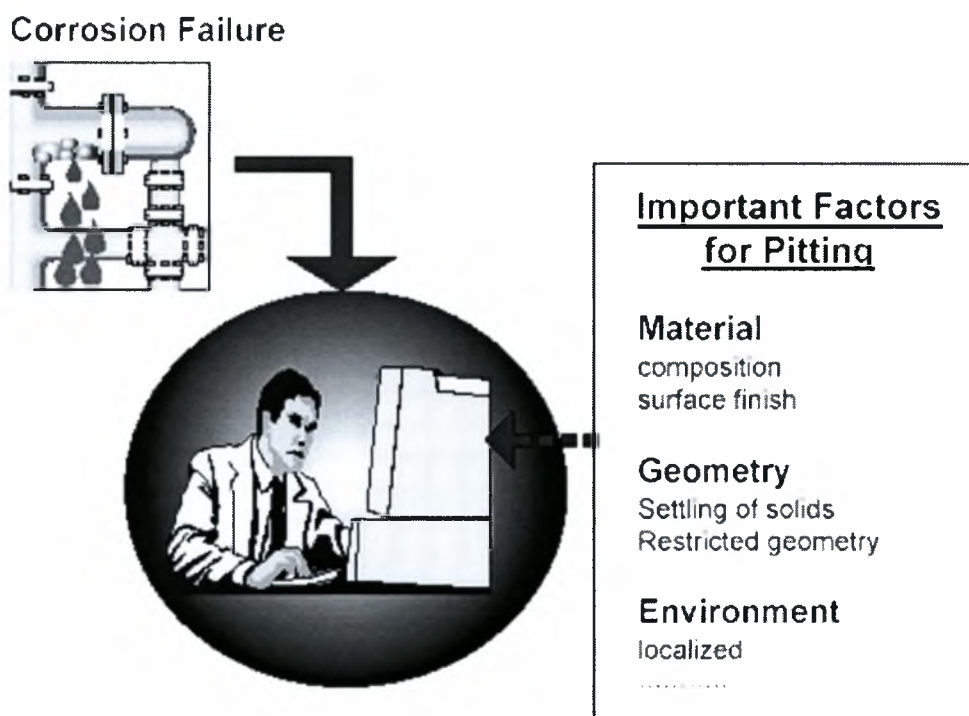
Θεωρείται εξαιρετικά χρήσιμο για τις αστοχίες λόγω διάβρωσης η υποβολή εκθέσεων και η αποθήκευση των πληροφοριών και των στοιχείων κατά τρόπο πλήρη και συστηματικό. Ένας εμπειρικός συσχετισμός καθιερώθηκε μεταξύ των παραγόντων και των μορφών διάβρωσης που περιγράφηκαν παραπάνω.

Η χρησιμότητα αυτού του εμπειρικού συσχετισμού μεταξύ της ορατής πτυχής ενός προβλήματος διάβρωσης και των εγγενών πρωταρχικών αιτιών της δεν έχει χρησιμοποιηθεί πλήρως ακόμα. Θεωρείται ότι ένα τέτοιο εργαλείο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν

1. *Οδηγός για τους καινούριους ερευνητές.* Ο προσδιορισμός των σημαντικότερων παραγόντων που συνδέονται με τις διάφορες μορφές διάβρωσης θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό οδηγό για τους καινούριους ερευνητές. Πολλοί ερευνητές δεν είναι ειδικοί απέναντι σε φαινόμενα διάβρωσης και θα βοηθηθούν αρκετά από ένα τέτοιο οδηγό. Μια λίστα από τους πιο σημαντικούς παράγοντες θα εξασφάλιζε ότι μηχανικοί ακόμα και ερευνητές με ελάχιστη ή καμία κατάρτιση σε θέματα διάβρωσης θα ήταν ενήμεροι για την πολυπλοκότητα και το πλήθος των μεταβλητών που λαμβάνουν μέρος στις επιθέσεις διάβρωσης.

2. *Χρήση σαν πρότυπο υποβολής αναφορών.* Όταν όλα τα στοιχεία που έχουν σχέση με τη διάβρωση συγκεντρωθούν, το πλαίσιο των παραγόντων και των μορφών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση των στοιχείων στις ψηφιακές βάσεις δεδομένων όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.15. Η αξία τέτοιων βάσεων δεδομένων θα είναι μικρή εάν οι πληροφορίες δεν αποθηκεύονται κατά τρόπο συνεπή, κάνοντας την ανάκτηση των σχετικών πληροφοριών μια εφιαλτική εμπειρία.

Η ανάλυση πολυάριθμων αναφορών για συγκεκριμένες αστοχίες λόγω διάβρωσης έχει αναδείξει το πρόβλημα της έλλειψης πληροφοριών για σημαντικές μεταβλητές του συστήματος²⁹. Η παράλειψη των σημαντικών πληροφοριών από τις εκθέσεις διάβρωσης δεν αποτελεί πάντα παράλειψη του συντάκτη. Σε πολλές περιπτώσεις, οι ζητούμενες πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες.



Σχήμα 2.15 Συσχέτιση μορφής-παράγοντα διάβρωσης στην καταχώρηση βάσης δεδομένων.

2.1.3 Διαφοροποίηση ανάμεσα στους μηχανισμούς διάβρωσης και στα αίτια εμφάνισής της.

Μια άποψη είναι ότι η επιστημονική προσέγγιση στην ανάλυση της αστοχίας είναι η λεπτομερής μηχανιστική μελέτη "από κάτω προς τα επάνω". Πολλές αναλύσεις είναι γραμμένες με αυτόν τον τρόπο. Το υλικό που έχει αστοχήσει αναλύεται στο εργαστήριο με ειδικές τεχνικές και τον απαραίτητο εξοπλισμό. Χημική ανάλυση, σκληρομέτρηση, μεταλλογραφία, οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία, χρήση ακτίνων X και η ανάλυση της επιφάνειας είναι τα στοιχεία αυτής της προσέγγισης. Στο τέλος όλων αυτών των αναλυτικών διαδικασιών, ο μηχανισμός της αστοχίας, όπως για παράδειγμα "περικρυσταλλική δυναμο-διάβρωση παρουσία χλωριδίων,"

μπορεί να εκτιμηθεί με ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό βεβαιότητας από έναν έμπειρο ερευνητή.

Εντούτοις, η προσέγγιση αυτή παρέχει μόνο ελάχιστες ή καμία πληροφορία για τα αίτια της αστοχίας. Ελλοχεύουσες αιτίες σοβαρής ζημίας λόγω διάβρωσης περιλαμβάνει τους ανθρώπινους παράγοντες όπως η μη ανίχνευση της διάβρωσης, ανεπαρκής εκπαίδευση, και έλλειψη επικοινωνίας. Περαιτέρω αιτίες μπορούν να περιλαμβάνουν ελλιπές πρόγραμμα συντήρησης, ανεπαρκείς επισκευές που αποβλέπουν στο άμεσο κέρδος, προβληματικά ανταλλακτικά, λανθασμένη επιλογή υλικών κ.ά.. Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτό ότι με την ύπαρξη ενός και μόνο μηχανισμού διάβρωσης, τα αίτια της αστοχίας μπορεί να είναι πολύ περισσότερα. Προφανώς, μια ενδελεχής έρευνα η οποία δίνει πληροφορίες για τα αίτια της αστοχίας είναι πολύ πιο χρήσιμη από μια αντίστοιχη έρευνα που καταδεικνύει απλά τους μηχανισμούς της διάβρωσης. Η εύρεση των πραγματικών αιτιών της διάβρωσης (τα οποία συχνά σχετίζονται με την ανθρώπινη συμπεριφορά) είναι πολύ πιο δύσκολο από τον απλό εντοπισμό των μηχανισμών διάβρωσης. Ανησυχία προκαλεί το γεγονός ότι σε πολλές τεχνικές αναφορές, τα αίτια και οι μηχανισμοί της διάβρωσης χρησιμοποιούνται συχνά με λανθασμένο τρόπο. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτού του προβλήματος παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια μιας έρευνας σε μια βάση δεδομένων.³⁰

Σημαντική είναι η συμβολή του Hoar ο οποίος επισήμανε την αξία του προληπτικού ελέγχου ακόμα και στα μικρά συστατικά ενός συστήματος, γεγονός που θα οδηγήσει στην εξοικονόμηση μεγάλου ποσού χρημάτων λόγω της επίδρασης που μπορεί να έχουν ακόμα και αυτά τα μικρά συστατικά σε ολόκληρο το σύστημα.³

2.2 Πρόληψη της διάβρωσης

Η αναγνώριση των μηχανισμών διάβρωσης αποτελεί σημαντικό βήμα στην προσπάθεια εύρεσης κάποιας λύσης. Υπάρχουν πέντε μέθοδοι πρόληψης της διάβρωσης:

- Χρήση ενός πιο κατάλληλου υλικού
- Αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος
- Χρήση αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων

- Η επιβολή καθοδικής ή ανοδικής προστασίας
- Σχεδιαστικές αλλαγές στο σύστημα ή στα συστατικά του

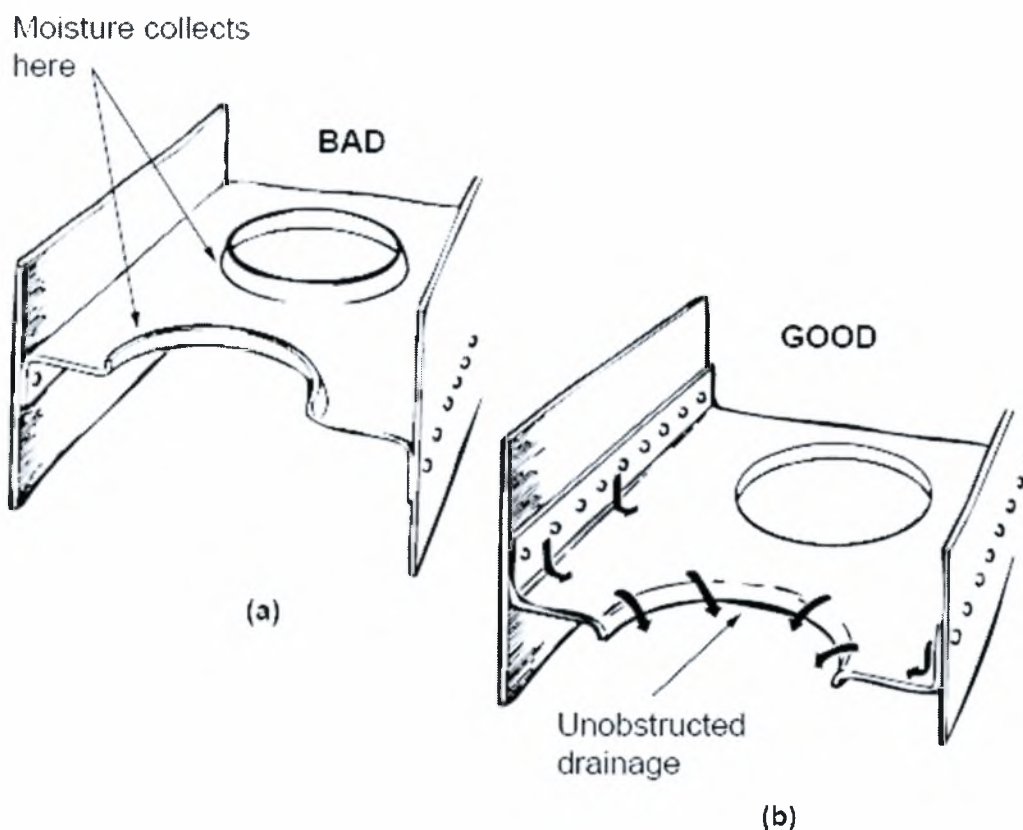
Κάποια προληπτικά μέτρα είναι αποτελεσματικά απέναντι στην πλειοψηφία των μορφών της διάβρωσης. Τα μέτρα αυτά βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στο στάδιο του σχεδιασμού, ίσως το πιο σημαντικό στάδιο στο θέμα της πρόληψης της διάβρωσης. Ωστόσο δεν πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή μόνο στο επίπεδο του σχεδιασμού θεωρώντας ότι οι σχεδιαστικές “λεπτομέρειες” αποτελούν το μόνο σημαντικό παράγοντα στη διασφάλιση της μακροχρόνιας αντιδιαβρωτικής προστασίας. Μια ευρύτερα αποδεκτή πρακτική είναι

- Ο επαρκής αερισμός και δυνατότητα απορροής για την αποφυγή δημιουργίας συμπυκνωμάτων (σχήμα 2.16)
- Αποφυγή κλειστών επιφανειών όπου η απορροή είναι ανεπαρκής
- Αποφυγή απορροφητικών υλικών (όπως ο αμίαντος) σε επαφή με μεταλλικές επιφάνειες
- Κατάλληλη προετοιμασία των επιφανειών κυρίως με τη χρήση ανάλογων αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων
- Εύκολη πρόσβαση για έλεγχο και συντήρηση

Επίσης, κατάλληλα προληπτικά μέτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης διάβρωσης ανάλογα με τις διάφορες μορφές της.

2.2.1 Ομοιόμορφη Διάβρωση (Uniform corrosion)

Η εφαρμογή αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων, η καθοδική προστασία, η προσεχτική επιλογή του υλικού και η χρήση ανασταλτικών παραγόντων διάβρωσης συνήθως προλαμβάνουν την εκδήλωση ομοιόμορφης διάβρωσης. Σε μερικές περιπτώσεις οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνδυαστικά. Σε περιπτώσεις υπόγειων σωληνώσεων η κύρια μέθοδος προστασίας παρέχεται με τη χρήση οργανικής επίστρωσης σε συνδυασμό με καθοδική προστασία η οποία χρησιμοποιείται για την περαιτέρω προστασία του συστήματος.



Σχήμα 2.16 Αερισμός και αποφυγή δημιουργίας συμπυκνωμάτων.

2.2.2 Γαλβανική Διάβρωση (Galvanic corrosion)

Για τον έλεγχο της γαλβανικής διάβρωσης, υλικά με παρόμοια τάση διάβρωσης σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Η χρήση μόνωσης θεωρείται απαραίτητη ανάμεσα στα υλικά που δεν πληρούν τις προϋποθέσεις (σχήμα 2.17), αλλά αυτό δεν είναι πάντα πρακτικό. Η χρήση επιστρώσεων στο μέταλλο με τον “ανοδικό” χαρακτήρα δεν συνιστάται αφού μπορεί να οδηγήσει σε καταστρεπτικά αποτελέσματα. Είναι προτιμότερη η χρήση επίστρωσης στην καθοδική επιφάνεια του συστήματος. Ένα παράδειγμα αστοχίας μιας δεξαμενής σαν αποτέλεσμα χρήσης επίστρωσης στα χαλύβδινα πλευρικά τοιχώματα (άνοδος) και στην ανοξειδωτή επιφάνεια του πυθμένα (κάθοδος) περιγράφεται από τον Fontana¹⁶. Αν η χρήση μη κατάλληλων μετάλλων κρίνεται αναγκαία, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της εύκολης αντικατάστασης των ανοδικών μερών του συστήματος.

2.2.3 Τρηματική διάβρωση (Pitting)

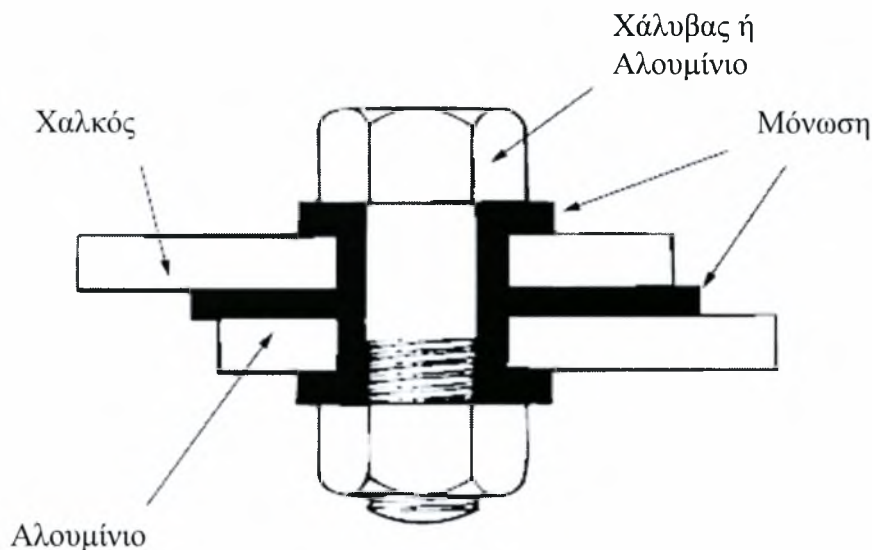
Η κατάλληλη επιλογή υλικού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης αυτής της μορφής διάβρωσης. Για παράδειγμα η αντίσταση του ωστενιτικού χάλυβα σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση χλωριδίων είναι καλύτερη σε κράματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε μολυβδαίνιο. Κατά συνέπεια, ο χάλυβας 317 παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα από το κράμα 316, το οποίο είναι πιο ανθεκτικό από το αντίστοιχο 304. Ο ακόλουθος δείκτης διάβρωσης έχει προταθεί για την πρόβλεψη της αντίστασης στη διάβρωση των ωστενιτικών και των διπλών ανοξειδωτων χαλύβων, σχέση που δεν ισχύει για τους φερρικούς χάλυβες.

$$PI = Cr + 3.3Mo + xN$$

όπου Cr, Mo, και N = το χρώμιο, το μολυβδαίνιο, και η περιεκτικότητα σε άζωτο, το $\chi = 16$ για το διπλό ανοξειδωτο χάλυβα, και το $\chi = 30$ για τα ωστενιτικά κράματα. Γενικά, ο κίνδυνος διάβρωσης αυξάνεται κάτω από στάσιμες συνθήκες, όπου τα διαβρωτικά "μικροπεριβάλλοντα" παραμένουν στην επιφάνεια. Η ξήρανση και ο εξαερισμός μπορούν να αποτρέψουν αυτήν την συσσώρευση του στάσιμου ηλεκτρολύτη στο κατώτερο σημείο των σωληνώσεων, των δεξαμενών κ.α.. Μια αναταραχή μπορεί επίσης να αποτρέψει τη συγκέντρωση των τοπικών -ιδιαίτερα διαβρωτικών- συνθηκών. Η χρήση της καθοδικής προστασίας μπορεί να εξεταστεί σαν λύση για αυτή τη μορφή διάβρωσης, αλλά η ανοδική προστασία είναι γενικά ακατάλληλη. Οι αλλαγές στο περιβάλλον όπως η εξαέρωση, η ιονική αφαίρεση των χλωριδίων, και η προσθήκη των ανασταλτικών παραγόντων διάβρωσης μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο. Επιπλέον, εάν η διαβρωτική επίθεση δεν αποτραπεί πλήρως μέσω της χρήσης των ανασταλτικών παραγόντων διάβρωσης, η διεύδυση μπορεί πραγματικά να επιταχυνθεί λόγω της συγκέντρωσης μετάλλου (σαν αποτέλεσμα της διαβρωτικής δράσης) σε μια μικρή περιοχή.

2.2.4 Διάβρωση εγκοπών (Crevice corrosion)

Όποτε είναι δυνατόν, οι συνθήκες που προκαλούν αυτού του είδους τη διάβρωση θα πρέπει γενικά να αποφεύγονται. Στους εναλλάκτες θερμότητας, οι ενώσεις των σωληνώσεων αποτελούν ένα συχνό στόχο αυτής της μορφής διάβρωσης. Οι επιβλαβείς επικαθίσεις μπορούν να απομακρυνθούν με καθαρισμό. Η διήθηση μπορεί



Σχήμα 2.17 Μόνωση δυο ανόμοιων μετάλλων για προστασία από τη γαλβανική διάβρωση

να περιορίσει τα στερεά διαλύματα τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν ιδανικές συνθήκες για την εμφάνιση διάβρωσης. Στις περιπτώσεις που είναι αναγκαία η χρήση μονωτικών υλικών, η χρήση μη απορροφητικών υλικών όπως το τεφλόν παρουσιάζεται σαν η πιο κατάλληλη. Η καθοδική προστασία μπορεί να είναι αποτελεσματική στην παρεμπόδιση της ρωγμώδους διάβρωσης, αλλά η ανοδική προστασία είναι γενικά ακατάλληλη. Οι αλλαγές στο περιβάλλον δεν είναι συνήθως αποτελεσματικές μετά την έναρξη της διάβρωσης επειδή το διαβρωτικό "μικροπεριβάλλον" που έχει αναπτυχθεί μέσα στη ρωγμή δεν επηρεάζεται εύκολα.

2.2.5 Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion)

Η ευαισθησία των κραμάτων απέναντι στην περικρυσταλλική διάβρωση μπορεί να αντιμετωπιστεί με θερμική κατεργασία.. Στον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, η υψηλή θερμοκρασία ανόπτησης –γύρω στους 1100°C- που ακολουθείται από γρήγορη ψύξη μπορεί να οδηγήσει στην ικανότητα αντίστασης απέναντι στην περικρυσταλλική διάβρωση. Γενικά τα κράματα που δέχονται θερμική επεξεργασία είναι λιγότερο ευπαθή απέναντι στην περικρυσταλλική διάβρωση. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και άζωτο καθώς και τα κράματα τιτανίου παρουσιάζουν μια μορφή ανοσίας απέναντι σε αυτή τη μορφή διάβρωσης, με

εξαίρεση την ευαισθητοποίηση στις περιοχές συγκόλλησης. Οι ωστενιτικοί χάλυβες 304L και 316L με περιεκτικότητα σε άνθρακα κάτω από 0.03% χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία και συνιστούνται όπου απαιτείται συγκόλληση σχετικά παχιών τμημάτων.

Για τα κράματα αλουμινίου ενδείκνυται η αποφυγή της έκθεσης της μικρής σχετικά περικρυσταλλικής δομής. Η χρήση προστατευτικών φιλμ μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο περικρυσταλλικής διάβρωσης.

2.2.6 Εκλεκτική διύλιση (Selective leaching)

Η εκλεκτική διύλιση ελέγχεται συνήθως από επιλογή των κατάλληλων υλικών. Παραδείγματος χάριν, ο ορείχαλκος είναι ανθεκτικός στην αποψευδαργυροποίηση εάν ιχνοστοιχεία αρσενικού ή φωσφόρου προστεθούν στο κράμα. Τα σύγχρονα υλικά των υδραυλικών εγκαταστάσεων γίνονται αποκλειστικά από μόνο από αυτά τα κράματα. Ο ορείχαλκος με μια χαμηλή περιεκτικότητα σε Zn τείνει γενικά να είναι λιγότερο ευαίσθητος. Στα πιο διαβρωτικά περιβάλλοντα η χρήση των κραμάτων νικελίου θεωρείται ενδεδειγμένη.

2.2.7 Διάβρωση λόγω εκτριβής (Erosion corrosion)

Η επιλογή κατάλληλων υλικών αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα στην ελαχιστοποίηση της διάβρωσης. Απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της διάβρωσης βάσει της σκληρότητας. Η υψηλή σκληρότητα σε ένα υλικό δεν εγγυάται απαραίτητως έναν υψηλό βαθμό αντίστασης στη διάβρωση.

Τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικά. Είναι γενικά επιθυμητό να μειωθεί η ταχύτητα του ρευστού και να αναπτυχθεί στρωτή ροή. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζεται χρήσιμη η αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων. Οι τραχιές επιφάνειες είναι γενικά ανεπιθύμητες. Σχέδια που δημιουργούν περιορισμούς στη ροή είναι ανεπιθύμητα. Οι απότομες αλλαγές στην κατεύθυνση της ροής πρέπει να αποφευχθούν. Οι ενώσεις των σωληνώσεων καθώς και τα σημεία όπου υπάρχουν μονωτικά υλικά όπως φλάντζες, θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν προσεκτικά ενώ το πάχος των ευάλωτων περιοχών θα πρέπει να αυξηθεί.

Οι αλλαγές που μπορούν να γίνουν στο περιβάλλον μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο της διάβρωσης. Τα επικίνδυνα συστατικά στα ρευστά μπορούν να απομακρυνθούν με διήθηση ενώ παγίδες νερού και ατμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του κινδύνου διάδοσης της διάβρωσης μέσω των σταγονιδίων. Οι ανασταλτικοί παράγοντες διάβρωσης είναι ένα επιπρόσθετο μέτρο που μπορεί να ληφθεί. Η καθοδική προστασία και η χρήση αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων μπορεί να οδηγήσουν στη μείωση του φαινομένου.

Για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου δημιουργίας κοιλοτήτων, θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι υδροδυναμικές πιέσεις, σχεδιασμός για την αποφυγή της πτώσης πίεσης κάτω από την πίεση ατμού του υγρού, η πρόληψη της εισόδου αέρα, η χρήση κατάλληλων επιστρώσεων και η καθοδική προστασία.

2.2.8 Εργο-διάβρωση (Stress corrosion cracking)

Η χρησιμοποίηση υλικών που παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα απέναντι στη δυναμο-διάβρωση αποτελεί ένα βασικό μέτρο. Οι αλλαγές που μπορούν να γίνουν στο περιβάλλον (αφαίρεση των επικίνδυνων στοιχείων, προσθήκη ανασταλτικών παραγόντων διάβρωσης) αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό μέτρο πρόληψης. Σε γενικό επίπεδο, μειωμένα επίπεδα πίεσης αποτρέπουν την εμφάνιση αυτής της μορφής διάβρωσης. Στην πραγματικότητα όμως, η διατήρηση των τάσεων που αναπτύσσονται κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο είναι αρκετά δύσκολο. Η χρήση θερμικών κατεργασιών δεν εξαλείφει το πρόβλημα. Επιπλέον η παρουσία των προϊόντων της διάβρωσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της τάσης.

Σημαντικές προσπάθειες γίνονται ακόμα και σήμερα για τον εντοπισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την εμφάνιση ρωγμών. Για το λόγο αυτό εμπειρικές σχέσεις εμφανίστηκαν σαν αποτέλεσμα εργαστηριακών δοκιμών. Η παρακάτω σχέση, για παράδειγμα, συνοψίζει τα αποτελέσματα της διαφορετικής σύστασης των κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αντίσταση των φερριτικών χαλύβων που εκτέθηκαν σε διάλυμα 8.75N-NaOH κατά τη διάρκεια δοκιμών πίεσης.³² Ο δείκτης εργο-διάβρωσης σε αυτό το περιβάλλον (SCI_{OH}) καταδεικνύει τα ευεργετικά (-) ή τα επιβλαβή (+) αποτελέσματα των συστατικών των κραμάτων (σε %) όταν οι χάλυβες έρχονται σε επαφή με ένα τόσο καυστικό περιβάλλον.

$$SCI_{OH} = 105 - 45C - 40Mn - 13.7Ni - 12.3Cr$$



Η βέλτιστη επιλογή ενός χάλυβα για μια ιδιαίτερη εφαρμογή πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη παρόμοιες εκφράσεις, οι οποίες παρουσιάζουν τη διαβρωτική ικανότητα του περιβάλλοντος ως λειτουργία της μεταλλουργικής σύνθεσης και δομής. Αλλά άλλες πρακτικές εκτιμήσεις όπως η διαθεσιμότητα των υλικών, η ικανότητα συντήρησης καθώς και οικονομικοί λόγοι δεν επιτρέπουν πάντα την επιλογή του καταλληλότερου κράματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις η χρήση αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων, καθοδική προστασία και άλλα προστατευτικά μέτρα που θα διασφαλίζουν την καλή λειτουργία θα πρέπει να εφαρμοσθούν. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η πρόκληση ζημιών που δεν έχουν προβλεφθεί και οι οποίες μπορούν να αλλάξουν τοπικά την κατανομή των πιέσεων σε ένα μεταλλικό συστατικό ή μπορεί να καταστρέψουν ένα μέρος από τα προστατευτικά μέτρα που έχουν ήδη ληφθεί.

Η ανισοτροπία της μικροδομής αποτελεί μια σημαντική μεταβλητή για την περίπτωση της εργο-διάβρωσης και ιδιαίτερα στα κράματα αλουμινίου. Η ανάπτυξη κάθετων τάσεων θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Η χρήση καθοδικής προστασίας σε περιπτώσεις εργο-διάβρωσης όπου παίρνει μέρος και το φαινόμενο της “ψαθυροποίησης” λόγω απορρόφησης υδρογόνου χαρακτηρίζεται σαν άσκοπη αφού το νέο μέσο θα επιταχύνει τη ζημιά λόγω του δεύτερου φαινομένου.

2.3 Ανάλυση αστοχίας λόγω διάβρωσης με συμβολή στοιχείων από το παρελθόν

Τα περισσότερα περιστατικά αστοχίας λόγω διάβρωσης δεν είναι μοναδικά στη φύση. Για οποιαδήποτε δεδομένη αποτυχία, είναι πιθανό ότι ένα παρόμοιο πρόβλημα έχει αντιμετωπιστεί και έχει λυθεί στο παρελθόν. Οι εν ενεργεία ερευνητές στηρίζονται σε μεγάλο ποσοστό στην εμπειρία τους από προηγούμενες περιπτώσεις. Ένας αριθμός από έγγραφες πηγές αποκαλύπτει παραδείγματα ζημιών λόγω διάβρωσης κατά το παρελθόν.^{17,33} Ερευνητές διαφορετικής εμπειρίας συχνά συμβουλευονται τέτοιου είδους πηγές. Η μελέτη παλαιότερων περιστατικών μπορεί -σε πολλές περιπτώσεις- να ελαχιστοποιήσει την εργαστηριακή δουλειά και την πραγματοποίηση πειραμάτων.

Μια συλλογή τεκμηριωμένων περιστατικών διάβρωσης δίνει ένα τεράστιο πλεονέκτημα. Ωστόσο, η ανάκτηση των απαραίτητων πληροφοριών από τέτοιου είδους πηγές μπορεί να αποδειχθεί κουραστικό και χρονοβόρο. Εκατοντάδες

αναλύσεις ολοκληρώνονται κάθε χρόνο από μια ομάδα ερευνητών και χιλιάδες παρόμοιων αναφορών αποθηκεύονται σε αρχεία χωρίς την ύπαρξη του απαραίτητου εξοπλισμού ο οποίος θα επέτρεπε την εύκολη εύρεση των απαραίτητων πληροφοριών. Η ελλιπής ικανότητα διαχείρισης μιας τόσο μεγάλης τράπεζας δεδομένων καταγεγραμμένων σε χαρτί μπορεί μερικές φορές να αντισταθμιστεί από τη σε βάθος έρευνα των διαθέσιμων πληροφοριών. Για παράδειγμα, μια έρευνα για αναφορές αστοχίας του μηχανισμού πέδησης των αεροσκαφών της πολεμικής αεροπορίας του Καναδά αποκάλυψε 200 παρόμοια περιστατικά στα προηγούμενα 25 χρόνια.³⁴ Η έρευνα ήταν επιτυχής σε ό,τι αφορά τον προσδιορισμό του κύριου μηχανισμού που οδήγησε στην αστοχία καθώς και την ταξινόμηση της σοβαρότητας των αιτιών που οδήγησαν σε αυτή όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2. Ωστόσο η ανάγκη εύρεσης τρόπων για την επανάκτηση των αποθηκευμένων πληροφοριών δεν καλύπτεται από τέτοιου είδους έρευνες.

Πίνακας 2.2 Ταξινόμηση της σοβαρότητας των αιτιών που οδήγησαν σε αστοχία του μηχανισμού πέδησης των αεροσκαφών της πολεμικής αεροπορίας του Καναδά

Mechanisms-Causes	Design	Material selection	Manufacturing	Field maintenance
Overload		8	4	13
Fatigue	59	22	65	24
Cosmetic pitting	3	6	2	6
SCC	7	34	7	6
Structural pitting	22	17	6	41
Wear	9			10
False call		13	16	

3

Πειράματα διάβρωσης - Το πείραμα της αλατονέφωσης

Οι ευρύτερες επιπτώσεις των φαινομένων της διάβρωσης σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος αντιμετώπισής τους οδήγησε στην επιτακτική ανάγκη για κατανόηση των μηχανισμών διάβρωσης και πρόληψης των αρνητικών αποτελεσμάτων της δράσης τους. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, η επιστημονική κοινότητα οδηγήθηκε στην ανάπτυξη πειραμάτων ικανών να δώσουν τις απαραίτητες πληροφορίες. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των διαφόρων πειραμάτων διάβρωσης, με ιδιαίτερη έμφαση στη δοκιμή της αλατονέφωσης, τη λειτουργία και τη σημασία της.

3.1 Πειράματα διάβρωσης

Η επιβολή πειραμάτων διάβρωσης μπορεί σε οδηγήσει σε χρήσιμες πληροφορίες σε πολλούς τομείς όπως η ανάπτυξη νέων υλικών και επιστρώσεων καθώς και η επιλογή των κατάλληλων μεθόδων προστασίας τόσο για τα καινούργια, όσο και για τα παλιά συστήματα. Τα πειράματα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ανοχής του μετάλλου απέναντι στη διάβρωση είναι συγκεκριμένα και θα πρέπει να βασίζονται στις συνθήκες που επικρατούν στα εκάστοτε συστήματα και τις εφαρμογές τους. Ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά της διάβρωσης και επομένως δεν υπάρχει μόνο ένα πείραμα διάβρωσης. Η πιο αξιόπιστη πηγή για τη συμπεριφορά της διάβρωσης είναι τα περιστατικά του παρελθόντος. Ωστόσο, οι αναγκαίες πληροφορίες είναι σπάνια διαθέσιμες γεγονός που καθιστά απαραίτητη την υποβολή των υλικών σε άλλα πειράματα. Η ανάγκη αυτή για

αναζήτηση πληροφοριών πέρα από τα διαθέσιμα στοιχεία από παρόμοιες καταστάσεις του παρελθόντος εισάγει την αβεβαιότητα στα πειράματα διάβρωσης.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές των υλικών, η γνώση της συμπεριφοράς του εκάστοτε υλικού απέναντι στη διάβρωση είναι καταλυτικής σημασίας για την επιλογή των κατάλληλων υλικών. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να αντληθούν μέσα από τη μακροχρόνια λειτουργία των συγκεκριμένων υλικών κατά το παρελθόν σε ανάλογες συνθήκες καθώς και από την υποβολή τους σε πειράματα διάβρωσης.³⁶ Ωστόσο, επειδή οι μηχανισμοί της διάβρωσης επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, τα πειράματα διάβρωσης μπορεί να κρύβουν πολλές παγίδες. Συχνά τα πειράματα σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ερευνήσουν συγκεκριμένες μορφές διάβρωσης που εμφανίζονται ή συγκεκριμένες εφαρμογές.

Τα πειράματα διάβρωσης αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για μια πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών οι οποίες μπορούν να αλλάζουν συνέχεια κατά τη διάρκεια ζωής ενός συστήματος. Σε μερικές εφαρμογές, τα υλικά που έχουν επιλεγεί μπορεί να αποτελούν τη βέλτιστη λύση για τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Ωστόσο, μια ακούσια μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας μπορεί πολύ εύκολα να αυξήσει την πιθανότητα διάβρωσης του συστήματος. Για την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων μέσα από τα πειράματα, η γνώση του περιβάλλοντος και των ακριβών συνθηκών λειτουργίας είναι απαραίτητη. Σε πολλές περιπτώσεις η ποιότητα του νερού στα διάφορα σημεία ενός εργοστασίου, κάτω από φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, διαφέρει από την ποιότητα του νερού στην είσοδο του συστήματος. Για το “στήσιμο” ρεαλιστικών πειραμάτων, τέτοιου είδους μεταβολές θα πρέπει να συνυπολογιστούν.

Μερικοί από τους παράγοντες που οδηγούν σε διάβρωση μπορούν να αναπαραχθούν σχετικά εύκολα με τη δημιουργία μιας κατάστασης ευνοϊκής για αυτούς. Εντούτοις, άλλοι παράγοντες εξαρτώνται εξ ολοκλήρου από την ανάπτυξη τοπικών ατελειών που γίνονται συχνά ορατές μόνο μετά μεγάλες και ιδιαίτερα μεταβλητές περιόδους έκθεσης, όπως στο πείραμα αλατονέφωσης που είναι ευρύτερα γνωστό σαν ASTM B117. Όταν ένα πείραμα προγραμματίζεται, πολλοί παράγοντες πρέπει να εξεταστούν. Ο ακόλουθος κατάλογος απαριθμεί μερικές από τις πιο κοινές παραμέτρους για το στήσιμο ενός πειράματος:³⁷

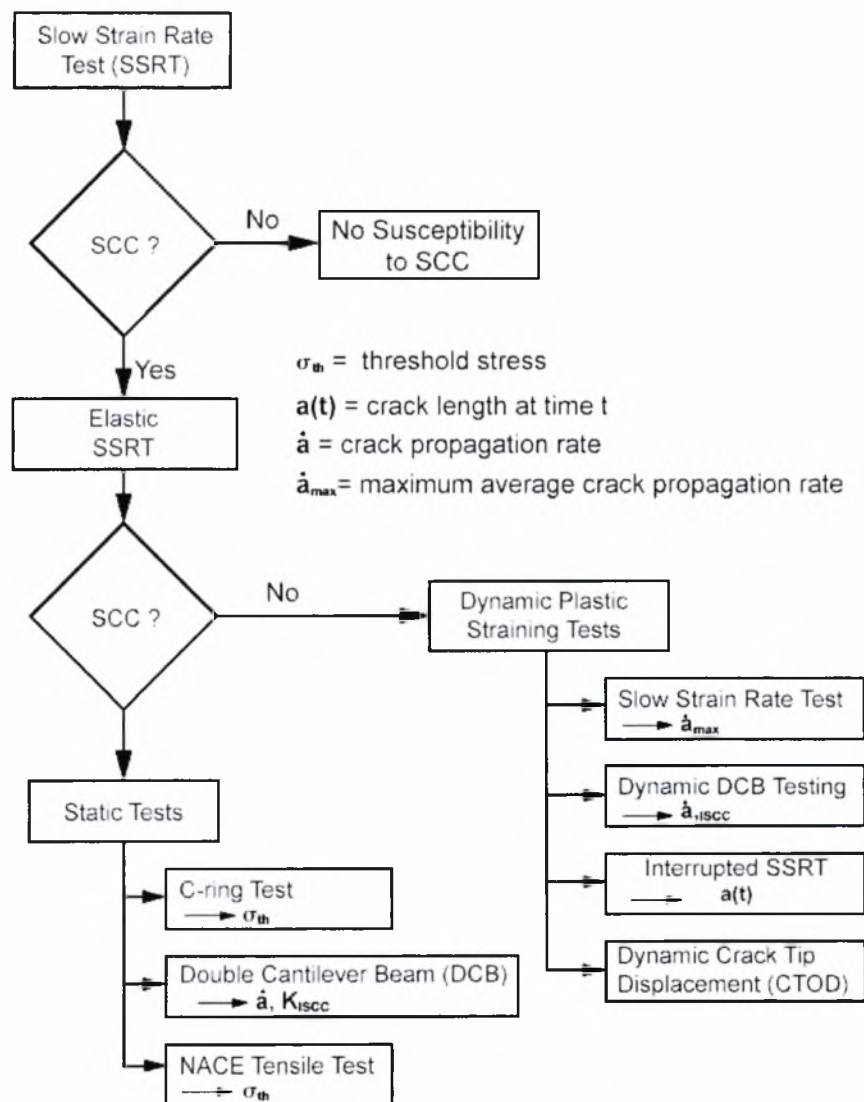
- Ποιος είναι ο στόχος του πειράματος;
- Πώς θα πρέπει να ερμηνευθούν τα αποτελέσματα;
- Πώς μπορεί οι πληροφορίες να ενσωματωθούν με προηγούμενα ή άλλα πειράματα;
- Πόσα δοκίμια είναι διαθέσιμα;
- Πόσοι παράγοντες επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δοκιμίων;
- Πόσοι από αυτούς τους παράγοντες θα συμπεριληφθούν στο πείραμα;
- Ποιοι από αυτούς τους παράγοντες αλληλεπιδρούν και ποιοι από αυτούς παραμένουν ουδέτεροι;
- Ποιος τύπος στοιχείων πρόκειται να μετρηθεί;
- Είναι το δείγμα ομοιογενές;
- Πόσο αντιπροσωπευτικό είναι το δείγμα;
- Είναι τα πειράματα καταστρεπτικά;
- Πόσο κοστίζει το πείραμα και τα δοκίμια;
- Πόσο δύσκολος είναι ο συνυπολογισμός των ανθρώπινων σφαλμάτων στον προγραμματισμό του πειράματος;

Με έναν τόσο μακρύ κατάλογο ερωτήσεων και το συνεχώς αυξανόμενο αριθμό πειραματικών μεθόδων, παρουσιάζεται η ανάγκη για απλοποίηση των πειραματικών μεθόδων με τη θέσπιση μιας ενιαίας στρατηγικής η οποία θα αντιστοιχεί τις απαιτήσεις του πειράματος με τις κύριες παραμέτρους του. Το δένδροειδές διάγραμμα του σχήματος 3.1 έχει αναπτυχθεί για να διευκολύνει την επιλογή πειραμάτων με χάλυβες απέναντι στις διάφορες μορφές εργο-διάβρωσης (Stress-Corrosion-Cracking).³⁸

Οι στατιστικές μέθοδοι είναι ουσιαστικές για τον καθορισμό του βαθμού αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και τις αντίστοιχες προδιαγραφές των υλικών. Η αντοχή απέναντι στη διάβρωση είναι μόνο ένα από τα πολλά χαρακτηριστικά ενός υλικού. Μαζί με τις φυσικές και τις μηχανικές ιδιότητες, η αντοχή που παρουσιάζει ένα υλικό απέναντι στη διάβρωση καθορίζει τη δυνατότητα εφαρμογής ενός υλικού

για έναν συγκεκριμένο σκοπό. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να μετρηθούν και να καθοριστούν μέσα από πειράματα. Ωστόσο, αν και τα δεδομένα για τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, τα δεδομένα για την αντίσταση ενός υλικού απέναντι στη διάβρωση παρουσιάζονται συνήθως με ένα περιγραφικό ή ποιοτικό τρόπο κάνοντας έτσι δύσκολη την αξιολόγησή τους.

Η έμφαση που δίνεται στο ατομικά χαρακτηριστικά ενός πειράματος και οι μέθοδοι αξιολόγησης για κάθε ένα από τα ζεύγη μετάλλου-περιβάλλοντος δεν αποκλείουν τη δυνατότητα τυποποίησης των πειραματικών μεθόδων επειδή πολλές εφαρμογές είναι όμοιες ή παρόμοιες και οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται για ένα σύστημα μπορούν να βρουν εφαρμογή σε κάποιο άλλο.



Σχήμα 3.1 Δενδροειδές διάγραμμα για την επιλογή κατάλληλων πειραμάτων απέναντι στην ευαισθησία σε εργο-διάβρωση (SCC) των χαλύβων.

3.1.1 Πειράματα διάβρωσης και προδιαγραφές

Υπάρχει μια πληθώρα από οργανισμούς σε ολόκληρο τον κόσμο οι οποίοι ασχολούνται με την δημιουργία νέων πειραματικών μεθόδων και την παροχή προδιαγραφών σχετικών με τη γενική συμπεριφορά και την απόδοση των διάφορων υλικών. Με έτος ίδρυσης το 1898, η ASTM (American Society for Testing and Materials) αποτελεί σήμερα έναν από τους μεγαλύτερους οργανισμούς αυτού του είδους. Υπάρχουν 132 κύριες τεχνικές επιτροπές και κάθε μια από αυτές διαιρείται σε μικρότερες επιτροπές οι οποίες και αποτελούν τις σημαντικότερες μονάδες του οργανισμού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι μικρές αυτές επιτροπές έχουν τη μεγαλύτερη δυνατή εξειδίκευση για το ανάλογο πεδίο. Αυτές οι “υποομάδες” χωρίζονται σε ομάδες εργασίας. Η επιτροπή G-1, Διάβρωση Μετάλλων, υποδιαιρείται στις ακόλουθες μικρότερες επιτροπές:

G01.02	Ορολογία
G01.03	Εφαρμογές H/Y στη διάβρωση
G01.04	Ατμοσφαιρική διάβρωση
G01.05	Πειράματα διάβρωσης σε εργαστήρια
G01.06	Εργο-διάβρωση και κόπωση-διάβρωση
G01.07	Γαλβανική διάβρωση
G01.08	Διάβρωση των πυρηνικών υλικών
G01.09	Διάβρωση σε φυσικά ύδατα
G01.10	Διάβρωση στο έδαφος
G01.11	Ηλεκτροχημικές μετρήσεις στα πειράματα διάβρωσης
G01.12	Πειράματα διάβρωσης σε εργοστάσια
G01.14	Διάβρωση του ενισχυμένου χάλυβα
G01.91	Μόνιμη επιτροπή για αναθεωρήσεις εκδόσεων
G01.93	Μόνιμη επιτροπή για μελλοντικό προγραμματισμό
G01.95	Μόνιμη συμβουλευτική επιτροπή για θέματα ISO/ TC 156

G01.96	Μόνιμη επιτροπή για απονομή βραβείων
G01.97	Δημοσιότητα, συμπόσια και εργαστήρια
G01.99	Επιτροπή Διασύνδεσης
G01.99.01	Διάβρωση σε υλικά μοσχευμάτων

Εκτός από τις συχνές συνελεύσεις, η επιτροπή G-1 έχει υποστηρίξει έναν αριθμό από επιστημονικά συνέδρια που έχουν οδηγήσει στη δημοσίευση πάνω από 1300 ειδικών τεχνικών αναφορών. Επίσης, η επιτροπή G-1 έχει εκδώσει μερικές εκθέσεις γενικού ενδιαφέροντος οι οποίες συνοψίζουν τις σημαντικότερες πληροφορίες σχετικές με το θέμα των πειραμάτων διάβρωσης. Μια τέτοια έκδοση αποτελεί και το *Corrosion Tests and Standards*, μια πολύ σημαντική πηγή πληροφοριών για των σωστό προγραμματισμό των πειραμάτων διάβρωσης.³⁹ Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται σε εκείνη την δημοσίευση συνοψίζουν τις προσπάθειες πάνω από 400 εμπειρογνομόνων στον τομέα των πειραμάτων διάβρωσης και της αξιολόγησής τους (σχήμα 3.2).

Η ανάπτυξη εργαστηριακών πειραμάτων διάβρωσης θα πρέπει να βασίζεται πάνω σε ένα προκαθορισμένο παράγοντα διάβρωσης. Ακόμα και αν οι προτεινόμενες τεχνικές αναφέρονται στο σχεδιασμό του πειράματος ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις εμφάνισης των σημαντικότερων παραγόντων διάβρωσης, παραμένει σημαντική η ανάγκη για έρευνα της κινητικής που περιλαμβάνεται σε ένα πρόβλημα διάβρωσης για την πληρέστερη κατανόηση των μηχανισμών και των αιτιών της αστοχίας. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, περαιτέρω μελέτη χρειάζεται για την επίτευξη ρεαλιστικών πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης.⁴⁰

Όλες οι συμβατικές μέθοδοι διάβρωσης είναι χρονοβόρες και ακριβές. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες πειραμάτων διάβρωσης: α) εργαστηριακά, β) πειράματα σε φυσικά περιβάλλοντα (field testing) και γ) πειράματα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (service testing). Φυσικά, τα πειράματα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας παρέχουν τα περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα και ακολουθούν τα πειράματα σε φυσικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, τα πειράματα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και τα πειράματα σε φυσικά περιβάλλοντα έχουν περιορισμένες δυνατότητες για επιταχυνόμενη μορφή πειραμάτων. Τα

επιταχυνόμενα πειράματα γίνονται τόσο ρεαλιστικά όσο οι συνθήκες του πειράματος πλησιάζουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του προς εξέταση συστήματος. Για τον εντοπισμό των διαφόρων φαινομένων διάβρωσης σε κάθε σύστημα, άλλα πειράματα πρέπει να διεξαχθούν για τις διάφορες μορφές διάβρωσης όπως ομοιόμορφη διάβρωση, τρηματική διάβρωση, εργο-διάβρωση και διάβρωση εγκοπών. Υπάρχουν πολλές δημοσιευμένες προδιαγραφές σωστής λειτουργίας των διαφόρων πειραμάτων τόσο κατά ASTM, όσο και κατά ISO. Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει ενδεικτικά κάποια πειράματα ανάλογα με το περιβάλλον λειτουργίας του συστήματος.^{50,51}

Πίνακας 3.1 Πειραματικές μέθοδοι για διάφορα περιβάλλοντα κατά ASTM

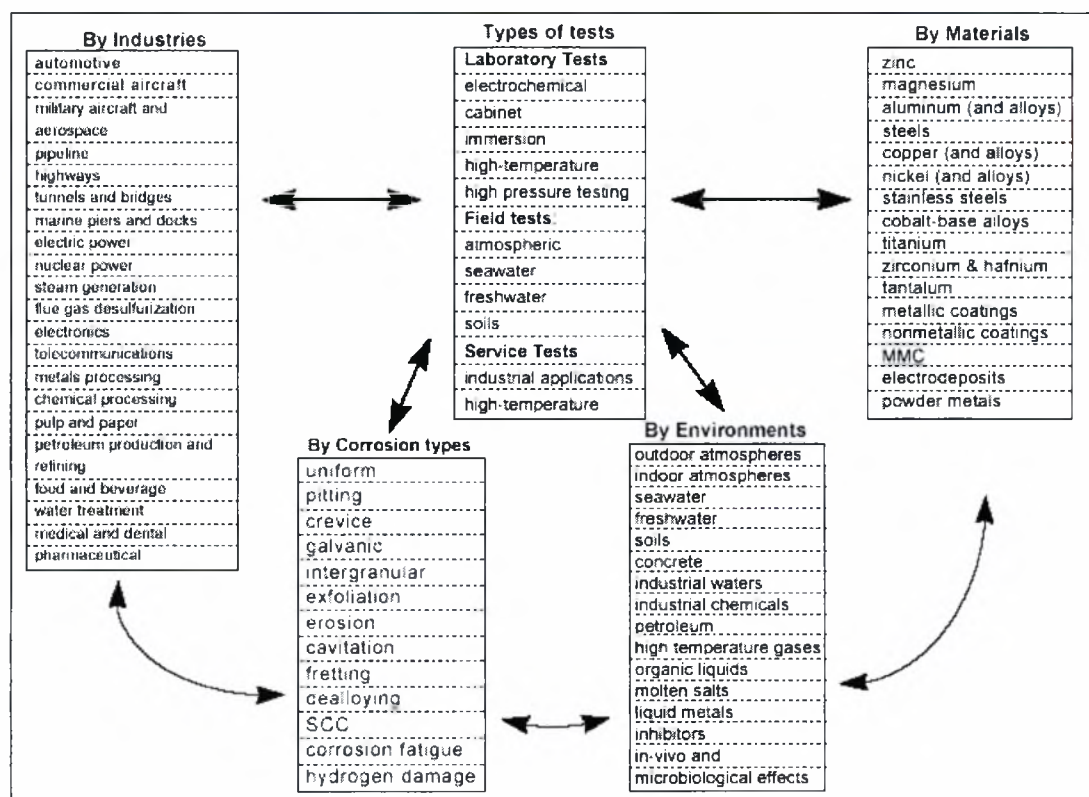
Environment causing corrosion	Types of Tests
Fresh Water	39 ASTM Standards
Seawater Environments	ASTM B117, Salt Spray, Fog Test (Oldest and Most Widely used Cabinet Test)
General Environments (e.g., atmospheric, galvanic)	ASTM G31 (Immersion Corrosion Testing), ASTM G50 (Atmospheric Corrosion Testing)

3.1.2 Εργαστηριακά Πειράματα

Πολλά από αυτά τα πειράματα γίνονται συνήθως για να παρέχουν βασικές πληροφορίες για ζητήματα διάβρωσης όπως ανάλυση αστοχίας, πρόληψη διάβρωσης και έλεγχος, αποδοχή της διασφάλισης ποιότητας, περιβαλλοντικά θέματα σχετικά με τη διάβρωση, κατασκευή νέων κραμάτων και νέων μεθόδων κατεργασίας. Τα εργαστηριακά πειράματα διάβρωσης διαιρούνται σε 4 κύριες κατηγορίες.

- πειράματα σε θαλάμους (cabinet tests)
- πειράματα βύθισης (immersion tests)
- πειράματα υψηλής πίεσης/θερμοκρασίας (high-pressure/high-temperature tests)
- ηλεκτροχημικά πειράματα (electrochemical tests)

Ενώ και οι τέσσερις αυτές κατηγορίες αντιπροσωπεύουν διαφορετικές συνθήκες διαδικασιών επιταχυνόμενης διάβρωσης, μόνο τα ηλεκτροχημικά πειράματα μπορούν να επιταχύνουν άμεσα τους μηχανισμούς των φαινομένων διάβρωσης. Για την κατανόηση του πώς μπορούν να “επιταχυνθούν” οι περιβαλλοντικές συνθήκες, είναι σημαντικό να αναφερθεί η πολυπλοκότητα αυτού του παράγοντα. Ένα σημαντικό σημείο για την περιγραφή του περιβάλλοντος είναι η διάκρισή του ανάμεσα σε “ονομαστικό” και “τοπικό” περιβάλλον. Γενικά, τα στοιχεία ενός συστήματος σχεδιάζονται για να αντέχουν στο “τοπικό” περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Το στήσιμο των πειραμάτων αυτών γίνεται με βάση αυτές τις προδιαγραφές. Οι σύγχρονες πειραματικές εφαρμογές αντικατοπτρίζουν την πολυπλοκότητα αυτή είτε με τις διάφορες παραλλαγές των πειραμάτων διάβρωσης, είτε με τον έλεγχο των δοκιμών απέναντι στη χειρότερη κατάσταση που μπορεί να βρεθούν κατά τις συνθήκες λειτουργίας τους.



Σχήμα 3.2 Η συσχέτιση των πειραμάτων διάβρωσης με τις μορφές διάβρωσης, το περιβάλλον λειτουργίας, το εκάστοτε υλικό και τον αντίστοιχο τομέα εφαρμογής.

Πειράματα σε θαλάμους (Cabinet tests). Η διεξαγωγή πειραμάτων σε θαλάμους αναφέρεται σε πειράματα όπου οι συνθήκες που επικρατούν ελέγχονται και χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις όπου γίνεται προσπάθεια επιτάχυνσης ενός συγκεκριμένου διαβρωτικού φαινομένου σε συνδυασμό με την καλύτερη δυνατή προσομοίωση των μηχανισμών διάβρωσης που παίρνουν μέρος. Η χρήση των πειραμάτων αυτών συνίσταται κυρίως για την αξιολόγηση των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε φυσικές ατμόσφαιρες. Προκειμένου να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων με αυτά στην πράξη, παρουσιάζεται αναγκαία η χρήση επιταχυντικών παραγόντων καθώς και η επαλήθευση ότι οι μηχανισμοί διάβρωσης που παίρνουν μέρος είναι οι ίδιοι. Υπάρχουν τρία βασικά είδη πειραμάτων σε θαλάμους και αυτά είναι:

- *Πειράματα ελεγχόμενης υγρασίας (Controlled-humidity tests)*
- *Πειράματα με διαβρωτικά αέρια (Corrosive gas tests)*
- *Πειράματα αλατονέφωσης (Salt spray testing)*

Πειράματα βύθισης (Immersion testing). Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που πρέπει να προσομοιωθούν και ο βαθμός επιτάχυνσης που απαιτείται συχνά καθορίζουν τα εργαστηριακά πειράματα. Στα πειράματα βύθισης, ο βαθμός επιτάχυνσης καθορίζεται κυρίως από:

- Επιμηκύνοντας την περίοδο έκθεσης στις συνθήκες που πιστεύεται ότι προκαλείται διάβρωση. Αν, για παράδειγμα, ένα σώμα επεξεργάζεται με ένα χημικό για 24 ώρες, τότε ο αντίστοιχος χρόνος μέσα στο εργαστήριο είναι 240 ώρες.
- Αναγνωρίζοντας τις συνθήκες ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός διάβρωσης όπως με την αύξηση της οξύτητας ενός διαλύματος, τη συγκέντρωση σε αλάτι, τη θερμοκρασία ή την πίεση κ.τ.λ.

Μόλις καθοριστούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες και σχεδιαστεί το πείραμα, θα πρέπει να γίνει ένας ικανοποιητικός αριθμός επαναλήψεων ώστε να διευκρινιστεί αν ανταποκρίνεται στα επιθυμητά πρότυπα. Τα πειράματα βύθισης χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες:

- *Απλά πειράματα βύθισης (Simple immersion tests)*
- *Πειράματα επαναλαμβανόμενων βυθίσεων (Alternative immersion tests)*

Πειράματα υψηλής πίεσης/υψηλής θερμοκρασίας (High-temperature/high-pressure (HT/HP) testing). Τα πειράματα αυτά αποτελούν ένα από τα πιο κατάλληλα μέσα για την εργαστηριακή προσομοίωση πολλών πειραμάτων σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Ο λόγος για τέτοιες δοκιμές είναι να αναδημιουργηθούν οι υψηλές θερμοκρασίες και οι πιέσεις που εμφανίζονται συνήθως στις εμπορικές ή βιομηχανικές διαδικασίες. Οι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στη συμπεριφορά διάβρωσης συνδέονται συχνά με τη συνολική πίεση του συστήματος, τις μερικές πιέσεις των διάφορων διαλυτών αέριων συστατικών και τη θερμοκρασία. Υπάρχουν πολλά περιβάλλοντα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας εμπορικού κυρίως ενδιαφέροντος. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι πετρελαιοβιομηχανίες, τα πυρηνικά εργοστάσια, οι χημικές βιομηχανίες, η αεροδιαστημική καθώς και ο τομέας των μεταφορών όπου η αξιοπιστία και τα προβλήματα λόγω διάβρωσης είναι κεφαλαιώδους σημασίας.⁴⁶

Τα πειράματα υψηλής πίεσης/θερμοκρασίας έχουν ειδικές απαιτήσεις που δεν μπορούν να συγκριθούν με παρόμοια πειράματα που γίνονται στον εξοπλισμό ενός εργαστηρίου. Τέσσερις παραλλαγές τέτοιων πειραμάτων έχουν εντοπιστεί ότι συμβάλλουν αποτελεσματικά στην εκτίμηση και κατανόηση των φαινομένων διάβρωσης. Οι παραλλαγές αυτές είναι:⁵³

- *Ηλεκτροχημικές μετρήσεις (Electrochemical measurements)*
- *Διείσδυση υδρογόνου (Hydrogen permeation)*
- *Πειράματα μηχανικών ιδιοτήτων (Mechanical property testing)*

Ηλεκτροχημικά Πειράματα (Electrochemical test methods). Βάσει της ηλεκτροχημικής φύσης της διάβρωσης, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι γίνονται μετρήσεις των ηλεκτρικών ιδιοτήτων στη διεπαφή του μετάλλου με το διάλυμα οι οποίες και χρησιμοποιούνται σε όλο το φάσμα της μελέτης των φαινομένων της διάβρωσης, από τις βασικές αρχές μέχρι τον έλεγχο και την πρόβλεψη του

φαινομένου. Τα ηλεκτροχημικά πειράματα αφορούν τον προσδιορισμό συγκεκριμένων στοιχείων στη διεπαφή και μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Διαφορά δυναμικού στη διεπαφή (*Potential difference across the interface*)
- Ποσοστό αντίδρασης ως πυκνότητα ρεύματος (*Reaction rate as current density*)
- Σύνθετη αντίσταση επιφάνειας (*Surface impedance*)

3. 2 Το Πείραμα της αλατονέφωσης

Ο σκοπός μιας επιταχυνόμενης δοκιμής διάβρωσης είναι να αναπαραχθεί στο εργαστήριο το ίδιο αποτέλεσμα διάβρωσης με τον πραγματικό κόσμο. Αυτό παρέχει στους επιστήμονες και τους μηχανικούς πληροφορίες για δημιουργία νέων υλικών. Για πολλά χρόνια το πείραμα της αλατονέφωσης έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα από τους ερευνητές για την αξιολόγηση αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων, την αξιολόγηση ενός μετάλλου απέναντι στους μηχανισμούς διάβρωσης και σε διάφορους τύπους χημικών κατεργασιών.⁶⁸

Για να είναι χρήσιμες οι πληροφορίες που απορρέουν από ένα πείραμα αλατονέφωσης, θα πρέπει να διασφαλίζεται η συσχέτιση των αποτελεσμάτων του πειράματος με αυτά του πραγματικού κόσμου. Για την περίπτωση του συγκεκριμένου πειράματος, κανένας δεν μπόρεσε να τεκμηριώσει ένα τέτοιο συσχετισμό ανάμεσα στο ίδιο το πείραμα και σε ένα περιβάλλον ατμοσφαιρικής έκθεσης. Το γεγονός αυτό οδήγησε πολλούς ερευνητές στο συμπέρασμα ότι το πείραμα της αλατονέφωσης δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικά αποτελέσματα και επομένως πρέπει να διακοπεί. Ωστόσο, το πείραμα συνεχίζει να χρησιμοποιείται ευρύτατα σε πολλούς τομείς. Οι πληροφορίες αυτού του είδους πειράματος σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής μιας αντιδιαβρωτικής επίστρωσης, τις αντιδιαβρωτικές ικανότητες ενός υλικού κ.τ.λ. δίνοντας στο πείραμα της αλατονέφωσης αξιοπιστία και κάνοντας τη διακοπή του αδύνατη. Παράλληλα, μια πληθώρα προδιαγραφών για νέα υλικά προϋποθέτει την αντοχή του εκάστοτε υλικού σε ένα συγκεκριμένο αριθμό ωρών μέσα στο θάλαμο της

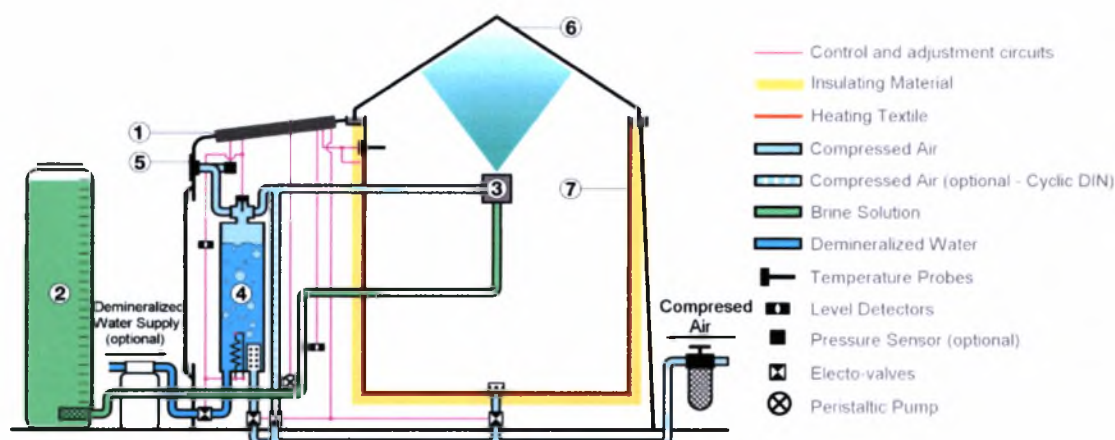
αλατονέφωσης μέχρι την εμφάνιση των πρώτων στοιχείων που παραπέμπουν σε μηχανισμούς διάβρωσης. Το γεγονός αυτό κάνει την οποιαδήποτε αλλαγή του πειράματος, ή ακόμα την κατάργησή του, αδύνατη. Σε γενικές γραμμές, η απόδοση των διάφορων προϊόντων απέναντι στη διάβρωση αξιολογείται με βάση το πείραμα αυτό για τόσο πολύ καιρό που θα ήταν δύσκολο για τους σημερινούς ερευνητές να μην έχουν αποτελέσματα ενός πειράματος αλατονέφωσης όταν αξιολογούν την απόδοση ενός νέου υλικού. Επίσης, το πείραμα της αλατονέφωσης, επειδή είναι “αυστηρό”, είναι μια καλή διαγνωστική εξέταση επειδή τα αποτελέσματα μπορούν να παραχθούν σε μικρό χρονικό διάστημα και τα υλικά που δεν πληρούν τις προδιαγραφές μπορούν να αποκλειστούν σχετικά γρήγορα από τη διαδικασία αξιολόγησης.⁶⁸

3.2.1 Η διαδικασία του πειράματος

Η διαδικασία του πειράματος περιλαμβάνει τον ψεκασμό διαλύματος NaCl πάνω στα δοκίμια που είναι τοποθετημένα μέσα στο θάλαμο της αλατονέφωσης. Ο θάλαμος διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία και το διάλυμα που ψεκάζεται είναι συγκέντρωσης περίπου 5%. Τα δοκίμια που βρίσκονται μέσα στο θάλαμο δέχονται την επίδραση του ομοιόμορφου ψεκασμού του διαλύματος χλωριούχου νατρίου. Με δεδομένο ότι το πείραμα είναι συνεχές, τα δοκίμια παραμένουν συνέχεια υγρά και επομένως υπόκεινται στους μηχανισμούς διάβρωσης. Με το πέρασμα των χρόνων, έγιναν μερικές μικρές μετατροπές στο πείραμα για την καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών που επικρατούν σε πραγματικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, το ευρύτερα διαδεδομένο πείραμα αλατονέφωσης παραμένει το ASTM B117. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια κοινή διάταξη ενός θαλάμου αλατονέφωσης.

3.2.2 Σημασία και εφαρμογή του πειράματος

Το πείραμα αυτό παρέχει ένα ελεγχόμενο περιβάλλον διάβρωσης με σκοπό την αξιολόγηση των μετάλλων -με ή χωρίς αντιδιαβρωτική επίστρωση- απέναντι στο διαβρωτικό περιβάλλον που υπάρχει μέσα στο θάλαμο. Ωστόσο, το πείραμα αυτό δεν δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται μόνο του για την αξιολόγηση του αντίστοιχου υλικού σε πραγματικές συνθήκες διάβρωσης. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα σε πραγματικές συνθήκες θα πρέπει να γίνεται μόνο



- 1) **Πίνακας ελέγχου** – όλες οι διαδικασίες (οδηγίες, ρυθμίσεις, έλεγχοι και μέτρα προστασίας) συγκεντρώνονται και εμφανίζονται σε αυτόν τον πίνακα. Κατά συνέπεια ο χρήστης μπορεί αμέσως να ελέγξει την κατάσταση του θαλάμου.
- 2) **Δεξαμενή διαλύματος**– με χωρητικότητα 200 λίτρων (53 γαλόνια), ο θάλαμος μπορεί να λειτουργεί συνεχώς για πάνω από 200 ώρες χωρίς επιτήρηση. Ένας ηλεκτρονικός αισθητήρας προειδοποιεί τότε το διάλυμα έχει φθάσει στο κατώτατο επίπεδο.
- 3) **Ακροφύσιο** – Το φιλτραρισμένο διάλυμα οδηγείται σε ένα ακροφύσιο μέσω μιας ρυθμιζόμενης αντλίας. Ο μηχανισμός αυτός εξασφαλίζει ότι ο ψεκασμός είναι βέλτιστης ομοιογένειας.
- 4) **Κορεστής**– Μετά το φιλτράρισμα, ο συμπιεσμένος αέρας υγραίνεται και θερμαίνεται σε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία από τον κορεστή ο οποίος συμπληρώνεται αυτόματα με νερό χωρίς μεταλλικά στοιχεία..
- 5) **Μανόμετρο** – Η πίεση του συμπιεσμένου αέρα που βρίσκεται στον κορεστή φαίνεται στη συσκευή.
- 6) **Κάλυμα**- Οι περισσότεροι θάλαμοι εφοδιάζονται με ένα διαφανές κάλυμα.
- 7) **Θάλαμος έκθεσης**– Κατασκευασμένος από αντιδιαβρωτικά υλικά ή υλικά με ανθεκτική αντιδιαβρωτική επίστρωση, ο θάλαμος δεν διαβρώνεται και μπορεί να αντέξει θερμικές και υγραυμετρικές μεταβολές.. Θερμαίνεται εξωτερικά ενώ η ύπαρξη μόνωσης αποτρέπει την απώλεια θερμότητας.

Σχήμα 3.3 Ένας τοπικός θάλαμος αλατονέφωσης.⁵³

σε περιπτώσεις όπου τα δοκίμια έχουν υποβληθεί σε πολύωρα πειράματα μέσα στο θάλαμο. Η σημασία των αποτελεσμάτων στο πείραμα της αλατονέφωσης εξαρτάται άμεσα από το είδος των δοκιμίων που εξετάζονται, τα κριτήρια αξιολόγησης καθώς και τον έλεγχο των μεταβλητών του πειράματος. Διαφορετικά αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί ακόμα και για ίδια δοκίμια που έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικούς θαλάμους αλατονέφωσης, ακόμα και αν οι συνθήκες του πειράματος ήταν παρόμοιες και μέσα στα πλαίσια που περιγράφονται από τις αντίστοιχες προδιαγραφές.

3.2.3 Προετοιμασία των δοκιμίων

Ο αριθμός των δοκιμίων καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του πειράματος εξαρτώνται είτε από τις προδιαγραφές που έχει θέσει ο ερευνητής για το εκάστοτε υλικό, είτε από τις ανάγκες αντιδιαβρωτικής προστασίας που χρειάζεται να έχει το υπό εξέταση υλικό.

Τα δοκίμια θα πρέπει να είναι καθαρά για να τοποθετηθούν μέσα στο θάλαμο αλατονέφωσης. Ο τρόπος καθαρισμού των δοκιμίων εξαρτάται από την επιφάνεια του δοκιμίου. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη διατήρηση της καθαρής επιφάνειας των δοκιμίων αφού μπορεί να παρουσιαστούν φαινόμενα αλλοίωσης των αποτελεσμάτων του πειράματος της αλατονέφωσης σε περιπτώσεις κακής μεταχείρισής τους. Τα δοκίμια που προορίζονται για αξιολόγηση βαφών ή οργανικών επιστρώσεων θα πρέπει να προετοιμαστούν ανάλογα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Σε αντίθετη περίπτωση, τα δοκίμια θα προετοιμαστούν ανάλογα με τις προδιαγραφές όπως αυτές αναφέρονται στο D 609. Όταν χρειάζεται ο καθορισμός της αντίστασης σε διάβρωση σε μια σχισμή της βαφής ή της επίστρωσης του μετάλλου, μια ανάλογη σχισμή θα πρέπει να γίνει στα δοκίμια όπως αυτή περιγράφεται στο D 1654.

3.2.4 Τοποθέτηση δοκιμίων κατά τη διάρκεια του πειράματος

Η τοποθέτηση των δοκιμίων μέσα στο θάλαμο αλατονέφωσης κατά τη διάρκεια του πειράματος θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Τα δοκίμια θα πρέπει να έχουν μια κλίση 15-30° από την κατακόρυφο και κατά προτίμηση παράλληλα στην κύρια διεύθυνση ροής της εκνέφωσης μέσα στο θάλαμο.
- Τα δοκίμια δεν θα πρέπει να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, ούτε με κάποια άλλη μεταλλική επιφάνεια.
- Τα δοκίμια θα πρέπει να τοποθετούνται ώστε η να επιτυγχάνεται η ελεύθερη έκθεσή τους στην εκνέφωση.

3.2.5 Διάλυμα χλωριούχου νατρίου

Το διάλυμα χλωριούχου νατρίου θα πρέπει να προετοιμάζεται με τη διάλυση 5 ± 1 μερών κατά βάρος χλωριούχου νατρίου σε 95 μέρη νερού το οποίο θα πρέπει να πληρεί τις προδιαγραφές του νερού τύπου 4 όπως αυτό περιγράφεται στο D 1193. Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στα χημικά συστατικά του άλατος. Το χλωριούχο νάτριο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί δεν θα πρέπει να είναι λιγότερο καθαρό από 99,7%. Ο πίνακας 3.2 παρουσιάζει συνοπτικά τα μέγιστα επιτρεπτά όρια μολυσματικών παραγόντων στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου.

Πίνακας 3.2 Μέγιστα επιτρεπτά όρια μολυσματικών παραγόντων στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου.

Impurity Description	Allowable Amount
Total Impurities	< 0.3 %
Halides (Bromide, Fluoride and Iodide) excluding Chloride	< 0.1 %
Copper	< 0.3 ppm
Anti-caking Agents	0.0 %

Το pH του διαλύματος θα πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε μετά το ακροφύσιο και στους 35°C να κυμαίνεται από 6.5 μέχρι 7.2. Η μέτρηση του pH του διαλύματος θα πρέπει να γίνει στους 25°C και με τον κατάλληλο εξοπλισμό.

3.2.6 Παροχή αέρα

Η παροχή αέρα μετά τον συμπιεστή θα πρέπει να είναι καθαρή από ίχνη λαδιού και σκόνης και να διατηρείται σταθερή από 69 μέχρι 172 kPa/m² (10-25psi). Για τον

σκοπό αυτό κρίνεται αναγκαία η χρήση παγίδας λαδιού μετά την έξοδο της παροχής αέρα από τον συμπιεστή.

3.2.7 Διατήρηση λειτουργίας του πειράματος

Το πείραμα θα πρέπει να είναι συνεχές και να μη διακόπτεται η λειτουργία του κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζεται έχοντας κλειστό το κάλυμα και τη συνεχή παροχή εκνέφωσης από το ακροφύσιο με εξαίρεση τις μικρές καθημερινές διακοπές για λόγους ελέγχου, αναδιάταξης ή απομάκρυνσης των δοκιμίων από το θάλαμο καθώς για τον έλεγχο και τη συμπλήρωση του διαλύματος στην ανάλογη δεξαμενή και για τις απαραίτητες καταγραφές δεδομένων όπως περιγράφονται στην παράγραφο 3.2.11. Η λειτουργία του πειράματος θα πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένη, ώστε οι διακοπές αυτές να είναι οι ελάχιστες δυνατές.

3.2.8 Διάρκεια έκθεσης

Η διάρκεια της έκθεσης των δοκιμίων στην εκνέφωση θα πρέπει να συμβαδίζει με τις ανάλογες προδιαγραφές και την επιθυμητή αντιδιαβρωτική ικανότητα των υλικών.

3.2.9 Καθαρισμός των δοκιμίων

Σύμφωνα με τη διαδικασία καθαρισμού των δοκιμίων μετά την περίοδο έκθεσης θα πρέπει να απομακρυνθούν προσεκτικά από το θάλαμο και να καθαρισθούν σε τρεχούμενο νερό θερμοκρασίας όχι μεγαλύτερης των 38°C έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι επικαθίσεις αλατιού από την επιφάνειά τους.

3.2.10 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Μια προσεκτική και άμεση αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να γίνει μετά το τέλος του πειράματος της αλατονέφωσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές της επιθυμητής λειτουργίας του υλικού.

3.2.11 Καταγραφή και αναφορά δεδομένων

Για την ικανοποιητική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του πειράματος της αλατονέφωσης θα πρέπει να καταγραφούν οι παρακάτω πληροφορίες: α) ο τύπος του άλατος και του νερού που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος, β) όλες οι ενδείξεις θερμοκρασίας στη ζώνη έκθεσης του θαλάμου, γ) καθημερινά

αρχεία δεδομένων από καθέ έναν από τους συλλέκτες του θαλάμου τα οποία αναφέρονται:

- στον όγκο του διαλύματος που συγκεντρώνεται σε ml/h/80cm².
- στη συγκέντρωση ή την ειδική βαρύτητα του διαλύματος που συλλέγεται στους 35°C.
- στο pH του διαλύματος.

δ)στο είδος των δοκιμίων και τις διαστάσεις τους, ε)στη μέθοδο καθαρισμού των δοκιμίων πριν και μετά το τέλος του πειράματος, στ)στον τρόπο στήριξης των δοκιμίων μέσα στο θάλαμο αλατονέφωσης, ζ)στη διάρκεια έκθεσης, η)στο αποτέλεσμα όλων των ελέγχων.

4

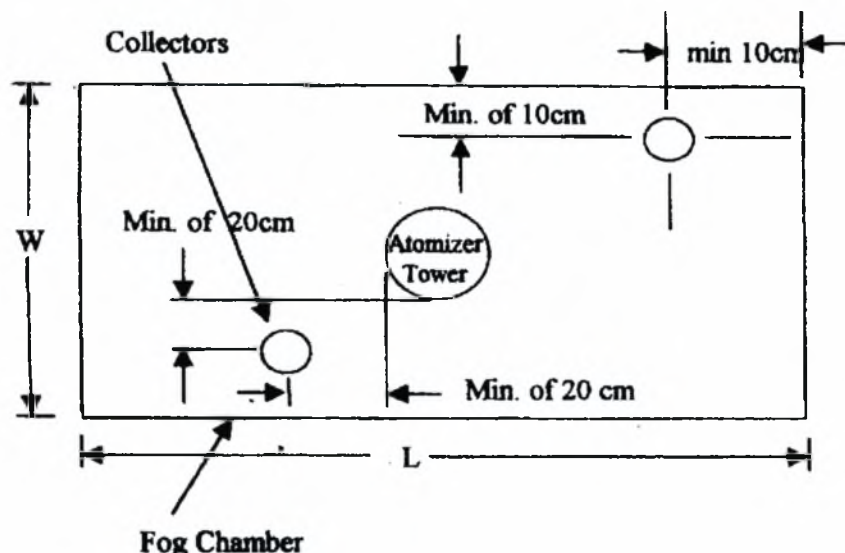
Σχεδιασμός και κατασκευή θαλάμου αλατονέφωσης

Ο σχεδιασμός του θαλάμου αλατονέφωσης έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM B117. Σύμφωνα με την προδιαγραφή αυτή, ο θάλαμος της αλατονέφωσης αποτελείται από τον κυρίως θάλαμο, τη δεξαμενή διαλύματος, την παροχή συγκεκριμένων συνθηκών συμπιεσμένου αέρα, ένα ή περισσότερα ακροφύσια, τη στήριξη των δοκιμίων, το μηχανισμό θέρμανσης του θαλάμου και τα απαραίτητα μέσα ελέγχου της συσκευής. Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι τα δοκίμια που βρίσκονται μέσα στο θάλαμο δεν θα πρέπει να επηρεάζονται από τις σταγόνες του διαλύματος που συσσωρεύονται στο κάλυμμα της συσκευής. Οι σταγόνες αυτές δεν θα πρέπει να επιστρέφονται στη δεξαμενή του διαλύματος. Το υλικό κατασκευής του θαλάμου θα πρέπει να έχει μεγάλη αντιδιαβρωτική προστασία έτσι ώστε να μην επηρεάζει τη διαβρωτική ικανότητα της εκ νέου έκθεσης. Το νερό που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του πειράματος θα πρέπει να συμβαδίζει με το νερό τύπου 4 όπως αυτό περιγράφεται στην προδιαγραφή D1193.

4.1 Συνθήκες λειτουργίας του πειράματος.

4.1.1 Θερμοκρασία. Ο κύριος θάλαμος της συσκευής θα πρέπει να διατηρείται σε μια σταθερή θερμοκρασία στους 35°C με μία απόκλιση $\pm 1^\circ\text{C}$. Κάθε σημείο ελέγχου της θερμοκρασίας έχει σαν στόχο την επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής των συνθηκών στο συγκεκριμένο σημείο χωρίς αυτό να συνεπάγεται την ύπαρξη ομοιόμορφων συνθηκών μέσα στο θάλαμο. Η θερμοκρασία μέσα στη ζώνη έκθεσης θα πρέπει να καταγράφεται τουλάχιστον δύο φορές τη μέρα.

4.1.2 Δημιουργία και ποσότητα εκνέφωσης. Θεωρείται απαραίτητη η τοποθέτηση δύο ή περισσότερων συλλεκτών μέσα στη ζώνη έκθεσης σε τέτοιο σημείο ώστε καμία σταγόνα του διαλύματος δεν θα συλλέγεται από τα δοκίμια ή από κάποια άλλη πηγή. Η τοποθέτηση των συλλεκτών θα πρέπει να γίνει έτσι ώστε ο ένας συλλέκτης να είναι κοντά στο ακροφύσιο και ο άλλος μακριά από αυτό. Μια τοποθέτηση των συλλεκτών αυτών φαίνεται στο σχήμα 4.1. Η ποσότητα της εκνέφωσης θα πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε για ένα μέσο πείραμα διάρκειας 16 ωρών θα πρέπει να συλλέγονται 1-2ml διαλύματος ανά ώρα. Η συγκέντρωση του διαλύματος που συλλέγεται θα πρέπει να είναι 4-6% κ.β. ενώ η τοποθέτηση των ακροφυσίων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η εκνέφωση που δημιουργείται να μην επηρεάζει άμεσα τα δοκίμια.



Σχήμα 4.1 Τυπική μορφή τοποθέτησης των συλλεκτών μέσα στη ζώνη έκθεσης του θαλάμου αλατονέφωσης.

4.2 Κατασκευή θαλάμου. Ο κύριος θάλαμος της συσκευής αλατονέφωσης θα πρέπει να είναι κατασκευασμένος από υλικά με μεγάλη διαβρωτική ικανότητα. Για την κατασκευή του θαλάμου επιλέχθηκε η χρήση Plexiglas. Οι φυσικές, μηχανικές και χημικές ιδιότητες του υλικού αυτού φαίνονται στον πίνακα 4.1. Η χρήση του υλικού αυτού συνδυάζει τόσο την εποπτικότητα του πειράματος όσο και τις απαιτούμενες αντιδιαβρωτικές και θερμομονωτικές ικανότητες. Ο κύριος θάλαμος έχει διαστάσεις

Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των ιδιοτήτων του Plexiglas

Τυπικές Ιδιότητες του Plexiglas		
ASTM or UL test	Ιδιότητα	Acrylic
ΦΥΣΙΚΕΣ		
D792	Πυκνότητα (lb/in ³) (g/cm ³)	0.043 1.18
D570	Απορρόφηση νερού, 24 hrs (%)	0.3
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ		
D638	Αντοχή σε εφελκυσμό (psi)	8,000 - 11,000
D638	Συντελεστής εφελκυσμού (psi)	350,000 - 500,000
D638	Μέγιστη επιμήκυνση μέχρι τη θράυση (%)	2
D790	Δύναμη Λυγισμού (psi)	12,000 - 17,000
D790	Συντελεστής Λυγισμού (psi)	350,000 - 500,000
D695	Αντοχή σε Συμπίεση (psi)	11,000 - 19,000
D695	Συντελεστής Συμπίεσης (psi)	-
D785	Σκληρότητα, Rockwell	M80 - M100
ΘΕΡΜΙΚΕΣ		
D696	Συντελεστής θερμικής διαστολής (x 10 ⁻⁵ in./in./°F)	5 - 9
D3418	Σημείο τήξης (°F / °C)	265-285 / 130-140
-	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°F / °C)	150-200 / 65-93
C177	Θερμική αγωγιμότητα (BTU-in/ft ² -hr-°F) (x 10 ⁻⁴ cal/cm-sec-°C)	3.9 1.2
UL94	Εκτίμηση ευφλεκτότητας	-
ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ		
D149	Διηλεκτρική δύναμη (V/mil) short time, 1/8" thick	400
D150	Διηλεκτρική σταθερά σε 60 Hz	4.0
D150	Παράγοντας διασκεδασμού σε 60 Hz	0.05
ΟΠΤΙΚΕΣ		
-	Μετάδοση φωτός, ελαχιστο (%)	92
-	Δείκτης διάθλασης	1.48-1.50

1000x800x800 και τα κομμάτια που παραγγέλθηκαν είχαν διαστάσεις:

- 820x800x10 (2 τεμάχια)
- 1000x800x10 (2 τεμάχια)
- 940x800x10 (2 τεμάχια)
- 1120x800x10 (2 τεμάχια)
- βάση 1180x980x20

Στο κομμάτι της βάσης κατασκευάστηκε αυλάκι πλάτους 10mm και βάθους 3mm με σκοπό την καλύτερη δυνατή συναρμογή όλων των κομματιών μεταξύ τους καθώς και την ελαχιστοποίηση των πιθανών διαρροών. Η κατασκευή αυτή πραγματοποιήθηκε στη φρέζα που διαθέτει το μηχανουργείο του τμήματος με κονδύλι διαμέτρου 10mm και στροφές 450/min σε συνδυασμό με μικρές ταχύτητες πρόωσης. Η κατεργασία του Plexiglas σε ψηλές στροφές δε συνίσταται χωρίς την ύπαρξη κάποιου ψυκτικού υγρού. Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται λιώνουν το κομμάτι και επομένως περιοριστήκαμε σε χαμηλές στροφές.

Για τη συγκόλληση των πλευρών του θαλάμου χρησιμοποιήθηκε ειδική κόλλα από ρινίσματα Plexiglas και χλωροφόρμιο η οποία και κατασκευάστηκε στο εργαστήριο φυσικών και χημικών διεργασιών του τμήματος.

Κομμάτια από βέργες Plexiglas τετραγωνικής διατομής τοποθετήθηκαν ανάμεσα στον κυρίως θάλαμο και τον εξωτερικό με σκοπό την καλύτερη δυνατή στήριξη των πλευρών του θαλάμου μεταξύ τους. Επίσης, παρόμοιες βέργες τετραγωνικής διατομής τοποθετήθηκαν στις γωνίες της ζώνης έκθεσης του κυρίως θαλάμου για λόγους στήριξης αλλά και για τη διασφάλιση της απαραίτητης μόνωσης κι την αποφυγή εισόδου νερού στη ζώνη έκθεσης. (σχήμα 4.2)

Στις πλευρές του θαλάμου κατασκευάστηκαν με τον ίδιο εξοπλισμό ανοίγματα διαστάσεων 100x100mm για την τοποθέτηση και εύκολη συντήρηση των αντιστάσεων της συσκευής. Τα ανοίγματα αυτά καλύφθηκαν με κομμάτια Plexiglas διαστάσεων 190x190x10 και στηρίχτηκαν στο εξωτερικό τμήμα της συσκευής με την τοποθέτηση 4 βιδών στην περίμετρο των παραθύρων. Η απαραίτητη στεγανοποίηση των παραθύρων επιτεύχθηκε με τη χρήση O-ring κατάλληλων διαμέτρων (σχήμα 4.3).

Παρόμοια στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκε και στις βίδες που συγκρατούσαν τα παράθυρα.

Για την περίπτωση συντήρησης της συσκευής ή πιθανής βλάβης της αντίστασης, κρίθηκε αναγκαία η ύπαρξη κάποιου μηχανισμού για την εύκολη και γρήγορη απομάκρυνση του χιτώνα νερού. Για το λόγο αυτό και με δεδομένο τον όγκο νερού που χρησιμοποιεί η συσκευή (περίπου 240l), ανοίχτηκαν τρεις οπές με σπείρωμα στη βάση της συσκευής. Βάνες και 3 λάστιχα μικρότερης διαμέτρου οδηγούνται σε ένα λάστιχο μεγαλύτερης διαμέτρου που φέρει και το ίδιο βάνα -για λόγους ασφαλείας-.



Σχήμα 4.2 Ράβδος και κύβοι Plexiglas για την καλύτερη στήριξη και στεγανοποίηση του θαλάμου.

4.2.1 Έλεγχος θερμοκρασίας. Η διατήρηση της θερμοκρασίας στον κύριο θάλαμο της αλατονέφωσης μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους. Μια ευρύτερα εφαρμοσμένη τακτική διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία στα τοιχώματα του κυρίως θαλάμου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση της συσκευής σε ένα δωμάτιο με σταθερή θερμοκρασία αλλά μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη θέρμανση ενός “χιτώνα” αέρα ή νερού που περιβάλλει το θάλαμο και το συνεχή έλεγχό του. Η χρήση θερμαντικών στοιχείων μέσα στον κύριο θάλαμο της συσκευής και στη δεξαμενή του διαλύματος θεωρείται απαραίτητη σε περιπτώσεις όπου οι απώλειες

θερμότητας λόγω της εξάτμισης του διαλύματος και της θερμότητα ακτινοβολίας στα δοκίμια είναι μεγάλες.

Για την κατασκευή του συγκεκριμένου θαλάμου επιλέχθηκε η θέρμανση μιας ποσότητας νερού γύρω από τον κύριο θάλαμο της συσκευής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη θερμοχωρητική ικανότητα του νερού έναντι του αέρα. Η αγορά αντίστασης και θερμαντικής ικανότητας 50Ω/m θεωρήθηκε ικανοποιητική για τις ανάγκες της συσκευής (διατήρηση του θαλάμου σε θερμοκρασία $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). Η τοποθέτηση θερμοστοιχείων τύπου K σε διάφορα σημεία του χιτώνα νερού σε συνδυασμό με την τοποθέτηση θερμοστοιχείων στη ζώνη έκθεσης του κυρίως θαλάμου αλλά και η επικοινωνία των θερμοστοιχείων με τον κατάλληλο εξοπλισμό και την αντίσταση της συσκευής που βρίσκεται μέσα στο χιτώνα νερού δίνουν στον χειριστή την ικανότητα επιτήρησης και καθορισμού των ιδανικών συνθηκών λειτουργίας του πειράματος.



Σχήμα 4.3 Χρήση o-ring για τη στεγανοποίηση των επιφανειών μεταξύ τους.

4.2.2 Επιλογή ακροφυσίου. Ικανοποιητικά ακροφύσια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη λειτουργία του θαλάμου αλατονέφωσης μπορούν να είναι κατασκευασμένα είτε από πλαστικό είτε από υλικά με μεγάλη αντιδιαβρωτική ικανότητα. Ο πιο διαδεδομένος τύπος ακροφυσίου για μια τέτοια εφαρμογή είναι κατασκευασμένος από πλαστικό. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός τέτοιου ακροφυσίου φαίνονται στον πίνακα 4.2. Από τον πίνακα μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι η παροχή αέρα παραμένει σχετικά σταθερή στις πιέσεις που υπάρχουν σύμφωνα με τις προδιαγραφές αλλά μια μείωση στην ποσότητα της εκνέφωσης παρατηρείται αν η στάθμη του διαλύματος πέσει αισθητά κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το γεγονός αυτό κάνει αναγκαία τη χρήση αυτοματισμών για τη

διατήρηση της στάθμης του διαλύματος στη δεξαμενή και τη διασφάλιση της ομοιόμορφης κατανομής της εκνέφωσης κατά τη διάρκεια του πειράματος. Εάν το ακροφύσιο που έχει επιλεγεί δεν επιτυγχάνει τη δημιουργία ομοιόμορφης εκνέφωσης θα πρέπει η έξοδος του ακροφυσίου να είναι απέναντι από κάποιο τοίχωμα για να διασπώνται οι μεγάλες σταγόνες σε μικρότερες και για την αποφυγή της άμεσης έκθεσης των δοκιμίων.

4.2.3 Η παροχή του αέρα. Ο αέρας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην είσοδο του ακροφυσίου δεν θα πρέπει να περιέχει λάδι και σκόνη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας ακροφυσίου.

Υψομε/κή διαφορά	Παροχή αέρα, dm ³ /min				Κατανάλωση διαλύματος, cm ³ /h			
	Πίεση αέρα, kPa				Πίεση αέρα, kPa			
cm	34	69	103	138	34	69	103	138
10	19	26,5	31,5	36	2100	3840	4584	5256
20	19	26,5	31,5	36	636	2760	3720	4320
30	19	26,5	31,5	36	0	1380	3000	3710
40	19	26,5	31,5	36	0	780	2124	2904
Υψομε/κή διαφορά	Παροχή αέρα, L/min				Κατανάλωση διαλύματος, ml/h			
	Πίεση αέρα, psi				Πίεση αέρα, psi			
cm	5	10	15	20	5	10	15	20
4	19	26,5	31,5	36	2100	3840	4584	5256
8	19	26,5	31,5	36	636	2760	3720	4320
12	19	26,5	31,5	36	0	1380	3000	3710
16	19	26,5	31,5	36	0	780	2124	2904

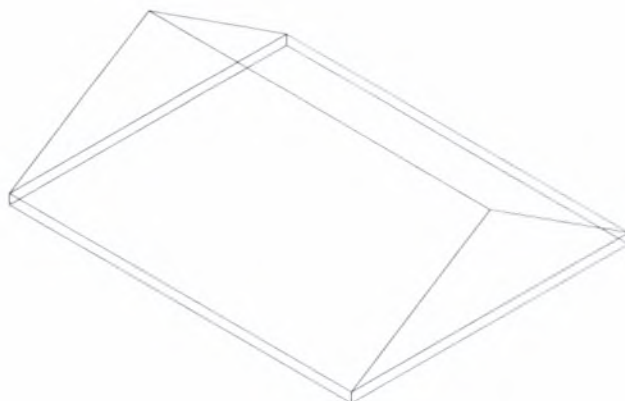
με τη χρήση ειδικών παγίδων και φίλτρων στην έξοδο του ρεύματος αέρα από τον συμπιεστή. Ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να συμπιεστεί, να θερμανθεί και να υγροποιηθεί μέσα σε κατάλληλη αντλία. Σε περίπτωση που δε μπορεί να γίνει αυτό το καθαρό πλέον ρεύμα αέρα πρέπει να αποτελέσει το ρεύμα εισόδου σε έναν πύργο νερού μέσα από ένα πορώδες υλικό ή μια συστοιχία ακροφυσίων. Το επίπεδο του νερού πρέπει να διατηρείται συνεχώς σταθερό για τη διασφάλιση των αναγκαίων

επιπέδων υγρασίας. Ένας θάλαμος που λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές B117 πρέπει να έχει μια σχετική υγρασία ανάμεσα σε 95-98%. Με δεδομένο ότι διάλυμα χλωριούχου νατρίου 2-6% θα δώσει παρόμοια αποτελέσματα (για περιπτώσεις καλύτερης ομοιομορφίας τα όρια του διαλύματος αναπροσαρμόζονται σε 4-6%), θεωρείται αναγκαίος ο κορεσμός του ρεύματος αέρα σε θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από τις θερμοκρασίες του κυρίως θαλάμου για τη διασφάλιση υγρού ρεύματος εκνέφωσης. Ο πίνακας 4.4 δείχνει τις θερμοκρασίες, σε διαφορετικές πιέσεις, που χρειάζονται για την επίτευξη υγρής εκνέφωσης.

Πίνακας 4.3 Θερμοκρασίες και πιέσεις για τη σωστή λειτουργία του πειράματος στους 95°F

	Πίεση αέρα, kPa			
	83	96	110	124
Θερμοκρασία °C	46	47	48	49
	Πίεση αέρα, psi			
	12	14	16	18
Θερμοκρασία °F	114	117	119	121

4.2.4 Κάλυμμα συσκευής. Το κάλυμμα της συσκευής πρέπει να συμβαδίζει και αυτό με τη σειρά του με τις προδιαγραφές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το κάλυμμα κατασκευάστηκε από λεπτό Plexiglas και μέσα στα όρια κλίσης της οροφής όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4 (γωνία οροφής 90-125°). Το κάλυμμα είναι σχεδιασμένο ώστε να πατάει στο πάνω μέρος της συσκευής, οδηγώντας παράλληλα τις σταγόνες της οροφής μακριά από τα δοκίμια. Η βύθιση των άκρων του καλύμματος μέσα στο χιτώνα νερού της συσκευής προσδίδει ένα επιπλέον μονωτικό χαρακτήρα στην κατασκευή.



Σχήμα 4.4 Το κάλυμμα της συσκευής που κατασκευάστηκε.

Μετά το τέλος των βημάτων που περιγράφηκαν παραπάνω η μορφή της συσκευής φαίνεται παρακάτω



Σχήμα 4.5 Φωτογραφία της συσκευής

5

Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικότερα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η μελέτη πραγματεύεται την για έλεγχο των διαφόρων κραμάτων μαγνησίου και την πιθανότητα μελλοντικής χρήσης τους στην αεροναυπηγική. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε με υποβολή των δοκιμίων σε πειράματα αλατονέφωσης και συγκεκριμένα στο πείραμα που είναι ευρύτερα γνωστό σαν ASTM B117. Για την ολοκλήρωση της εργασίας κρίθηκε αναγκαίος ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός θαλάμου αλατονέφωσης ο οποίος θα πληρεί και τις προδιαγραφές του απαιτούμενου πειράματος. Συμπερασματικά, θα μπορούσε να συνοψίσει κανείς την εργασία αυτή στα παρακάτω στοιχεία:

- Η χρήση των κραμάτων μαγνησίου αποτελεί μια καινοτόμα και παράλληλα αρκετά ικανοποιητική λύση. Ο συνδυασμός των μηχανικών ιδιοτήτων, του χαμηλού βάρους καθώς και του μειωμένου κόστους κατασκευής αποτελούν στοιχεία που κάνουν το μαγνήσιο και τα κράματά του να πληρούν τις βασικές τουλάχιστον προϋποθέσεις για την περαιτέρω χρήση τους.

- Παρουσιάστηκαν περιληπτικά οι εργαστηριακές δοκιμές διάβρωσης που χρησιμοποιούνται για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών και των αιτιών εμφάνισης της καθώς και για την έγκαιρη πρόληψη καταστροφικών

φαινομένων. Τα επιταχυνόμενα πειράματα, αν γίνουν κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, μπορούν να οδηγήσουν σε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, με μεγάλη αξιοπιστία και με άμεση συσχέτιση με τα ανάλογα φαινόμενα που εξετάζονται σε κανονικές συνθήκες.

- Το πείραμα της αλατονέφωσης αποτελεί ένα από τα πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης. Το πείραμα αυτό, αν και σε μερικές περιπτώσεις δεν οδηγεί σε ρεαλιστικά αποτελέσματα, αποτελεί εξαιρετικά σημαντική πηγή δεδομένων για την ερευνητική και επιστημονική κοινότητα. Η εξαγωγή ρεαλιστικών συμπερασμάτων για ένα υλικό θα πρέπει να γίνεται μέσα από τη συνδυασμένη υποβολή του σε διάφορα πειράματα διάβρωσης.
- Σχεδιάστηκε και ξεκίνησε να κατασκευάζεται ένας θάλαμος αλατονέφωσης. Ο σχεδιασμός του θαλάμου έγινε σύμφωνα με τις κατάλληλες προδιαγραφές, ενώ η κατασκευή του κυρίως θαλάμου έγινε τόσο στο εργαστήριο φυσικών και χημικών διεργασιών, όσο και στο μηχανουργείο του τμήματος. Η χρήση Plexiglas σαν ένα υλικό που πληρεί τις ιδιαίτερες ανάγκες της συσκευής παρουσιάστηκε σαν η καταλληλότερη λύση.
- Η πολυπλοκότητα της ιδιοσυσκευής και το διάφορα προβλήματα που εμφανίσθηκαν κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησής της, έκαναν αδύνατη την ολοκλήρωσή της. Η επίτευξη της ουσιαστικής αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών καθιστά την ολοκλήρωσή της απλά θέμα χρόνου. Τα κομμάτια του θαλάμου που παραμένουν να προστεθούν είναι: α) το ακροφύσιο και β) ο κορεστής. Τα ηλεκτρονικά συστήματα και τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου προϋποθέτουν την εγκατάσταση των παραπάνω στοιχείων. Ωστόσο, λόγω των γνωστών παραμέτρων λειτουργίας της συσκευής η τοποθέτησή τους αποκτά διαδικαστικό χαρακτήρα.

Παράρτημα Α

ΕΙΣΑΓΩΓΗ Οι μεγαλύτερες ποσότητες μαγνησίου χρησιμοποιούνται για μεταλλουργικούς λόγους: στη δημιουργία κραμάτων με βάση το μαγνήσιο, στην προσθήκη κραμάτων μαγνησίου σε αλουμίνιο καθώς και σε άλλα μέταλλα, στην αποθείωση του σιδήρου και του χάλυβα, σαν μειωτικός παράγοντας για την παραγωγή μετάλλων από τα οξείδια και τα χλωρίδια τους και στις “ανόδους” για την παροχή καθοδικής προστασίας. Οι χημικές χρήσεις περιλαμβάνουν την παραγωγή ενώσεων μαγνησίου, και ως καταλύτη στις αντιδράσεις Grignard. Η χαμηλή πυκνότητά του (περίπου 1.8 kg/dm³ σε μορφή κραμάτων), κάνει το μαγνήσιο το κατάλληλο υλικό σε περιπτώσεις όπου κρίνεται αναγκαία η χρήση ελαφριών συστατικών.

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ. Οι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στη συμπεριφορά του μαγνησίου απέναντι στη διάβρωση είναι η σύνθεση κραμάτων, οι ακαθαρσίες βαρέων μετάλλων, οι συνθήκες χύτευσης, η κρυσταλλική δομή, το περιβάλλον, η κατάσταση της επιφάνειας και η επαφή με άλλα υλικά. Θερμοδυναμικά, το μαγνήσιο θα πρέπει να αντιδρά πλήρως με το οξυγόνο καθώς επίσης και το νερό. Το γεγονός ότι δεν αντιδρά με κανένα από αυτά προκαλείται από την παθητική συμπεριφορά του σε πολλά περιβάλλοντα. Σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον, οι κοιλότητες ή άλλες μορφές τοπικής διάβρωσης εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της διακοπής λειτουργίας του προστατευτικού φιλμ της επιφάνειας.

Τα κράματα μαγνησίου της κατάλληλης σύνθεσης και καθαρότητας είναι ανθεκτικά στη διάβρωση και χρησιμοποιούνται επιτυχώς σε ποικίλες εφαρμογές.

Επίδραση της σύστασης και της δομής του κράματος

Σύσταση

Η διάβρωση των κραμάτων μαγνησίου μετριέται συνήθως σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου, με τη χρησιμοποίηση είτε της βύθισης είτε των πειραμάτων αλατονέφωσης. Αυτές οι δοκιμές αφορούν τις σημαντικές πρακτικές χρήσεις των κραμάτων μαγνησίου σε αυτοκίνητα, αεροσκάφη, και σε στρατιωτικούς σκοπούς. Τα περισσότερα από τα στοιχεία βρίσκονται μέσα, ή προστίθενται, στα κράματα μαγνησίου έχουν περιορισμένη στερεά διαλυτότητα στο κράμα, και επομένως εμφανίζονται ως κατακρημνισμένες φάσεις. Ουσιαστικά, σε όλες τις περιπτώσεις, αυτές οι φάσεις είναι ευγενέστερες (παρουσιάζουν μια υψηλότερη οξειδοαναγωγική δυνατότητα) από τη μήτρα. Η συμβολή τους στη διάβρωση εξαρτάται κυρίως από τη δυνατότητά τους σχετικά με τη μήτρα, καθώς επίσης και την αποδοτικότητά τους ως καθοδικές περιοχές, δηλαδή την ευκολία με την οποία ελευθερώνουν αέριο υδρογόνο (φαινόμενο υπέρτασης).

Τα στοιχεία που είναι γενικά παρόντα στα εμπορικά κράματα μαγνησίου, τα οποία επηρεάζουν τη διάβρωση μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Ευεργετικά: αργίλιο όπως βηρύλλιο, μαγγάνιο, σπάνια γη, πυρίτιο, ψευδάργυρος και ζιρκόνιο
- συγκρατημένα επιβλαβή όπως ασήμι
- σοβαρά επιβλαβή όπως νικέλιο (και κοβάλτιο), σίδηρος και χαλκός.

Τα κράματα Mg-Al-Zn που χρησιμοποιούνται ευρύτατα έχουν δεχθεί εντατική μελέτη, με συνέπεια την ανάπτυξη κραμάτων με σημαντική αντίσταση στη διάβρωση του χλωριούχου νατρίου. Αυτά τα κράματα έχουν μια πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες (Ni, Fe, Cu), και μια ελεγχόμενη περιεκτικότητα σε μαγγάνιο.

Δομή

Το μέγεθος και η διανομή των καθοδικών φάσεων μέσα στο κράμα παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στη διάβρωση και επηρεάζονται από τις παραμέτρους της κατεργασίας και τη θερμική επεξεργασία. Τα ομογενοποιημένα και τεχνητά γηρασμένα δείγματα AZ91E (T6) παρουσιάζουν αρκετά χαμηλότερη διάβρωση από χυτό (F) και ομογενοποιημένα (T4) δείγματα. Η θερμική επεξεργασία επηρεάζει κυρίως τη διανομή της μεσομεταλλικής βήτα-φάσης ($Mg_{17}Al_{12}$) στο κράμα. Η γήρανση T6 προκαλεί την πτώση αυτής της φάσης σε ένα σχεδόν συνεχές δίκτυο των δευτεροβάθμιων μορίων κατά μήκος των ορίων των κρυστάλλων. Στην κατάσταση T4, η βήτα-φάση διαλύεται πλήρως. Με τη χρήση αέρα για λόγους ψύξης από T4, μόνο ίχνη βήτα-φάσεων μπορούν να έχουν την ίδια επίδραση με μια πλήρη T6 επεξεργασία. Η ψυχρή κατεργασία των κραμάτων μαγνήσιου (π.χ., με εφελκυσμό ή κάμψη) δεν έχει καμία αξιολογηθείσα επίδραση στο ποσοστό διάβρωσης.

Η κατάσταση της επιφάνειας

Η χρήση κραμάτων υψηλής καθαρότητας για δομικές εφαρμογές έχει αναδειχτεί σε ζήτημα κεφαλαιώδους σημασίας. Εντούτοις, η αλλοίωση της επιφάνειας από το χειρισμό και τη μηχανική επεξεργασία μπορεί να υποβιβάσει την αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων υψηλής καθαρότητας.

Η επίδραση της ατμόσφαιρας

Η επιφάνεια των κραμάτων μαγνήσιου που εκτίθενται σε ένα περιβάλλον απουσία αλάτων αναπτύσσει ένα γκριζό φιλμ που αποτελείται κυρίως από υδροξείδιο μαγνήσιου που προστατεύει το μέταλλο από τη διάβρωση. Τα χλωρίδια, τα θειικά άλατα, ή άλλες υδρόφιλες ουσίες προωθούν τη διάβρωση με την καταστροφή αυτής του φιλμ. Τα δομικά κράματα μαγνήσιου είναι ανθεκτικά στις αγροτικές ατμόσφαιρες και συγκρατημένα ανθεκτικά στις βιομηχανικές ή ήπιες θαλάσσιες ατμόσφαιρες. Το ποσοστό διάβρωσης στις θαλάσσιες ατμόσφαιρες είναι σημαντικά χαμηλότερο για κράματα Mg-Al-Zn υψηλής καθαρότητας.

Το φιλμ που διαμορφώνεται συνήθως στην επιφάνεια των κραμάτων μαγνήσιου, που εκτίθενται στην ατμόσφαιρα, παρέχει μια περιορισμένη προστασία

από την περαιτέρω επίθεση διάβρωσης. Τα μη προστατευμένα μέρη μαγνησίου και των κραμάτων είναι ανθεκτικά στις αγροτικές ατμόσφαιρες και συγκρατημένα ανθεκτικά στις βιομηχανικές και ήπιες θαλάσσιες ατμόσφαιρες, υπό τον όρο ότι δεν περιέχουν ενώσεις ή κοιλότητες που παγιδεύουν νερό σε συνδυασμό με την ύπαρξη ενός ενεργού γαλβανικού ζεύγους.

Η διάβρωση των κραμάτων μαγνησίου αυξάνεται με τη αύξηση της σχετικής υγρασίας. Στην υγρασία 9.5%, ούτε το καθαρό μαγνήσιο ούτε οποιαδήποτε από τα κράματά του δεν δείχνει στοιχεία διάβρωσης της επιφάνειάς του μετά από 18 μήνες. Σε καταστάσεις υγρασίας 30%, μικρή διάβρωση της επιφάνειας μπορεί να εμφανιστεί. Σε περιβάλλον υγρασίας 80%, η επιφάνεια μπορεί να πληγεί σε μεγάλο βαθμό από τους μηχανισμούς διάβρωσης. Στις θαλάσσιες ατμόσφαιρες όπου η συγκέντρωση αλάτων είναι μεγάλη, τα κράματα μαγνησίου απαιτούν τη χρήση αντιδιαβρωτικής προστασίας για την παρατεταμένη επιβίωσή τους.

Η επίδραση του νερού

Όταν το μαγνήσιο βυθίζεται σε αποσταγμένο νερό χωρίς τη δυνατότητα της απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα, το αρχικό ποσοστό διάβρωσης μειώνεται γρήγορα σε μια πολύ χαμηλή τιμή. Ένα προστατευτικό φιλμ υδροξειδίου του μαγνησίου αναπτύσσεται στην επιφάνεια. Ο κορεσμός του διαλύματος σε υδροξείδιο του μαγνησίου επιτυγχάνεται γρήγορα, η περαιτέρω διάλυση του υδροξειδίου δεν είναι δυνατή και επομένως οι μηχανισμοί διάβρωσης σταματούν ουσιαστικά. Εάν συμπληρωθεί νερό, η διάβρωση συνεχίζεται και αυξάνεται η απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα λόγω της διάλυση του προστατευτικού φιλμ. Η αύξηση της θερμοκρασίας του αποσταγμένου ή φυσικού νερού αυξάνει επίσης το ποσοστό διάβρωσης των κραμάτων μαγνησίου. Το αργίλιο είναι ευεργετικό ως συστατικό ανάμιξης επειδή προωθεί το σχηματισμό προστατευτικών ταινιών.

Οξέα

Το μαγνήσιο διαβρώνεται από όλα τα οξέα εκτός από το υδροφθορικό ή χρωμικό οξύ. Τα προστατευτικά φιλμ διαμορφώνονται στις περισσότερες συγκεντρώσεις αυτών των οξέων. Το υδροφθορικό οξύ δεν επιτίθεται στο μαγνήσιο κατά ένα μεγάλο

βαθμό, επειδή διαμορφώνεται μια αδιάλυτη, προστατευτική ταινία φθοριδίου μαγνησίου στην επιφάνεια. Εντούτοις, η διάβρωση αναπτύσσεται στις χαμηλές όξινες συγκεντρώσεις. Με την αυξανόμενη θερμοκρασία, το ποσοστό επίθεσης αυξάνεται στη διεπιφάνεια, αλλά σε μικρό ποσοστό αλλού.

Το καθαρό H_2CrO_4 διαβρώνει το μαγνήσιο και τα κράματά του σε ένα πολύ χαμηλό ποσοστό. Ωστόσο, τα ίχνη ιόντος χλωριδίου στο οξύ αυξάνουν εμφανώς αυτό το ποσοστό. Διάλυμα 20% H_2CrO_4 σε νερό χρησιμοποιείται ευρέως για την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης από τα κράματα μαγνησίου χωρίς την άμεση διάβρωση του μετάλλου. Το μαγνήσιο αντιστέκεται στα αραιά αλκάλια, και καυστικό διάλυμα 10% χρησιμοποιείται συνήθως για τον καθαρισμό σε θερμοκρασίες μέχρι το σημείο βρασμού.

Αλατούχα διαλύματα

Τα ουδέτερα διαλύματα των αλάτων των βαρέων μετάλλων όπως το νικέλιο, ο σίδηρος, και ο χαλκός είναι διαβρωτικά στα κράματα μαγνησίου. Τέτοια διάβρωση εμφανίζεται όταν τα βαριά μέταλλα σχηματίζουν ενεργές καθόδους στην ανοδική επιφάνεια του μαγνησίου. Τα διαλύματα χλωριδίου είναι διαβρωτικά επειδή τα χλωρίδια, ακόμη και σε μικρά ποσοστά, διαλύουν συνήθως το προστατευτικό φιλμ του μαγνησίου. Τα οξειδωτικά άλατα, ειδικά εκείνοι που περιέχουν άτομα χλωρίου ή θείου, είναι πιο διαβρωτικά από τα μη-οξειδωτικά άλατα, αλλά τα χρωμικά, φωσφορικά και άλλα άλατα διαμορφώνουν προστατευτικά φιλμ στην επιφάνεια του μαγνησίου, και καθυστερούν έτσι τη διάβρωση, εκτός από τις περιπτώσεις των υψηλών θερμοκρασιών.

Αέρια

Το ιώδιο, το βρώμιο, το φθόριο, και το ξηρό χλώριο προκαλούν ελάχιστη ή καμία διάβρωση του μαγνησίου σε θερμοκρασία δωματίου ή σε ελαφρώς ανυψωμένη θερμοκρασία. Ακόμα και όταν περιέχει 0.02% H_2O , το ξηρό βρώμιο δεν προκαλεί μεγαλύτερη διάβρωση στο σημείο βρασμού του ($58^\circ C$, ή $136^\circ F$) απ' ό,τι σε θερμοκρασία δωματίου. Η παρουσία μιας μικρής ποσότητας νερού προκαλεί την έντονη επίθεση από το χλώριο, κάποια επίθεση από το ιώδιο και το βρώμιο, και την

αμελητέα επίθεση από το φθόριο. Το υγρό χλώριο, το ιώδιο, ή το βρώμιο κάτω από το σημείο δρόσου οποιασδήποτε υδάτινης φάσης προκαλούν μεγάλα ποσοστά διάβρωσης στο μαγνήσιο. Το ξηρό, αέριο διοξείδιο του θείου δεν προκαλεί καμία επίθεση στις συνηθισμένες θερμοκρασίες. Η παρουσία υδρατμών μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα διάβρωσης.

Οργανικές ενώσεις

Οι οργανικοί αλειφατικοί και αρωματικοί υδρογονάνθρακες, οι κετόνες και οι αιθέρες δεν είναι διαβρωτικοί στο μαγνήσιο και τα κράματά του. Η αιθανόλη και οι ανώτερες αλκοόλες δεν είναι διαβρωτικές σε κανονικές θερμοκρασίες (150°C ή 300°F). Η άνυδρη μεθανόλη επιτίθεται στα κράματα μαγνησίου με καταστροφικά αποτελέσματα σε θερμοκρασία δωματίου, εντούτοις, το ποσοστό της επίθεσης μειώνεται με την παρουσία νερού.

Τα καθαρά αλογόνα δεν επιτίθενται στο μαγνήσιο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες, ή παρουσία νερού, τέτοιες ενώσεις μπορεί να προκαλέσουν σοβαρή διάβρωση, ιδιαίτερα εκείνες οι ενώσεις που έχουν όξινα προϊόντα υδρόλυσης.

Οι ξηροί υδρογονάνθρακες, όπως το φρέον, δεν επιτίθενται στα κράματα μαγνησίου σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά παρουσία νερού μπορούν να οδηγήσουν σε βλαβερά αποτελέσματα. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες, οι φθοριωμένοι υδρογονάνθρακες μπορούν να αντιδράσουν βίαια με τα κράματα μαγνησίου.

Τα όξινα τρόφιμα, όπως οι χυμοί φρούτων και τα ανθρακούχα ποτά, επιτίθενται στο μαγνήσιο σοβαρά.

Η γαλβανική διάβρωση

Δύο όροι πρέπει να πληρούνται για την εμφάνιση γαλβανικής διάβρωσης: α) ανόμοια επαφή μεταξύ των μετάλλων και β) ένωση της διμεταλλικής σύνδεσης από ένα αγώγιμο διάλυμα (ηλεκτρολύτης). Η ηλεκτροχημική διαδικασία, που εμφανίζεται στο γαλβανικό ζεύγος που περιέχει μαγνήσιο είναι:

Άνοδος: $\text{Mg (μέταλλο)} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$

Κάθοδος: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2(\text{OH})^-$

Σε περιβάλλοντα με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα, η υψηλή διαλυτότητα και η όξινη φύση του χλωριδίου του μαγνησίου που διαμορφώνεται στην άνοδο μπορούν να οδηγήσουν στη γρήγορη διείδυση των κραμάτων μαγνησίου.

Η κατάλληλη προστασία ενάντια στη γαλβανική διάβρωση αρχίζει με τον καλό σχεδιασμό. Αυτό περιλαμβάνει την αποτροπή παγίδευσης ηλεκτρολύτη, την επιλογή των συμβατότερων μετάλλων, τις μικρές αναλογίες της περιοχής καθόδου προς την περιοχή ανόδου, και τη χρήση ανθεκτικών επιστρώσεων απέναντι στα αλκάλια.

Η πιο στενή προσέγγιση στη συμβατότητα με το μαγνήσιο παρέχεται από τα κράματα αργιλίου των σειρών 5000-6000. Ο κασσίτερος, το κάδμιο, και επιστρώσεις ψευδάργυρου στους συνδέσμους χάλυβα μειώνουν τη γαλβανική δράση στο μαγνήσιο στην αλατονέφωση κατά 60%-70%, το οποίο είναι ικανοποιητικό για πολλές πρακτικές εφαρμογές.

Διάβρωση σε πραγματικά περιβάλλοντα και σε περιβάλλοντα προσομοίωσης.

Δομικές εφαρμογές

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες των κραμάτων μαγνησίου στις δομικές εφαρμογές κυμαίνονται από τις εσωτερικές ατμόσφαιρες (σκληροί δίσκοι υπολογιστών) μέχρι τη συνεχή έκθεση σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα. Το ποσό διάβρωσης που μπορεί να ανεχτεί σε αυτές τις εφαρμογές μπορεί να κυμανθεί από μηδέν, για τα μέρη των υπολογιστών ή σε διάφορες στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές μέχρι αρκετά σημαντικό για μερικές εφαρμογές, υπό τον όρο ότι δεν υπάρχει αλλοίωση της σωστής λειτουργίας για μια καθορισμένη περίοδο. Τα κράματα μαγνησίου υψηλής καθαρότητας έχουν αποδείξει την ικανότητα της αντίστασής τους σε τέτοια περιβάλλοντα σε κατάλληλα σχεδιασμένες συναρμογές. Οι σχεδιαστές, εντούτοις, πρέπει να έχουν από πριν τις πληροφορίες σχετικές με τον τύπο και το

μέγεθος της διάβρωσης που μπορεί να εμφανιστεί κάτω από τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας.

Οι καλύτερες πηγές για τη συγκέντρωση τέτοιων πληροφοριών αποτελούν η εμπειρία από προηγούμενες εφαρμογές καθώς και τα αποτελέσματα από μακροχρόνιες δοκιμές στο πραγματικό περιβάλλον. Όταν οι πληροφορίες αυτές δεν είναι διαθέσιμες, οι επιταχυνόμενες δοκιμές διάβρωσης, όπως η περιοδική (διαλείπουσα) βύθιση στο αλατούχο νερό ή σε πειράματα αλατονέφωσης, χρησιμοποιούνται συχνά για να συγκρίνουν την αντίσταση διάβρωσης των κραμάτων μαγνησίου απέναντι σε άλλα μέταλλα. Επιπλέον, τέτοιες δοκιμές χρησιμοποιούνται για να εξετάσουν την ικανότητα των προστατευτικών επιστρώσεων και τη γαλβανικές συμβατότητα των ανόμοιων μετάλλων με το μαγνήσιο. Το πείραμα της αλατονέφωσης, γνωστό σαν ASTM B 117, χρησιμοποιείται ευρέως και έχει καθιερωθεί σαν πείραμα για τον έλεγχο της καταλληλότητας των εκάστοτε υλικών στις διάφορες εφαρμογές. Το μαγνήσιο υποβάλλεται επίσης σε διάφορες επιταχυνόμενες δοκιμές διάβρωσης παρουσία αλατούχων διαλυμάτων που έχουν αναπτυχθεί για ειδικούς λόγους.

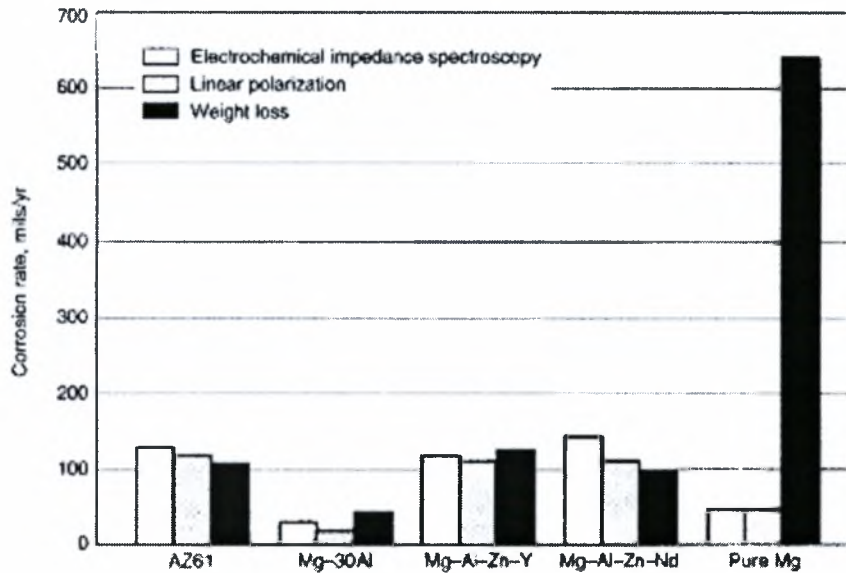
Πειράματα διάβρωσης

Οι ευρύτερα χρησιμοποιημένες τεχνικές στη δοκιμή της αντίστασης διάβρωσης του μαγνησίου είναι μετρήσεις της απώλειας μάζας και το βάθος των κοιλοτήτων που έχουν αναπτυχθεί. Ωστόσο, η ηλεκτροχημική δοκιμή πόλωσης ή οι μετρήσεις σύνθετης αντίστασης του μαγνησίου αποτελούν πηγή πληροφοριών και συμβάλλουν στις μετρήσεις της απώλειας μάζας. Για τα περισσότερα συστήματα μετάλλων, υπάρχει συνήθως καλή ποσοτική συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων της απώλειας μάζας και των ηλεκτροχημικών μετρήσεων. Εντούτοις, για μαγνήσιο, και ειδικά το καθαρό μαγνήσιο, κάτι τέτοιο δεν φαίνεται να ισχύει. Το σχήμα I.1 δίνει μια σύγκριση των ποσοστών διάβρωσης κραμάτων στο βορικό άλας νατρίου pH 9.2 που καθορίζονται από τις ηλεκτροχημικές τεχνικές και τις τεχνικές μέτρησης απώλειας μάζας. Για το καθαρό μαγνήσιο, οι τιμές απώλειας μάζας είναι, κατά προσέγγιση, μια τάξη μεγέθους υψηλότερες από τις προβλεφθείσες από τις ηλεκτροχημικές. Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται από την αύξηση της έκλυσης υδρογόνου στην ανοδική πόλωση, που συνοδεύεται από μια υπερβολική απώλεια μετάλλου. Οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνιση αυτού του φαινομένου είναι:

- σχηματισμός της μετασταθούς φάσης μονοσθενών ιόντων μαγνησίου
- απώλεια μετάλλου λόγω της σταδιακής αποσύνθεσής του
- ρήξη του προστατευτικού φιλμ και άμεση έκθεση του καθαρού μετάλλου
- σχηματισμός του υδρίδιου μαγνησίου

Συγκεκριμένα επιδράσεις των περιβαλλόντων χλωριδίου Οι επιταχυνόμενες δοκιμές διάβρωσης με βάση διαλύματα χλωριούχου νατρίου μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την απόδοση των κραμάτων και των συναρμογών μαγνησίου στα αλατούχα περιβάλλοντα. Τα αποτελέσματα τέτοιων δοκιμών πρέπει να ερμηνευθούν με προσοχή και δεν πρέπει να γίνει καμία προσπάθεια συσχετισμού των αποτελεσμάτων αυτών με τη συμπεριφορά του μαγνησίου στις αγροτικές, αστικές, ή βιομηχανικές ατμόσφαιρες στις οποίες το χλωρίδιο δεν είναι το κύριο συστατικό του περιβάλλοντος.

Η διάβρωση των κραμάτων μαγνησίου στα αλατούχα διαλύματα καθορίζεται από τη συγκέντρωση και την κατανομή των στοιχείων νικελίου, σιδήρου και χαλκού, η παρουσία των οποίων στις κατακρημνισμένες φάσεις των κραμάτων δημιουργεί ενεργές καθοδικές περιοχές με χαμηλή υπέρταση υδρογόνου. Τα ιόντα χλωριδίου υποκινούν περαιτέρω τη διάβρωση μέσω της παρέμβασής τους με το σχηματισμό ενός προστατευτικού φιλμ και μέσω της υψηλής διαλυτότητας και της όξινης φύσης του χλωριδίου του μαγνησίου που συσσωρεύεται στις τοπικές περιοχές ανόδου. Η υψηλή αγωγιμότητα του χλωριδίου σαν ηλεκτρολύτη προωθεί επίσης τη ροή του ρεύματος διάβρωσης. Εάν ένα δυσμενές γαλβανικό ζεύγος εισάγεται, παραδείγματος χάριν, από την ένωση ενός μπουλονιού χάλυβα με το μαγνήσιο, παρουσία αλατούχου διαλύματος, η διάβρωση του μαγνησίου επιταχύνεται πολύ και η καθαρότητα των κραμάτων δεν παρέχει καμία προστασία. Στο πείραμα της αλατονέφωσης, η γαλβανική διάβρωση του μαγνησίου σε μια τέτοια συναρμογή θα ήταν υπερβολική έναντι σε αυτή που θα εμφανιζόταν σε μια θαλάσσια ατμόσφαιρα. Το ποσοστό διάβρωσης των κραμάτων μαγνησίου-αργιλίου στις θαλάσσιες ατμόσφαιρες είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο ποσοστό στα πειράματα αλατονέφωσης, αλλά και τα δύο ποσοστά επηρεάζονται από τη σύσταση και την καθαρότητα του κράματος ή του μετάλλου.



Σχήμα 1.1. Σύγκριση των ποσοστών διάβρωσης καθαρού μαγνησίου (99.98%) και κραμάτων μαγνησίου που καθορίζονται από τις ηλεκτροχημικές τεχνικές και τις τεχνικές μέτρησης απώλειας μάζας.

Εσωτερικές ατμόσφαιρες Πριν την εποχή των υπολογιστών, η αλληλεπίδραση των κραμάτων μαγνησίου με τις εσωτερικές ατμόσφαιρες αποτελούσε την πηγή ανησυχίας κυρίως ως προς το οπτικό αποτέλεσμα και όχι από λειτουργική σκοπιά.. Η χρήση κραμάτων μαγνησίου στον τομέα των υπολογιστών, εισήγαγε νέα όρια για την επίτευξη ικανοποιητικής λειτουργίας των δεδομένων κραμάτων στον τομέα αυτό. Η διάβρωση των κραμάτων μαγνησίου στις ατμόσφαιρες αυτές αυξάνεται με τη σχετική υγρασία. Σε σχετικές υγρασίες μέχρι 80%, η διάβρωση είναι πολύ μικρή, με συνέπεια το μικρό μόνο σχηματισμό μιας, σχεδόν αόρατης, ταινίας άμορφου $Mg(OH)_2$. Τα μικρά ίχνη υπολειμμάτων χλωριδίου από τις ροές κάλυψης ή καθαρισμού μπορούν να χρησιμεύσουν ως οι πυρήνες για τα σημεία διάβρωσης στον υγρό αέρα.

Οι επιταχυνόμενες δοκιμές που περιλαμβάνουν την κυκλική εναλλαγή υγρασίας και θερμοκρασίας παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για αυτές τις εφαρμογές, για την απόδοση της προστατευτικής επίστρωσης και την ανίχνευση οποιωνδήποτε μη μεταλλικών στοιχείων που να είναι παρόντα.

Εργο-διάβρωση (SCC)

Τα κράματα μαγνησίου που περιέχουν περισσότερο από περίπου 0.5%-2.5% αργίλιο είναι ευαίσθητα SCC και η τάση αυτή αυξάνει όσο αυξάνει η περιεκτικότητα του κράματος σε αργίλιο. Ο ψευδάργυρος προκαλεί επίσης ευαισθησία σε SCC στα κράματα μαγνησίου, έτσι δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι τα κράματα AZ, που είναι τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα κράματα μαγνησίου, παρουσιάζουν τη μέγιστη ευαισθησία σε SCC. Τα κράματα μαγνησίου-ψευδαργύρου που δεν αναμιγνύονται με το αργίλιο έχουν ενδιάμεση αντίσταση σε SCC, ενώ τα κράματα μαγνησίου που δεν περιέχουν ούτε το αργίλιο ούτε τον ψευδάργυρο είναι τα ανθεκτικότερα σε SCC.

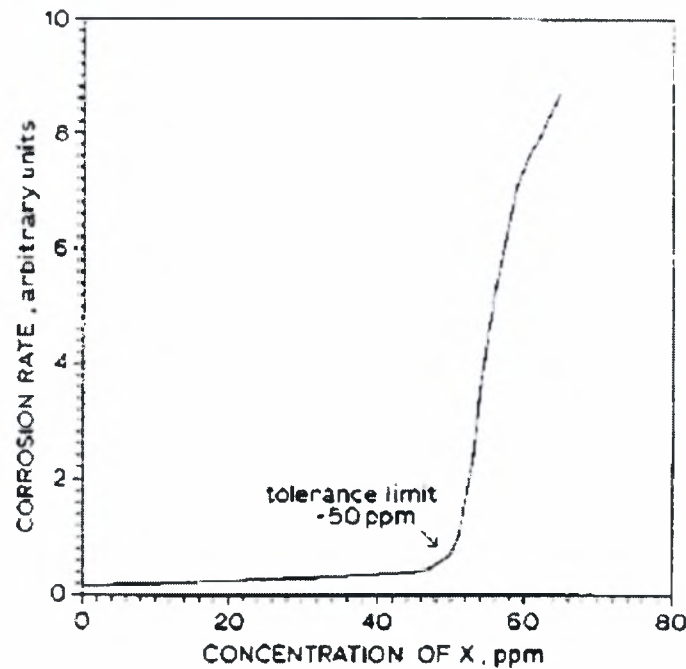
Πρόληψη της διάβρωσης στα κράματα μαγνησίου

Διάφορες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελαχιστοποιήσουν τα προβλήματα διάβρωσης των κραμάτων μαγνησίου και μια συνοπτική περίληψη αυτών των μεθόδων δίνεται κατηγοριοποιημένη στους παρακάτω τομείς.

Ανάπτυξη κραμάτων. Τα στοιχεία σίδηρος, νικέλιο και χαλκός, όταν αυτά αποτελούν μέρος της σύστασης, επιταχύνουν τη διάβρωση του μαγνησίου και των κραμάτων του. Με τη διατήρηση των μέγιστων ορίων αυτών των στοιχείων κάτω από το αντίστοιχο όριο ανοχής, η απόδοση των κραμάτων μαγνησίου απέναντι στη διάβρωση μπορεί να βελτιωθεί. Η καμπύλη που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2 παρουσιάζει την επίδραση των παραπάνω στοιχείων ενός κράματος μαγνησίου απέναντι στο ρυθμό διάβρωσης μέσα σε διάλυμα 3%. Στην καμπύλη αυτή φαίνεται καθαρά το ανώτατο όριο πάνω από το οποίο ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται δραματικά. Τα νέα κράματα έχουν αποδειχθεί περισσότερο ανθεκτικά από τα προηγούμενα. Η ανάπτυξη των νέων κραμάτων μπορεί να περιλαμβάνει νέα στοιχεία, νέες φάσεις, και καινοτόμες κατανομές στη μικροδομή.

Τροποποίηση της επιφάνειας του κράματος και χρήση προστατευτικής επίστρωσης. Η τροποποίηση της επιφάνειας και η χρήση προστατευτικής επίστρωσης στα κράματα μαγνησίου είναι πολύ σημαντικά μέτρα στη μάχη ενάντια στη διάβρωση. Είναι ευρύτερα αποδεκτό ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών προστατευτικών επιστρώσεων που μπορούν να διασφαλίσουν ικανοποιητικά ποσοστά αντοχής του μαγνησίου και των κραμάτων του απέναντι στη

διάβρωση. Εντούτοις, η ευρύτερη χρήση του μαγνησίου στην αυτοκινητοβιομηχανία αποτρέπεται ακόμα από την έλλειψη κατάλληλων προστατευτικών επιστρώσεων που μπορούν να αντισταθούν στις σκληρές συνθήκες λειτουργίας που υπόκεινται τα κράματα.



Σχήμα 1.2. Επίδραση της συγκέντρωσης του στοιχείου X στη διάβρωση του μαγνησίου. Ο ρυθμός της διάβρωσης αυξάνεται δραματικά πάνω από το ανώτατο όριο των 50 ppm.

Επεξεργασία ταχείας στερεοποίησης (Rapid solidification processing). Η ταχεία στερεοποίηση (RS) επιδρά με τουλάχιστον δύο τρόπους στην ελαχιστοποίηση των επιβλαβών αποτελεσμάτων της μη καθαρής σύστασης των κραμάτων μαγνησίου. Επειδή η τεχνική αυτή αυξάνει τα όρια της στερεάς διαλυτότητας, μια ευρύτερη ποικιλία σχηματισμού νέων φάσεων είναι δυνατή, επιτρέποντας στα επιβλαβή στοιχεία να τοποθετηθούν στις λιγότερο επιβλαβείς θέσεις ή φάσεις. Παράλληλα, η RS τείνει να ομογενοποιήσει το υλικό, περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο την εμφάνιση τοπικής διάβρωσης.

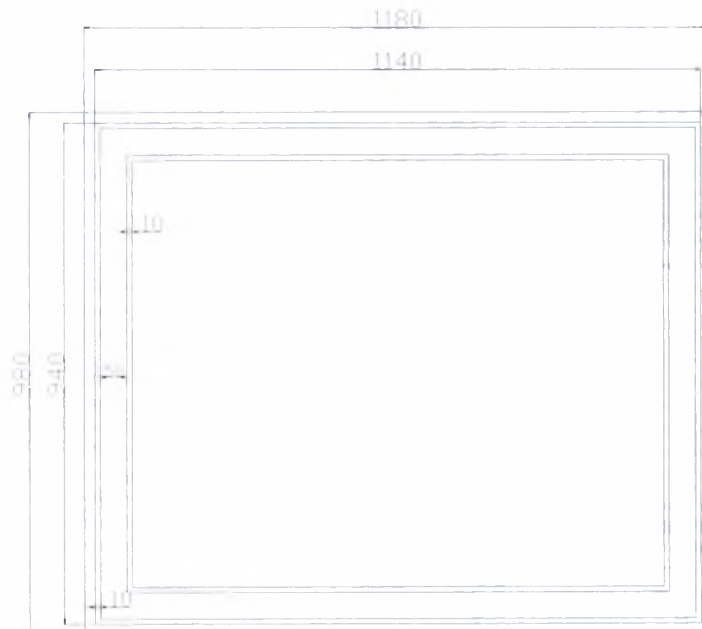
Ανόπτηση λέιζερ Η επιφάνεια που λειώνει με τη χρήση του λέιζερ μπορεί να δημιουργήσει μετασταθή στερεά διαλύματα στις επιφάνειες μετάλλων όπου το ποσοστό ψύξης μπορεί να είναι της τάξης του 10^{10} K/s. Αυτή η διαδικασία είναι μια μορφή επεξεργασίας ταχείας στερεοποίησης, αλλά μόνο η περιοχή της επιφάνειας μεταβάλλεται. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής περιλαμβάνουν τη δυνατότητα

να αντιμετωπιστούν σύνθετες γεωμετρίες, το χαμηλό κόστος λειτουργίας, και ο μεγαλύτερος έλεγχος της συγκέντρωσης του τροποποιημένου στρώματος. Αυτή η διαδικασία έχει ερευνηθεί για τη βελτιωμένη αντίσταση διάβρωσης στα κράματα Mg-Li και Mg-Zr.

Συμπεράσματα. Το μαγνήσιο και τα κράματά του έχουν πολλές ελκυστικές ιδιότητες, εκ των οποίων η χαμηλή πυκνότητα είναι μια από τις σημαντικότερες. Η φτωχή αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων μαγνησίου σε μερικά περιβάλλοντα είναι το κύριο εμπόδιο για την περαιτέρω εφαρμογή αυτών των κραμάτων. Σημαντική πρόοδος έχει γίνει τις τελευταίες δεκαετίες στον τομέα της κατανόησης των μηχανισμών διάβρωσης του μαγνησίου και των κραμάτων του και στην ανάπτυξη νέων κραμάτων, καθώς επίσης και στις νέες μεθόδους επεξεργασίας και τις αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις. Η ετήσια αύξηση της κατανάλωσης μαγνησίου κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας ήταν της τάξης του 15%. Αυτή η αύξηση προβλέπεται να συνεχιστεί σε ένα ποσοστό τουλάχιστον 12% για τα επόμενα δέκα χρόνια. Ένα βασικό στοιχείο σε αυτήν την ανάπτυξη είναι αυξανόμενη κατανόηση των μηχανισμών διάβρωσης των κραμάτων μαγνησίου, καθώς επίσης και η περαιτέρω ανάπτυξη περισσότερων ανθεκτικών κραμάτων διάβρωσης και νέων βελτιωμένων μεθόδων επεξεργασίας και αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων.

Παράρτημα Β

Κάτοψη Βάσης



Τομή της βάσης της συσκευής



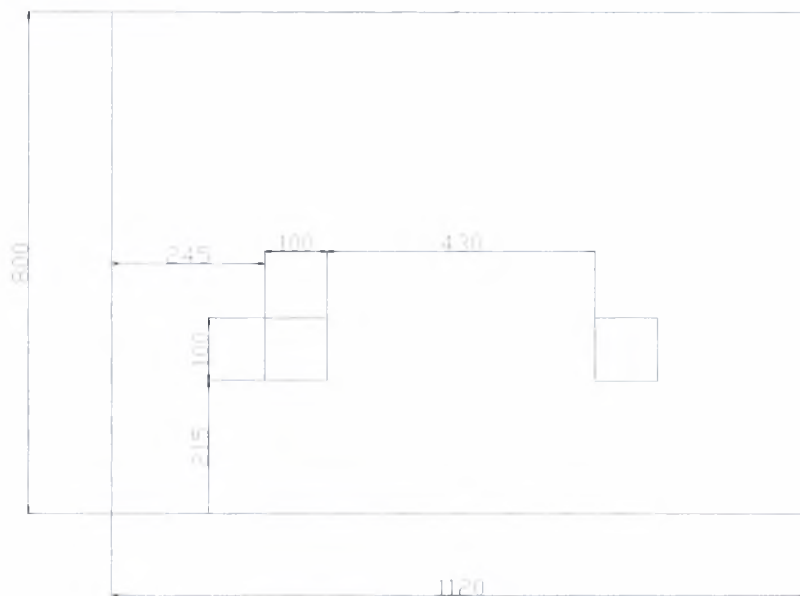
Κάτοψη καλύμματος συσκευής



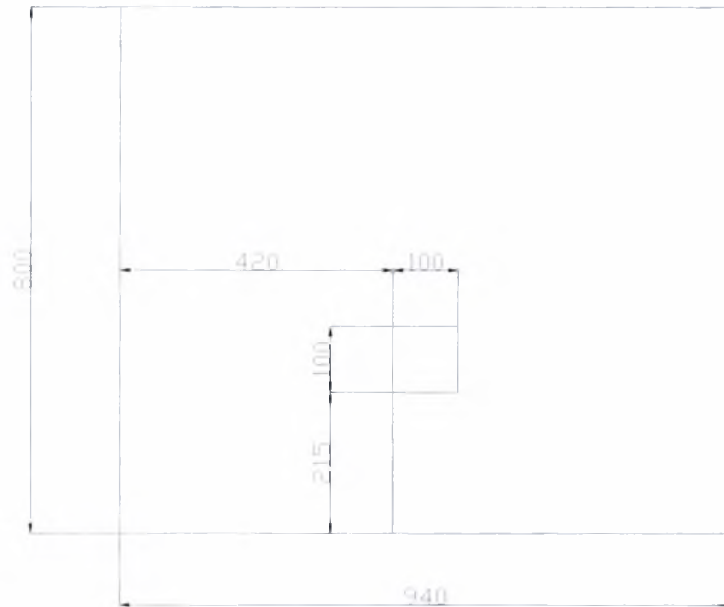
Πλάγια όψη καλύμματος συσκευής



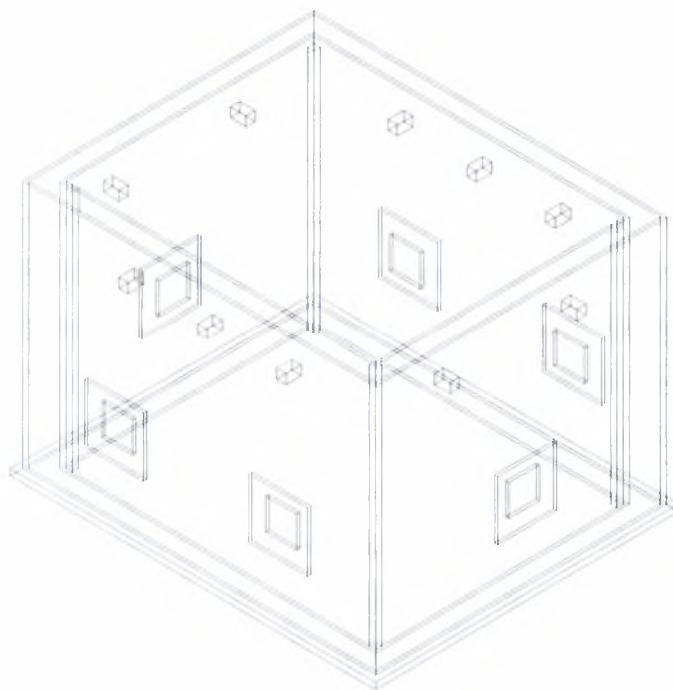
Εξωτερική Πλευρά 1120x800x10



Εξωτερική Πλευρά 940x800x10



Ολοκληρωμένο σχέδιο



Βιβλιογραφία

1. Uhlig, H. H., The Cost of Corrosion in the United States, *Chemical and Engineering News*, 27:2764 (1949).
2. Cabrillac, C., Leach, J. S. L., Marcus P., et al., The Cost of Corrosion in the EEC, *Metals and Materials*, 3:533–536 (1987).
3. Hoar, T. P., *Report of the Committee on Corrosion and Protection*. 1971. London, UK, Her Majesty's Stationary Office.
4. Holbrook, D., Corrosion Annually Costs \$300 Billion, According to Battelle Study, <http://www.battelle.org/pr/12corrode.html>, 1-1-1996, Battelle Memorial Institute.
5. Bennett, L. H., Kruger, J., Parker, R. L., Passaglia, E., Reimann, C., Ruff, A. W., and Yakowitz, H., *Economic Effects of Metallic Corrosion in the United States: A Report to the Congress*, NBS Special Pub. 511-1. 1-13-1978. Washington, DC, National Bureau of Standards.
6. Up Front, *Materials Performance*, 31:3 (1992).
7. Vasanth, K., *Minutes of Group Committee T-9 - Military, Aerospace, and Electronics Equipment Corrosion Control*, 3-30-1995. Houston, Tex., NACE International.
8. Miller, D., Corrosion control on aging aircraft: What is being done? *Materials Performance*, 29:10–11 (1990).

9. Hamer, M., Clampdown on the Rust Buckets, *New Scientist*, 146:5 (1991).
10. Broomfield, J. P., *Five Years Research on Corrosion of Steel in Concrete: A Summary of the Strategic Highway Research Program Structures Research*, paper no. 318 (Corrosion 93), 1993. Houston, Tex., NACE International.
11. Trethewey, K. R., and Roberge, P. R., Corrosion Management in the Twenty-First Century, *British Corrosion Journal*, 30:192–197 (1995).
12. Roberge, P. R., Eliciting Corrosion Knowledge through the Fault-Tree Eyeglass, in Trethewey, K. R., and Roberge, P. R. (eds.), *Modelling Aqueous Corrosion: From Individual Pits to Corrosion Management*, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1994, pp. 399–416.
13. Trethewey, K. R., and Roberge, P. R., Lifetime Prediction in Engineering Systems: The Influence of People, *Materials and Design*, 15:275–285 (1994).
14. Shreir, L. L., Jarman, R. A., and Burstein, G. T., *Corrosion Control*. Oxford, UK, Butterworths Heinemann, 1994.
15. Congleton, J., Stress Corrosion Cracking of Stainless Steels, in Shreir, L. L., Jarman, R. A., and Burstein, G. T. (eds), *Corrosion Control*. Oxford, UK, Butterworths Heinemann, 1994, pp. 8:52–8:83.
16. Fontana, M. G., *Corrosion Engineering*, New York, McGraw Hill, 1986.
17. Dillon, C. P., *Forms of Corrosion: Recognition and Prevention*, Houston, Tex., NACE International, 1982.
18. Gilbert, L. O., *Materiel Deterioration Problems in the Army*, unpub., 1979.
19. Szklarska-Smialowska, Z., *Pitting Corrosion*, Houston, Tex., NACE International, 1986.
20. Hoffman, C., 20,000-Hour Tuneup, *Air & Space*, 12:39–45 (1997).
21. Seher, C. and Broz, A. L., National Research Program for Nondestructive Inspection of Aging Aircraft, *Materials Evaluation*, 49:1547–1550 (1991).
22. Komorowski, J. P., Krishnakumar, S., Gould, R. W., et al., Double Pass Retroreflection for Corrosion Detection in Aircraft Structures, *Materials Evaluation*,

- 54:80–86 (1996).
23. Wildey, II, J. F., Aging Aircraft, *Materials Performance*, 29:80–85 (1990).
24. Komorowski, J. P., Bellinger, N. C., Gould, R. W., et al., Quantification of Corrosion in Aircraft Structures with Double Pass Retroreflection, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, 42:76–82 (1996).
25. Oldfield, J. W., Electrochemical Theory of Galvanic Corrosion, in Hack, H. P. (ed.), *Galvanic Corrosion*, Philadelphia, Penn., American Society for Testing of Materials, 1988, pp. 5–22.
26. Page, C. L., and Anchor, R. D., Stress Corrosion Cracking in Swimming Pools, *Materials Performance*, 29:57–58 (1990).
27. Staehle, R. W., Predicting the Performance of Pipelines, Revie, R. W. and Wang, K. C. *International Conference on Pipeline Reliability*, VII-1-1-VII-1-13. 1992. Ottawa, Ont., CANMET.
28. Staehle, R. W., Understanding “Situation-Dependent Strength:” A Fundamental Objective, in *Assessing the History of Stress Corrosion Cracking. Environment-Induced Cracking of Metals*, Houston, Tex., NACE International, 1989, pp. 561–612.
29. Roberge, P. R., An Object-Oriented Model of Materials Degradation, in Adey, R. A., Rzevski, G., and Tasso, C. (eds.), *Applications of Artificial Intelligence*, in *Engineering X*, Southampton, UK, Computational Mechanics Pub., 1995, pp. 315–322.
30. Roberge, P. R., Tullmin, M. A. A., and Trethewey, K., “Knowledge Discovery from Case Histories of Corrosion Problems,” *CORROSION 97*, Paper 319. 1997. Houston, Tex., NACE International.
31. Wyatt, L. M., Bagley, D. S., Moore, M. A., et al., *An Atlas of Corrosion and Related Failures*, St. Louis, Mo., Materials Technology Institute, 1987.
32. Parkins, R. N., *Materials Performance*, 24:9–20 (1985).

33. EFC, *Illustrated Case Histories of Marine Corrosion*, Brookfield, UK, The Institute of Metals, 1990.
34. Beaudet, P., and Roth, M., Failure Analysis Case Histories of Canadian Forces Aircraft Landing Gear Components, *Landing Gear Design Loads*, Neuilly-sur Seine, France, NATO, 1990, pp. 1.1–1.23.
35. Roberge, P. R., and Grenier, L., “Developing a Knowledge Framework for the Organization of Aircraft Inspection Information,” *CORROSION 97*, Paper 382. Houston, Tex., NACE International, 1997.
36. Ijseling, F. P., *General Guidelines for Corrosion Testing of Materials for Marine Applications*, London, The Institute of Materials, 1989.
37. Lloyd, D. K., and Lipow, M., *Reliability: Management, Methods and Mathematics*, Milwaukee, Wisc., The American Society for Quality Control, 1984.
38. Erlings, J. G., de Groot, H. W., and Nauta J., The Effect of Slow Plastic and Elastic Straining on Sulphide Stress Cracking and Hydrogen Embrittlement of 3.5% Ni Steel and API 5L X60 Pipeline Steel, *Corrosion Science*, 27:1153–1167 (1987).
39. Baboian, R., *Corrosion Tests and Standards*, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1995.
40. Lyon, S. B., Thompson, G. E., and Johnson, J. B., in Agarwala, V. S., and Ugiansky, G. M. (eds.), *New Methods for Corrosion Testing of Aluminum Alloys*, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1992, pp. 20–31.
41. J. Guthrie, B. Battat and C. Grethlein: *Accelerated Corrosion Testing*, The AMPTIAC Quarterly, Volume 6, No.3., Fall 2002.
42. D.A. Claydon: *Performance Testing of Anti-Corrosive Coatings*, Akzo Nobel, England.
43. Treseder, R. S., Haynes, G. S., and Baboian, R. (eds.), *Laboratory Corrosion Tests and Standards*, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 5–23.
44. Mapes, R. S., and Berkey, W. W., X-Ray Diffraction Methods for the Analysis of

- Corrosion Products, in Ailor, W. H. (ed.), *Handbook on Corrosion Testing and Evaluation*, New York, John Wiley and Sons, 1971, pp. 697–730.
45. Roberge, P. R., Yousri, S., and Halliop, E., Potentiodynamic Polarization and Impedance Spectroscopy for the Statistical Process Control of Aluminum Anodizing, in Silverman, D. C., Kendig, M. W., and Scully, J., (eds.), *Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation*, STP 1188, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1993, pp. 313–329.
46. Kane, R. D., High-Temperature and High Pressure, in Baboian, R. (ed.), *Corrosion Tests and Standards*, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1995, pp. 106–115.
47. Andresen, P. L., “Effects of Testing Characteristics on Observed SCC Behavior in BWRs,” in *Corrosion 98*, Houston, Tex., NACE International, 1998, Paper # 137.
48. Zeller, R. L., III, and Savinell, R. F., *Corrosion Science*, 26:591 (1986).
49. Epelboin, I., Keddou, M., and Takenouti, H., *Journal of Applied Electrochemistry*, 2:71 (1972)
50. Hladky, K., Callow, L. M., and Dawson, J. L., *British Corrosion Journal*, 15:20 (1980).
51. de Levie, R., *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*, 1969.
52. Silverman, D. C., *Corrosion*, 47:87 (1991)
53. [www.elcometer.com \Elcometer 1120 Salt Spray Tester - BS1.htm](http://www.elcometer.com/Elcometer%201120%20Salt%20Spray%20Tester%20-%20BS1.htm)
54. Hladky, K., and Dawson, J. L., *Corrosion Science*, 21:317 (1981).
55. Mandelbrot, B. B., and Wallis, J. R., *Water Resources Research*, 5:321 (1969).
56. Finn, A. N., Method of Making the Salt-Spray Corrosion Test, *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, 18:237–238 (1918).
57. LaQue, F. L., *Materials & Methods*, 35:77–81 (1952).
58. Harper, R., *Metal Industry*, 99:454–458 (1961).

59. Hopkins, A. G., Surface Analysis, in Baboian, R. (ed.), *Corrosion Tests and Standards*, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1995, pp. 55–61.
60. D1193 Specification for Reagent Water, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 11.01
61. G85 Practice for modified Salt Spray (Fog) Testing, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.02
62. Magnesium and Magnesium Alloys. ASM Speciality Handbook, ed. M.M. Avedesian and H. Baker. ASM International, 1999.
63. B.L. Mordike and T. Ebert. Magnesium. Properties – Applications – Potential. *Mat. Sci. and Eng. A302*, p. 37-45, 2001.
64. M.F. Ashby. Drivers for material development in the 21st century. *Progress in Materials Science* Vol. 46, p. 191-199, 2001.
65. H. Alves, U. Koster, E. Aghion and D. Eliezer. *Environmental Behaviour of Magnesium and Magnesium Alloys. Materials Technology*, Vol. 16, Nr. 2, p. 110-126, June 2001.
66. F. Czerwinski. *The oxidation behaviour of an AZ91D magnesium alloy at high temperatures. Acta Materialia* 50, p. 2639-2654, 2002.
67. G. Song and A. Atrens. *Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys. Advanced Engineering Materials*, Vol. 1, No 1, p. 11-33, 1999.
68. G.L. Makar and J. Kruger. *Corrosion of Magnesium. International Materials Reviews*, Vol. 38, No. 3, p. 138-153, 1993.
69. J.E. Gray and B. Luan. *Protective coatings on magnesium and its alloys – a critical review. Journal of Alloys and Compounds* 336, p. 88-113, 2002.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074892

