

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑ  
ΜΕΤΑΞΥ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ  
ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ  
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024-T3”**

ΤΟΥ  
ΧΡΗΣΤΟΥ ΚΑΥΧΙΤΣΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ.Ν. ΧΑΙΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ
2. ΕΠΙΚ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ. ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ
3. ΔΡ. ΜΕΤΑΛ. ΜΗΧ. Ν.Δ. ΧΑΣΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΔΡ. ΜΕΤΑΛ. ΜΗΧ. Ν.Δ. ΧΑΣΙΩΤΗΣ

ΒΟΛΟΣ ΙΟΥΝΙΟΣ 2005



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

Αριθ. Εισ.: 4490/1  
Ημερ. Εισ.: 12-07-2005  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2005  
ΚΑΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑ  
ΜΕΤΑΞΥ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ  
ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ  
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024-T3”**

ΤΟΥ  
ΧΡΗΣΤΟΥ ΚΑΥΧΙΤΣΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ. Ν. ΧΑΙΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ
2. ΕΠΙΚ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ. ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ
3. ΔΡ. ΜΕΤΑΛ. ΜΗΧ. Ν. Δ. ΧΑΣΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΔΡ. ΜΕΤΑΛ. ΜΗΧ. Ν. Δ. ΧΑΣΙΩΤΗΣ

**ΒΟΛΟΣ ΙΟΥΝΙΟΣ 2005**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	i
Εισαγωγή.....	ii
<b>Κεφάλαιο 1 Θεωρητική Προσέγγιση της Διάβρωσης</b>	
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Θερμοδυναμική .....	2
1.3 Ηλεκτροχημεία.....	3
1.3.1 Ξηρή Διάβρωση και Οξείδωση .....	3
1.3.2 Διάβρωση που Περιλαμβάνει Μια Υγρή Φάση.....	3
1.4 Μεταλλουργία και Φυσικοχημεία.....	5
1.5 Ηλεκτροχημική Σειρά.....	7
1.6 Διαγράμματα Pourbaix.....	9
1.7 Ειδικές Περιπτώσεις Τεχνολογικού Ενδιαφέροντος .....	10
1.7.1 Επιφανειακά φαινόμενα .....	10
1.7.2 Διάβρωση λόγω συγκέντρωσης οξυγόνου (O <sub>2</sub> ).....	10
1.7.3 Ηλεκτροχημική διάβρωση μεταξύ των κραματικών φάσεων.....	10
1.7.4 Ηλεκτροχημική διάβρωση λόγω μεταβολών στη θερμοκρασία... ..	10
1.8 Τύποι Διάβρωσης.....	11
1.8.1 Ομοιόμορφη Προσβολή.....	11
1.8.2 Γαλβανική Προσβολή.....	12
1.8.3 Διάβρωση στα Διάκενα.....	14
1.8.3.1 Μηχανισμός Διάβρωσης στα Διάκενα.....	14
1.8.4 Νηματοειδής Διάβρωση.....	16
1.8.5 Σημειακή Διάβρωση.....	18
1.8.6 Erosion Corrosion.....	21
1.8.7 Περικρυσταλλική Διάβρωση.....	22
1.8.8 Διάβρωση Υπό Μηχανική Καταπόνηση.....	23
1.8.9 Κόπωση με Διάβρωση.....	24
1.8.10 Θραύση Ψαθυροποίησης Υδρογόνου.....	24
<b>Κεφάλαιο 2 Αεροπορικά Κράματα Αλουμινίου και η Απόκρισή τους σε Διαβρωτική Προσβολή</b>	
2.1 Εισαγωγή .....	26
2.2 Αλουμίνιο και Κράματα Αλουμινίου – Γενικά.....	27
2.2.1 Χυτά Κράματα Αλουμινίου.....	29
2.2.2 Διαμορφούμενα Εν Ψυχρώ Θερμικά Κατεργασμένα Κράματα Αλουμινίου .....	29
2.2.3 Διαμορφούμενα Εν Ψυχρώ Μη Θερμικά Κατεργασμένα Κράματα Αλουμινίου .....	32
<b>Κεφάλαιο 3 Το Περιβάλλον Λειτουργίας των Αεροπορικών Κραμάτων</b>	
3.1 Γενικά.....	35
3.2 Μετεωρολογικά Στοιχεία – Θερμοκρασία και Υγρασία.....	36
3.3 Ατμοσφαιρικοί Ρύποι.....	37
3.4 Επίδραση Κλίματος.....	38
3.5 Κατηγοριοποίηση των Ατμοσφαιρών.....	39
3.6 Το Περιβάλλον του Αεροδρομίου.....	47

<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Συνήθεις Περιοχές Διάβρωσης Πτητικών Μέσων</b>	
4.1	Γενικά.....	51
4.2	Επιθεώρηση για Διάβρωση.....	52
4.3	Περιοχές Ευπαθείς σε Διάβρωση.....	54
4.3.1	Εξωτερική Επικάλυψη.....	57
4.3.2	Εκτεθειμένοι Μηχανισμοί - Εξαρτήματα.....	58
4.3.3	Περιοχές Συστήματος Προσγείωσης.....	59
4.3.4	Διαμερίσματα Μπαταριών.....	60
4.3.5	Δεξαμενές Καυσίμου.....	60
4.3.6	Περιοχές Εκφυγής Καυσαερίων.....	61
4.3.7	Κινητήρες και Καλύμματα Κινητήρων.....	61
4.3.8	Περιοχές Κοινόχρηστων Χώρων.....	62
4.3.9	Περιστρεφόμενοι Μηχανισμοί Ελικοπτέρων.....	62
4.3.10	Διάφορες Περιοχές.....	63
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Πειραματικό Μέρος</b>	
5.1	Σκοπός των Πειραμάτων.....	65
5.2	Μεθοδολογία Πειραμάτων Φυσικής Έκθεσης Δοκιμίων σε Διαβρωτικές Ατμόσφαιρες.....	65
5.2.1	Σύνθεση – Σύσταση & ιδιότητες υλικού.....	65
5.3	Natural Corrosion Test.....	66
5.3.1	Σχεδιασμός Πειραμάτων Ατμοσφαιρικής Διάβρωσης.....	67
5.3.2	Τρόποι Αξιολόγησης Αποτελεσμάτων.....	73
5.4	Η Περιοχή και το Περιβάλλον Έκθεσης των Δοκιμίων.....	74
5.5	Διεξαγωγή Πειράματος.....	75
5.6	Καταγραφή και Αξιολόγηση Μετεωρολογικών Δεδομένων.....	83
5.7	Άνεμοι.....	88
5.8	Ατμοσφαιρικοί Ρύποι στην Περιοχή Έκθεσης.....	89
5.8.1	Συγκέντρωση Cl <sub>2</sub> .....	89
5.8.2	Συγκέντρωση SO <sub>2</sub> .....	90
5.9	Αποτελέσματα.....	91
5.10	Αριθμητικές Μέθοδοι Εκτίμησης Φυσικής Διάβρωσης.....	94
5.11	Αποτελέσματα.....	96
5.12	Πειραματικές Μέθοδοι Επιταχυνόμενης Διάβρωσης.....	98
5.12.1	EXCO Test – Διεξαγωγή του Πειράματος.....	98
5.12.2	Αποτελέσματα.....	107
5.12.3	Modified EXCO Test – Διεξαγωγή του Πειράματος.....	112
5.12.4	Αποτελέσματα.....	122
5.12.5	Alternate Immersion Test – Διεξαγωγή του Πειράματος.....	126
5.12.6	Αποτελέσματα.....	136
5.13	Συγκριτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	140
<b>Παράρτημα Α</b>	<b>Συσκευές και Εξοπλισμός που Χρησιμοποιήθηκε.....</b>	<b>153</b>
<b>Παράρτημα Β</b>	<b>Ολοκλήρωση Διαδικασίας Καθαρισμού Δοκιμίων Διάβρωσης.....</b>	<b>159</b>
<b>Παράρτημα Γ</b>	<b>Εκτίμηση της Διαβρωτικής Προσβολής.....</b>	<b>161</b>

<b>Παράρτημα Δ</b>	Τιμές Μετεωρολογικών Δεδομένων για την Περίοδο Διεξαγωγής Πειράματος Φυσικής Διάβρωσης Δοκιμίων Al 2024-T3.....	165
<b>Παράρτημα Ε</b>	Τιμές Μαθηματικών Μοντέλων Πειραμάτων Διάβρωσης Al 2024-T3.....	168
<b>Παράρτημα ΣΤ</b>	Στερεοσκοπία και Μεταλλογραφία Δοκιμίων Natural Corrosion Test .....	169
<b>Παράρτημα Ζ</b>	Στερεοσκοπία και Μεταλλογραφία Δοκιμίων EXCO Test.....	190
<b>Παράρτημα Η</b>	Στερεοσκοπία και Μεταλλογραφία Δοκιμίων Modified EXCO Test.	211
<b>Παράρτημα Θ</b>	Στερεοσκοπία και Μεταλλογραφία Δοκιμίων Alternate Immersion Test.....	230

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία που συγγράφεται από τους φοιτητές κατά το τελευταίο έτος της φοίτησής τους στη σχολή, αποτελεί την κορύφωση της ακαδημαϊκής τους προσπάθειας. Για την υλοποίησή της ο φοιτητής χρησιμοποιεί όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που απέκτησε κατά την διάρκεια της φοίτησής του. Πάνω σε αυτό το υπόβαθρο, με αμείωτο ενδιαφέρον και κοπιαστική πνευματική εργασία, δομεί το πρώτο συγγραφικό και επιστημονικό έργο της ζωής του. Για πολλούς μπορεί να είναι και το τελευταίο, για άλλους όμως ίσως να είναι η απαρχή μιας συγγραφικής δραστηριότητας. Δεν έχει σημασία ποιό από τα δύο θα συμβεί. Αυτό που μετρά είναι ότι πάνω απ' όλα ο φοιτητής, με το πέρας της εργασίας του, έχει αποκτήσει ποικίλα εφόδια και εμπειρίες που βοηθούν στη μετάβασή του από το στάδιο της εκπαίδευσής του, στο στάδιο της προσφοράς ωφέλιμου έργου στο δύσκολο και απαιτητικό περιβάλλον της αγοράς εργασίας.

Επίσης το γεγονός ότι οι εργασίες παραμένουν στη βιβλιοθήκη της σχολής σαν υποθήκη για τις επόμενες σειρές των φοιτητών, δίνει στον κάθε φοιτητή την αίσθηση της συμμετοχής του στην προσπάθεια επιστημονικής κατάρτησης των επομένων σειρών και την ελπίδα της αξιοποίησης σε πρακτικό επίπεδο της εργασίας του προς όφελος της κοινωνίας στην οποία θα εργαστεί.

Κινούμενος σε αυτό το πλαίσιο σκέψης, έγινε η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος διπλωματικής εργασίας. Αρωγοί και συμπαραστάτες στη δύσκολη πορεία υλοποίησης της παρούσας εργασίας στάθηκαν ορισμένοι άνθρωποι στους οποίους θεωρώ την υποχρέωση να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, όπως είναι ο διευθυντής του εργαστηρίου Υλικών Καθηγητής Δρ. Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος και ο επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός Ν. Δ. Χασιώτης.

ΒΟΛΟΣ ΙΟΥΝΙΟΣ 2005

ΚΑΥΧΙΤΣΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αεροσκάφη κατά την επιχειρησιακή τους ζωή καλούνται να λειτουργήσουν μέσα σε ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών. Η επιλογή των κατασκευαστικών υλικών της δομής των αεροσκαφών γίνεται με βάση αυτό το γνώμονα και με κριτήρια το χαμηλό τελικό τους βάρος, την βέλτιστη αεροδυναμική και αεροελαστική τους συμπεριφορά. Τα κριτήρια αυτά υπαγορεύουν την επιλογή υλικών συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων όπως υψηλή αντοχή, ικανοποιητική κατεργασιμότητα και μικρό ειδικό βάρος.

Παράλληλα όμως πρέπει να ικανοποιείται και η ανάγκη για αντίσταση στη διάβρωση. Δυστυχώς, σε πολλές περιπτώσεις το κριτήριο αυτό αντίκειται στα υπόλοιπα. Στο παρελθόν, κατά τη σχεδίαση των αεροσκαφών, στο συγκεκριμένο κριτήριο δεν δινόταν μεγάλη σημασία. Έτσι το κόστος για την προστασία των κατασκευών αυτών από τη διάβρωση σταδιακά έγινε δυσβάσταχτο, ιδιαίτερα σε περιοχές που το περιβάλλον είναι έντονα διαβρωτικό, όπως είναι η Ελλάδα.

Αυτή η πραγματικότητα οδήγησε σε αναζήτηση νέων μορφών αεροπορικών υλικών είτε συμβατικών (νέοι τύποι μεταλλικών κραμάτων) είτε πρωτοποριακών (σύνθετα υλικά). Ταυτόχρονα έγινε αναθεώρηση της φιλοσοφίας σχεδίασης των α/φων (safe-life σε αντιδιαστολή με fail-safe) και σήμερα παρατηρείται πλέον μια έντονη προσπάθεια προγραμματισμένης και συστηματικής αντιμετώπισης της διάβρωσης συνήθως μέσα από προγράμματα ελέγχου αυτής.

Η εργασία αυτή έχει σαν σκοπό να πραγματοποιήσει δοκιμές φυσικής και επιταχυνόμενης διάβρωσης του αεροπορικού κράματος αλουμινίου 2024-T3 με τελικούς στόχους αφ' ενός να συγκρίνει τα αποτελέσματα των δύο ανωτέρω διαδικασιών και αφ' ετέρου να επιστήσει την προσοχή στους χρήστες πτητικών μέσων για την έγκαιρη ανίχνευση και αντιμετώπιση της διάβρωσης κατά τη συντήρηση των πτητικών μέσων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

#### 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα μέταλλα σπάνια βρίσκονται στη φύση στην καθαρή τους μορφή. Συναντώνται συνήθως ως οξειδία, υδροξείδια, σουλφίδια, πυριτικά, ανθρακικά και νιτρικά άλατα τα οποία είναι αρκετά σταθερές ενώσεις.

Μεγάλα ποσά ενέργειας καταναλίσκονται για την εξαγωγή των βασικών μετάλλων από τις ενώσεις τους, για την τήξη τους, για την ανάμιξή τους προς σχηματισμό κραμάτων και την μορφοποίηση των κραμάτων σε χρήσιμες μηχανολογικές κατασκευές.

Τα περισσότερα καθαρά μέταλλα και κράματα δεν είναι σταθερά, αλλά τείνουν να μεταπέσουν στην φυσική τους κατάσταση αντιδρώντας με στοιχεία στην ατμόσφαιρα για να σχηματίσουν σταθερές ενώσεις. Όταν συμβαίνει αυτό, η μηχανολογική κατασκευή εξασθενεί ή καταστρέφεται και η ενέργεια και τα χρήματα που επενδύθηκαν για την κατασκευή της, χάνονται.

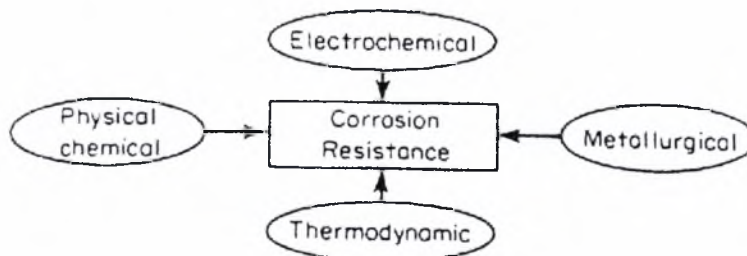
Η σειρά των αντιδράσεων με την οποία τα μέταλλα και κράματα επανέρχονται στη φυσική τους κατάσταση είναι γνωστή ως αντίδραση διάβρωσης και ο ακριβής μηχανισμός που ακολουθείται εξαρτάται από την φύση του μετάλλου ή του κράματος και τις συνθήκες υπό τις οποίες αυτές οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται.

Για λόγους απλότητας θα θεωρηθούν δύο τύποι διάβρωσης:

α. Διάβρωση που περιλαμβάνει μια υγρή φάση, που γίνεται δηλαδή παρουσία ενός αγώγιμου διαλύματος για να βοηθήσει τη μεταφορά των μεταλλικών ιόντων και των ηλεκτρονίων ανάμεσα στην οξειδωτική (ανοδική) πλευρά του μετάλλου και την αναγωγική (καθοδική) πλευρά. Η αντίδραση διάβρωσης είναι επομένως μια ηλεκτροχημική αντίδραση, στην οποία η ανοδική και καθοδική πλευρά μπορεί να είναι περιοχές του ίδιου μετάλλου ή δύο εντελώς διαφορετικά μεταλλικά υλικά σε ηλεκτρική επαφή.

β. Η ξηρή διάβρωση, που περιλαμβάνει μια αντίδραση μεταξύ μετάλλου και αερίου ή ατμού, όπου αμέταλλα όπως οξυγόνο, αλογόνα, υδροθείο ή ατμοί θείου οδηγούν στο σχηματισμό στρώματος (φιλμ) ή στην πραγματοποίηση απολέπισης στην επιφάνεια του μετάλλου χωρίς την παρεμβολή υγρού ηλεκτρολύτη.

Οι αντιδράσεις διάβρωσης μπορούν να γίνουν κατανοητές αν το σύστημα περιγραφεί πλήρως στα πλαίσια της θερμοδυναμικής, της ηλεκτροχημείας, της φυσικοχημείας και των μεταλλουργικών συνθηκών των μετάλλων που μετέχουν όπως φαίνεται στην εικόνα 1-1.



Εικόνα 1-1: Αρχές της επιστήμης που υπεισέρχονται στις αντιδράσεις διάβρωσης [1]

Η θερμοδυναμική βασίζεται στη γνώση της συνθήκης ισορροπίας του συστήματος και χρησιμοποιείται για να δείξει εάν η χημική αντίδραση είναι εφικτή.

Η ηλεκτροχημεία χρησιμοποιείται για να περιγράψει την μεταφορά ηλεκτρονίων στο σύστημα και να καταστήσει δυνατό τον καθορισμό των προϊόντων που παράγονται από τις αντιδράσεις αυτές.

Η μεταλλουργία περιγράφει την εσωτερική δομή των μετάλλων όσον αφορά τους κρυσταλλικούς κόκκους τους, την οριακή δομή των κόκκων και την κατανομή των συστατικών και των φάσεων των κραμάτων που μπορεί να επιδράσουν στις τοπικές ηλεκτροχημικές συνθήκες στην εκτιθέμενη επιφάνεια των μετάλλων.

Τέλος, η φυσικοχημεία παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση της επιφάνειας των αντιδρώντων και έτσι καθίσταται δυνατή η περιγραφή των περιοχών που συμβαίνουν ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα επιχειρηθεί η εξέταση των σημαντικότερων σημείων της μεταλλικής διάβρωσης στα πλαίσια αυτών των τεσσάρων αρχών.

## 1.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Οι χημικές αντιδράσεις που μετέχουν στη διάβρωση λαμβάνουν χώρα αυθόρμητα μόνο εάν υπάρχει η κατάλληλη κινούσα δύναμη.

Σε μια αντίδραση διάβρωσης η κινούσα δύναμη είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας  $\Delta G$  του συστήματος. Εάν είναι αρνητική, υποδηλώνεται απώλεια ή μείωση της ελεύθερης ενέργειας και τότε τα αντιδρώντα τείνουν να αντιδράσουν αυθόρμητα, μεταβάλλοντας την ολική τους ελεύθερη ενέργεια από μια σχετικά υψηλή τιμή σε χαμηλότερη τιμή. Εάν η μεταβολή  $\Delta G$  είναι θετική, η αντίδραση περιλαμβάνει αύξηση της ενέργειας και απαιτείται από το σύστημα επιπρόσθετη ενέργεια από εξωτερική πηγή για να προκληθεί η αντίδραση. Έτσι η μεταβολή  $\Delta G$  μιας αντίδρασης παρέχει ένδειξη της κατεύθυνσης την οποία η αντίδραση τείνει να ακολουθήσει. Εντούτοις, δεν παρέχει καμία πληροφορία για την ταχύτητα της αντίδρασης καθώς η μεταβολή  $\Delta G$  είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο με τον οποίο η αντίδραση πραγματοποιείται.

Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας  $\Delta G$  για μια ηλεκτροχημική αντίδραση, εκφράζεται από την εξίσωση:

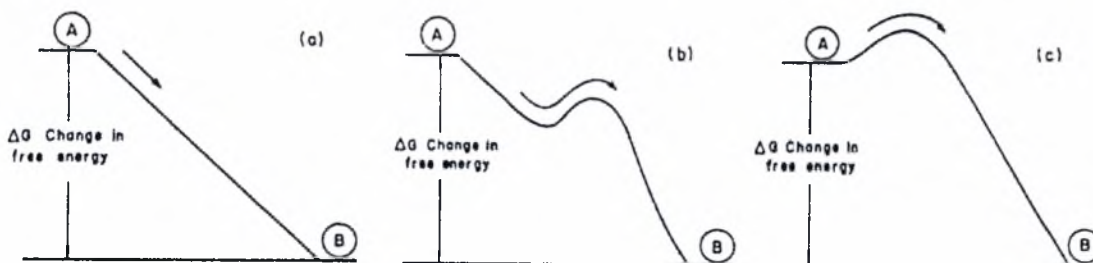
$$\Delta G = -nFE \quad (1)$$

όπου:  $n$  είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μετέχουν στην αντίδραση

$F$  η σταθερά του Faraday και

$E$  το δυναμικό του κελίου, το οποίο θα εξηγηθεί παρακάτω.

Τα παραπάνω γίνονται περισσότερο κατανοητά θεωρώντας το ανάλογο μιας σφαίρας που κυλά προς τα κάτω σε ένα λόφο (εικόνα 1-2α). Εάν η σφαίρα κυλίσει από το σημείο A στο B, η δυναμική της ενέργεια ελαττώνεται και αυτό αναπαριστά τη μείωση της ελεύθερης ενέργειας  $\Delta G$ . Αυτή είναι η αυθόρμητη αντίδραση για το σύστημα, ενώ η αντίθετη αντίδραση απαιτεί προσφορά ενέργειας.



Εικόνα 1-2: Μηχανικό ανάλογο των πιθανών μεταβολών της ελεύθερης ενέργειας σε μια διαβρωτική αντίδραση [2]

Εάν η σφαίρα χρειαστεί να υπερβεί κάποιους λόφους (εικόνα 1-2b) ώστε να καλύψει μακρύτερο δρόμο κυλώντας από το Α στο Β, θα απαιτηθεί περισσότερος χρόνος για να καλύψει το ταξίδι. Έτσι ενώ η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας  $\Delta G$  είναι η ίδια όπως πριν, οι ρυθμοί ταχύτητας της αντίδρασης είναι πιο αργοί.

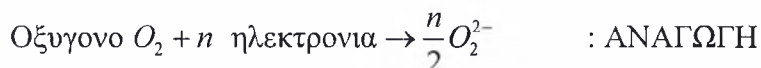
Εάν ένας λόφος βρισκόταν στο δρόμο της σφαίρας (εικόνα 1-2c) ανάμεσα στα σημεία Α και Β, αυτή δεν θα φθάσει ποτέ στο Β αν πρώτα δεν περάσει την κορυφή του λόφου. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας στην κύλιση από το Α στο Β αν και είναι η ίδια όπως πριν, θα πρέπει να προσφερθεί ενέργεια από κάποια εξωτερική πηγή για να επιτραπεί η πραγματοποίηση της αντίδρασης.

Ανάλογες καταστάσεις μπορεί να συμβούν κατά τη διάβρωση, όπου η αντίδραση δεν θα πραγματοποιηθεί εκτός αν προσφερθεί ενέργεια για την υπέρβαση κάποιου φράγματος. Η εξωτερική ενέργεια μπορεί να είναι υπό τη μορφή θερμότητας από τον ήλιο ή τις εξαγωγές του κινητήρα ενός αεροσκάφους ή υπό τη μορφή μηχανικής ενέργειας ως αποτέλεσμα της προστριβής ανάμεσα στα στοιχεία της κατασκευής ώστε να διασπαστούν τα προστατευτικά στρώματα οξειδίου.

### 1.3 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΕΙΑ

#### 1.3.1 ΞΗΡΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΟΞΕΙΔΩΣΗ

Η αντίδραση κατά την οποία ένα μέταλλο ερχόμενο σε επαφή με άτομα ή μόρια αμετάλλου (π.χ. αερίου  $O_2$ ) χάνει ηλεκτρόνια, ονομάζεται οξείδωση. Ταυτόχρονα τα ηλεκτρόνια γίνονται δεκτά από το μετέχον αμέταλλο, το οποίο ανάγεται. Εφόσον επομένως η οξείδωση περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρονίων, μπορεί να θεωρηθεί ηλεκτροχημική διαδικασία. Τα παραπάνω ισχύουν για οποιονδήποτε συνδυασμό μετάλλου–αμετάλλου που μπορεί να καταλήξει στο σχηματισμό χημικής ένωσης με μεταφορά ηλεκτρονίων. Έτσι για την περίπτωση πρόσληψης οξυγόνου από μέταλλο, η ολοκληρωμένη αντίδραση μπορεί να περιγραφεί από δυο χωριστές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται παράλληλα:



Η οξείδωση του μετάλλου, η αναγωγή του αμετάλλου και ο συνδυασμός τους προς σχηματισμό ένωσης, πραγματοποιείται ταυτόχρονα και στην ίδια περιοχή, στην μεταλλική επιφάνεια, και οδηγεί στον σχηματισμό στρώματος οξειδίου ή λεπιδίων.

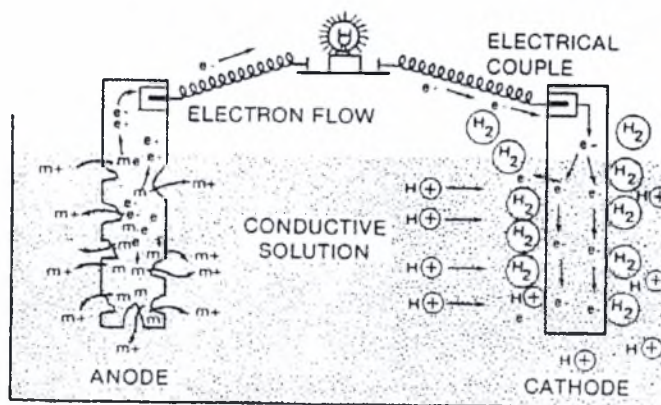
#### 1.3.2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΜΙΑ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ

Τονίστηκε στην αρχή του κεφαλαίου ότι η διάβρωση είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία που περιλαμβάνει την δημιουργία μικροσκοπικών ηλεκτρικών κελίων στην επιφάνεια του μετάλλου.

Η διάβρωση στην οποία μετέχουν υγρά στοιχεία παρέχει συχνά πιο συμβατικές συνθήκες ηλεκτρολυτικών κελίων σε σχέση με την ξηρή διάβρωση, διότι η αντίδραση πραγματοποιείται συνήθως μεταξύ διακριτών ανοδικών τμημάτων όπου παράγονται ηλεκτρόνια, καθοδικών επιφανειών όπου απορροφούνται ηλεκτρόνια και ενός ηλεκτρολύτη που επιτρέπει την διέλευση φορτισμένων σωματιδίων. Κατά την αντίδραση διαλύεται-διαβρώνεται η ανοδική περιοχή, ενώ η καθοδική περιοχή παραμένει ανέπαφη. Οι υπόψη περιοχές μπορεί να είναι τοπικά μικροσκοπικές

επιφάνειες μέσα στο ίδιο κομμάτι μετάλλου ή περιοχές ανόμοιων μεταλλικών ή μη μεταλλικών κατασκευών.

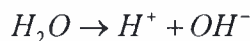
Η ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης απεικονίζεται στην εικόνα 1-3 όπου απεικονίζεται ένα ηλεκτρολυτικό κελί αποτελούμενο από δυο διαφορετικά μέταλλα που το ένα αποτελεί την άνοδο και το άλλο την κάθοδο, συνδεδεμένα με αγώγιμο υλικό και μερικώς εμβαπτισμένα στον ηλεκτρολύτη. Η άνοδος θα διαβρωθεί, εφόσον τα άτομα του μετάλλου που την αποτελεί, εισέρχονται στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη ως θετικά φορτισμένα ιόντα. Ως αποτέλεσμα, ελευθερώνονται ηλεκτρόνια στην άνοδο τα οποία ρέουν διαμέσου του εξωτερικού αγώγιμου υλικού στην κάθοδο. Τούτο πιστοποιείται με μέτρηση της ροής ηλεκτρονίων ή της διαφοράς δυναμικού που προκαλεί την ηλεκτρική ροή. Το δυναμικό που μετρείται σε μια τέτοια περίπτωση, εξαρτάται από το ρεύμα που δημιουργείται στο κελί.



**Εικόνα 1-3:** Τυπικό ηλεκτρολυτικό κελί [3]

Η αντίδραση διάβρωσης μπορεί να διακριθεί σε τρεις ημιαντιδράσεις:

α. Στην αντίδραση του ηλεκτρολύτη που περιλαμβάνει την μερική διάσπαση του νερού:

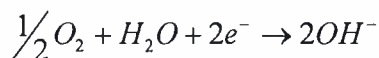


β. Στην άνοδο παράγονται ηλεκτρόνια ( $e^-$ ) κατά την αντίδραση:



όπου  $n$  ο αριθμός ηλεκτρονίων  $e^-$  που απελευθερώνεται για κάθε άτομο της ανόδου που διαβρώνεται.

γ. Στην κάθοδο απορροφούνται ηλεκτρόνια ( $e^-$ ) κατά την αντίδραση:



Ως αποτέλεσμα των υπόψη αντιδράσεων είναι η διάλυση της ανόδου ( $M$ ) στο διάλυμα, ενώ η καθοδική αντίδραση αφήνει το μέταλλο της καθόδου ανέπαφο.

Γενικά τα στοιχεία που πρέπει να είναι παρόντα ταυτόχρονα για την πρόκληση διάβρωσης είναι η άνοδος, η κάθοδος, μια αγώγιμη οδός για τη μεταφορά ηλεκτρονίων και ένας ηλεκτρολύτης ικανός να άγει ιόντα. Εάν οποιοδήποτε από τα παραπάνω στοιχεία απουσιάσει, η διάβρωση διακόπτεται.

Οι ανοδικές και/ή οι καθοδικές επιφάνειες ενός ηλεκτροχημικού κελίου μπορεί να είναι στοιχειώδη εμβαδά εντός της μικροδομής του υλικού που διαφέρουν από το περιβάλλον τους είτε κατά χημικό τρόπο είτε στον τρόπο διάταξης των ατόμων τους. Ως παράδειγμα αναφέρονται τα όρια των κόκκων, τα οποία είναι

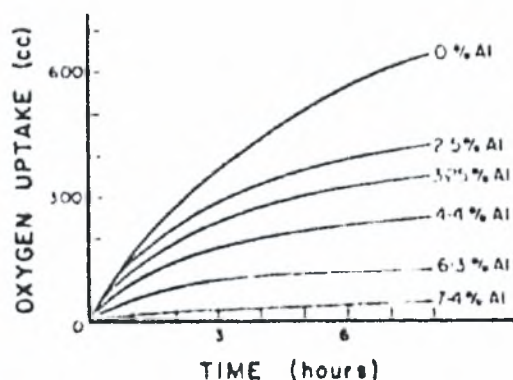
εμπλουτισμένα ή φτωχά σε στοιχεία κραμάτωσης, σε σχέση με τα εσωτερικά των κόκκων και έχουν ακανόνιστη διευθέτηση ατόμων και κατακρημνισμένες ουσίες ή προσμίξεις από μια δεύτερη φάση. Επίσης περιοχές μετάλλων καταπονούμενες σε στρέψη και σε τάση, ως αποτέλεσμα κατεργασιών όπως κοπή ή λείανση, είναι δυνατόν να δράσουν ανοδικά ως προς τις παρακείμενες μη καταπονούμενες περιοχές και συνεπώς να είναι επιρρεπείς σε ηλεκτροχημική διάβρωση υπό τις κατάλληλες συνθήκες.

Αξιοσημείωτες περιπτώσεις είναι επίσης οι κατεργασίες διαμόρφωσης μεταλλικών φύλλων όπως εξέλαση, τύπωση, χάραξη κλπ. που προκαλούν ρωγμές στο φυσικό προστατευτικό στρώμα οξειδίου των μετάλλων που σχηματίστηκε υπό κατάλληλες συνθήκες. Τέτοιες ρωγμές εκθέτουν το μεταλλικό υλικό στην ατμόσφαιρα, όπου υπό την επίδραση καταλλήλων συνθηκών επέρχεται η τοπική ηλεκτροχημική διάβρωση.

Βλάβη σε οποιοδήποτε προστατευτικό στρώμα ή επικάλυψη μπορεί να οδηγήσει σε τοπική διάβρωση του εκτεθειμένου μετάλλου, κατάσταση που γενικώς θεωρείται πιο σοβαρή από την παντελή απουσία προστατευτικού επιστρώματος.

#### 1.4 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ

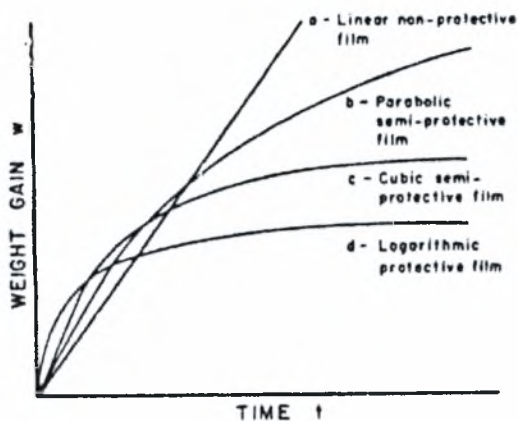
Τα παραγόμενα στρώματα οξειδίου ή λεπίδια κατά τη διάβρωση επηρεάζουν τη διαδικασία της διάβρωσης, εφόσον σχηματίζουν ένα είδος προστατευτικού στρώματος ανάμεσα στο μέταλλο και στο διαβρωτικό περιβάλλον. Τούτο φαίνεται στην εικόνα 1-4, που αναφέρεται στην αντίδραση οξειδοαναγωγής κραμάτων Fe - Al στους 900°C.



Εικόνα 1-4: Εξέλιξη οξειδοαναγωγικής αντίδρασης κραμάτων Fe-Al στους 900°C [2]

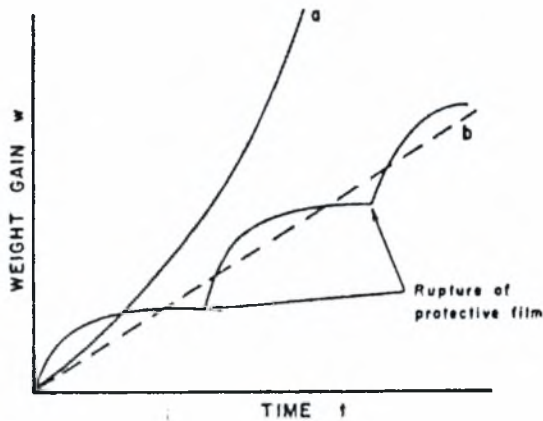
Για κάθε δεδομένο ποσοστό Al ο ρυθμός πρόσληψης  $O_2$  ή ο ρυθμός διάβρωσης, ελαττώνεται με το χρόνο καθώς σχηματίζεται στρώμα οξειδίου που προστατεύει το υποκείμενο μέταλλο. Από την εικόνα 1-4 φαίνεται επίσης ότι η περιεκτικότητα του Fe σε Al ασκεί σημαντική επίδραση στην μείωση του συνολικού βαθμού διάβρωσης. Τούτο οφείλεται στον σχηματισμό προστατευτικού στρώματος  $Al_2O_3$  στις υψηλές περιεκτικότητες σε Al, σε αντίθεση με το οξείδιο του σιδήρου ( $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  ή  $Fe_3O_4$ ) ή σε ανάμικτα λεπίδια οξειδίων Fe-Al που σχηματίζονται στις χαμηλές σε Al περιεκτικότητες. Έτσι, η ταχύτητα αντιδράσεων για την οξείδωση κραμάτων Fe-Al στους 900°C, ποικίλει αναλόγως της περιεκτικότητας σε Al, εμφανίζοντας από παραβολική αύξουσα μεταβολή του ρυθμού στα χαμηλές περιεκτικότητας σε Al κράματα, έως λογαριθμική συμπεριφορά σε υψηλές περιεκτικότητες Al. Οι νόμοι των παραπάνω αυξουσών μεταβολών παριστάνονται γραφικά στην εικόνα 1-5α.

Προβλήματα προκύπτουν όταν τα οξείδια ή γενικότερα τα προϊόντα διάβρωσης αποτυγχάνουν να προστατεύσουν το υποκείμενο μέταλλο οπότε μπορεί να συμβούν οι ακόλουθες καταστάσεις:



**Εικόνα 1-5α:** Νόμοι ταχυτήτων οξείδωσης.

- (α) Γραμμική  $w = kt + k'$
- (β) Παραβολική  $w^2 = kt + k'$
- (γ) Κυβική  $w^3 = kt + k'$
- (δ) Λογαριθμική  $w = k \log(1 + k't)$  [2]



**Εικόνα 1-5β:** Η καμπύλη (α) αντιστοιχεί σε επιταχυνόμενη αντίδραση εξαιτίας ίσως μιας εξώθερμης αντίδρασης. Η καμπύλη (β) αντιστοιχεί σε ψευδογραμμικό ρυθμό εξαιτίας της περιοδικής θραύσης του προστατευτικού στρώματος οξειδίου [2]

- α. Τα οξείδια αντιδρούν χημικά ή ενώνονται με υδρατμούς παράγοντας στρώματα που είναι διαπερατά από το οξυγόνο. Η αντίδραση τότε συνεχίζεται με τον ίδιο ή ελαφρώς μειωμένο βαθμό, όπως φαίνεται στις περιπτώσεις α και β της εικόνας 1-5α.
- β. Ο όγκος του οξειδίου είναι μικρότερος από τον όγκο του μετάλλου από όπου προήλθε, οπότε το οξείδιο αρχικά δεν προσφέρει αρκετή προστασία. Επομένως αναμένεται μια καμπύλη της μορφής β της εικόνας 1-5α.
- γ. Ο όγκος του οξειδίου είναι πολύ μεγαλύτερος από τον όγκο του μετάλλου, οπότε το οξείδιο καταπονείται από υψηλές τάσεις και τείνει να υποστεί ρήξη και πιθανόν αποφλοιώση. Εάν το στρώμα οξειδίου είναι εκ φύσεως προστατευτικό, η ρήξη του στρώματος μπορεί να οδηγήσει σε ρυθμό διάβρωσης περισσότερο γραμμικό παρά λογαριθμικό ή παραβολικό [2]. Τούτο παριστάνεται στην καμπύλη β της εικόνας 1-5β. Ρωγμές και αποφλοιώση μπορεί να συμβούν κατά την διάρκεια θερμοκρασιακών μεταβολών ως αποτέλεσμα της ασυμβατότητας στην μετάδοση της θερμότητας μεταξύ οξειδίου και μετάλλου.
- δ. Το οξείδιο εξατμίζεται ή η αντίδραση είναι εξώθερμη, οπότε η θερμοκρασία αυξάνεται και παρατηρείται επιταχυνόμενος ρυθμός ανάπτυξης του οξειδίου (εικόνα 1-5β, καμπύλη α). Ισοδύναμες καταστάσεις μπορεί να εμφανιστούν όταν κάποιο προϊόν διάβρωσης είναι διαλυτό σε υγρό περιβάλλον.
- ε. Το προστατευτικό στρώμα υπόκειται σε μηχανική φθορά (π.χ. εκτριβή, πρόσκρουση με ξένα σώματα κλπ).

Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι οι ρυθμοί διάβρωσης να μην ελαττωθούν εγκαίρως κατά ένα αναμενόμενο λογαριθμικό τρόπο, αλλά να εμφανιστεί ένας

οποιοσδήποτε από τους νόμους ρυθμών ανάπτυξης που παριστάνονται σχηματικά στην εικόνα 1-5 ή συνδυασμός αυτών.

### 1.5 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΣΕΙΡΑ

Λόγω του μεγάλου αριθμού διαφορετικών ημιστοιχείων κελίου που υπάρχουν, η μέτρηση και καταγραφή σε καταλόγους του συνόλου των δυναμικών των στοιχείων κελίων ή η ηλεκτρεγερτική δύναμη (HEΔ) για καθένα από αυτούς τους συνδυασμούς, αποτελεί μεγάλο εγχείρημα.

Για την απλοποίηση του προβλήματος, καθορίστηκε ως μέτρο το τυποποιημένο ημιστοιχείο κελίου υδρογόνου-λευκόχρυσου σε σχέση με το οποίο όλα τα άλλα δυναμικά μετρούνται. Τα δυναμικά των ημιστοιχείων για μερικές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις σε μοναδιαία ενεργότητα στους 25°C, δίνονται στον πίνακα 1-1. Ο πλήρης κατάλογος τέτοιων δυναμικών για όλα τα μέταλλα παρέχει την ηλεκτροχημική σειρά.

Το δυναμικό ενός κελίου για πολλές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις καθορίζεται από την αλγεβρική διαφορά μεταξύ των δυναμικών των επιμέρους ημιαντιδράσεων των ημιστοιχείων που αποτελούν το κελί για τη συγκεκριμένη αντίδραση.

**Πίνακας 1-1:** Τυπική Σειρά HEΔ Δυναμικών Μετάλλων [4]

	Metal-metal ion equilibrium (unit activity)	Electrode potential vs. normal hydrogen electrode at 25°C, volts
↑ Noble or cathodic	Au-Au <sup>+3</sup>	+1.498
	Pt-Pt <sup>+2</sup>	+1.2
	Pd-Pd <sup>+2</sup>	+0.987
	Ag-Ag <sup>+</sup>	+0.799
	Hg-Hg <sub>2</sub> <sup>+2</sup>	+0.788
	Cu-Cu <sup>+2</sup>	+0.337
	H <sub>2</sub> -H <sup>+</sup>	0.000
	Pb-Pb <sup>+2</sup>	-0.126
	Sn-Sn <sup>+2</sup>	-0.136
	Ni-Ni <sup>+2</sup>	-0.250
	Co-Co <sup>+2</sup>	-0.277
	Cd-Cd <sup>+2</sup>	-0.403
	Fe-Fe <sup>+2</sup>	-0.440
	Cr-Cr <sup>+3</sup>	-0.744
	Zn-Zn <sup>+2</sup>	-0.763
↓ Active or anodic	Al-Al <sup>+3</sup>	-1.662
	Mg-Mg <sup>+2</sup>	-2.363
	Na-Na <sup>+</sup>	-2.714
	K-K <sup>+</sup>	-2.925

Η θερμοκρασία και η συγκέντρωση των αντιδρώντων (ενεργότητα) επηρεάζουν το δυναμικό κάθε κελίου. Όπου τα αντιδρώντα δεν είναι σε μοναδιαία ενεργότητα, το δυναμικό E του κελίου δίνεται από την εξίσωση:

$$E = E_o + 2.3 \frac{RT}{nF} \log \frac{a_{oxid}}{a_{red}} \quad (2)$$

όπου  $E_o$  είναι το τυπικό δυναμικό του ημιστοιχείου,  $R$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία,  $\alpha_{oxid}$  και  $\alpha_{red}$  είναι οι ενεργότητες των οξειδωτικών και των αναγωγικών μελών και  $n$ ,  $F$  καθορίστηκαν προηγουμένως.

Για μηχανολογικούς σκοπούς δεν είναι απαραίτητη η γνώση των αντιδράσεων των ημιστοιχείων και των δυναμικών τους ακριβώς. Η γνώση του ηλεκτροχημικού δυναμικού ενός μετάλλου ή κράματος σε σχέση με ένα άλλο, σε δεδομένο διάλυμα, είναι συνήθως επαρκής για να δώσει την τάση για διάβρωση του συστήματος. Πίνακες όπως ο 1-2 κατασκευάστηκαν για μερικά από τα κοινά βιομηχανικά κράματα. Ένα μεταλλικό υλικό εμφανιζόμενο ψηλά στον πίνακα, δημιουργεί υψηλό (αρνητικό) ηλεκτρικό δυναμικό ως προς ένα δεύτερο μεταλλικό υλικό που βρίσκεται χαμηλότερα στον πίνακα και συνεπώς θα συμπεριφερθεί ανοδικά και θα διαβρωθεί όταν συνδεθεί με το δεύτερο μεταλλικό υλικό και εμβαπτιστεί σε θαλασσινό νερό.

**Πίνακας 1-2: Γαλβανική σειρά μετάλλων και κραμάτων (σε θαλασσινό νερό) [5]**

<b>ANODIC (High Corrosion Potential)</b>
Lithium
Magnesium Alloys
Zinc (plate)
Beryllium
Cadmium (plate)
Uranium (depleted)
Aluminum Alloys
Indium
Tin (plate)
Stainless Steel 430 (active)
Lead
1010 Steel
Cast Iron
Stainless Steel 410 (active)
Copper (plate)
Nickel (plate)
AM 350 (active)
Chromium (plate)
Stainless Steels 350, 310, 301, 304 (active)
Stainless Steels 430 410 (passive)
Stainless Steel 13-8, 17-7PH (active)
Brass, yellow, Naval
Stainless Steel 316L (active)
Bronze 220
Copper 110
Stainless Steel 347 (active)
Copper-Nickel 715
Stainless Steel 202 (active)
Monel 400
Stainless Steel 201 (active)
Stainless Steels 321 316 (active)
Stainless Steels 309 13-8 17-7 PH (passive)
Stainless Steels 304, 301 321 (passive)
Stainless Steels 201 31 6L (passive)
Stainless Steel 286 (active)
AM355 (active)
Stainless Steel 202 (passive)
Carpenter 20 (passive)
AM355 (passive)
Titanium Alloys
AM350 (passive)
Silver
Palladium
Gold
Rhodium
Platinum
Carbon/Graphite
<b>CATHODIC (Low corrosion potential)</b>

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στα ηλεκτροχημικά δυναμικά ανάμεσα σε ανόμοια μεταλλικά υλικά ενός ζεύγους, τόσο μεγαλύτερη είναι η κινούσα δύναμη για διάβρωση και γενικά τόσο ταχύτερη αναμένεται η διαβρωτική προσβολή.



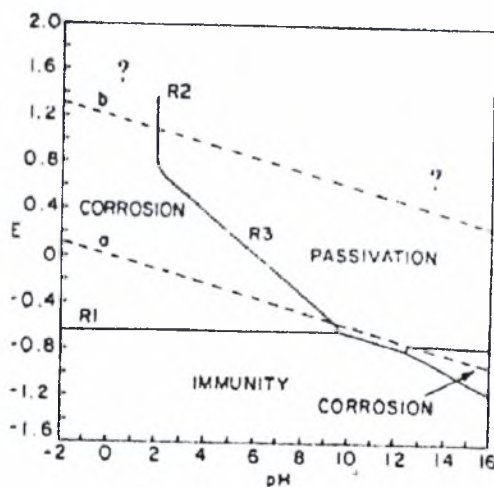
Ωστόσο σε πραγματικές καταστάσεις, ο βαθμός της διαβρωτικής προσβολής επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω. Συνεπώς οι πίνακες 1-1 και 1-2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ως οδηγοί για την πιθανή κατεύθυνση της διάβρωσης. Αντίστροφα τα δυναμικά των ημιστοιχείων των κελίων ή η θερμοδυναμική τους μπορούν να δείξουν τότε η διάβρωση δεν θα συμβεί.

## 1.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ POUURBAIX

Οι διαβρωτικές αντιδράσεις δεν επηρεάζονται μόνο από τα δυναμικά των κελίων αλλά επίσης από την οξύτητα (pH) του ηλεκτρολύτη. Πρακτικά και τα δύο μπορούν να μεταβληθούν ανεξάρτητα. Τα δυναμικά των κελίων μπορούν να μεταβάλλονται συνενώνοντας ανόμοια μεταλλικά υλικά με διαφορετικά δυναμικά ημιστοιχείων ή εφαρμόζοντας ένα εξωτερικό δυναμικό ενώ η συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου μπορεί να προσαρμοστεί με την προσθήκη οξέων ή βάσεων.

Η επίδραση αυτών των μεταβλητών σε χημικές ή ηλεκτροχημικές ισορροπίες παριστάνεται γραφικά χρησιμοποιώντας διαγράμματα Pourbaix, όπου υποδεικνύεται η ισορροπία ανάμεσα σε ένα μέταλλο και ένα υγρό υπό διάφορες συνθήκες δυναμικού και pH. Κάθε διάγραμμα δείχνει συνθήκες υπό τις οποίες ένα μεταλλικό υλικό διαβρώνεται, γίνεται απρόσβλητο, ή αναπτύσσει προστατευτικό συμπαγές στρώμα ώστε να παθητικοποιηθεί. Τα διαγράμματα κατασκευάζονται από υπολογισμούς βασισμένους στη θερμοδυναμική, σύμφωνα με την εξίσωση (2) και σε δεδομένα διαλυτότητας για τα συστατικά που τείνουν να σχηματιστούν χημικά.

Ένα τυπικό διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 1-6 και αποτελείται από γραμμές που αναπαριστούν διαφορετικούς τύπους ισορροπίας. Οι οριζόντιες γραμμές αναπαριστούν αντιδράσεις σε κατάσταση ισορροπίας που περιλαμβάνουν ηλεκτρόνια αλλά είναι ανεξάρτητες του pH.



Εικόνα 1-6: Απλοποιημένο διάγραμμα Pourbaix για Fe στους 25°C [6].

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1-6, η ανοδική αντίδραση που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού μπορεί να προκαλέσει τη διαλυτοποίηση μετάλλου με το σχηματισμό ιόντων στο διαβρωτικό διάλυμα ή το σχηματισμό ενός αδιάλυτου στερεού συστατικού. Στην δεύτερη περίπτωση, όταν το στερεό συστατικό σχηματίζει ένα δυνατά προσκολλημένο και αδιαπέραστο στρώμα στη μεταλλική επιφάνεια, η διαβρωτική αντίδραση αναστέλλεται και το μέταλλο λέγεται ότι παθητικοποιείται.

## 1.7 ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

### 1.7.1 Επιφανειακά φαινόμενα

Όπου η άνοδος είναι μικρή σχετικά με την κάθοδο, συμβαίνει σοβαρή τοπική διάβρωση. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος της καθοδικής προς την ανοδική περιοχή, τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός διάβρωσης. Αντίστροφα, όπου η επιφάνεια της καθόδου είναι μεγάλη και της ανόδου μικρή, ο ρυθμός διάβρωσης γίνεται σημαντικός.

Πρακτική εφαρμογή των παραπάνω αρχών συναντάται στην επιλογή των μηχανολογικών εξαρτημάτων σύνδεσης όπου συχνά η επιφάνεια της περιοχής του εξαρτήματος σύνδεσης είναι μικρή σε σχέση με την επιφάνεια της περιβάλλουσας περιοχής της κατασκευής. Γενικά στα πλαίσια των κριτηρίων επιλογής υλικού για κάποιο εξάρτημα σύνδεσης, ως προϋπόθεση τίθεται να ανταποκριθεί ως κάθοδος στην κατασκευή. Έτσι, τυχόν διάβρωση να ελαχιστοποιηθεί, ως αποτέλεσμα της επαφής μεταξύ του εξαρτήματος και της υπόλοιπης κατασκευής.

### 1.7.2 Διάβρωση λόγω συγκέντρωσης οξυγόνου (O<sub>2</sub>)

Τα κελιά διάβρωσης είναι δυνατόν να ενεργοποιηθούν από τοπικές διαφορές στην σύνθεση ενός ηλεκτρολύτη. Αυτό συμβαίνει συχνά όταν μέρος του ηλεκτρολύτη είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα, και γι' αυτό περιέχει την μέγιστη ποσότητα διαλυμένου O<sub>2</sub>, ενώ κάποιο άλλο μέρος είναι απομονωμένο από την ατμόσφαιρα και μπορεί να γίνει ελλειπές σε O<sub>2</sub> ως αποτέλεσμα των αρχικών σταδίων της οξειδωσης. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται διαφορικός αερισμός και παρατηρείται σε στενή μεταλλική ρωγμή ή κάτω από ασθενώς προσφυόμενα στην μεταλλική επιφάνεια επιστρώματα.

Περιοχές του μεταλλικού υλικού σε επαφή με υγρό που έχει υψηλή συγκέντρωση O<sub>2</sub>, γίνονται καθοδικές και προστατεύονται από διάβρωση, ενώ περιοχές όπου η συγκέντρωση O<sub>2</sub> είναι χαμηλή, γίνονται ανοδικές και διαβρώνονται. Οι ηλεκτροχημικές συνθήκες στις ρωγμές αλλάζουν, λόγω μείωσης του pH που προκύπτει από ηλεκτρόλυση των ιόντων μετάλλου. Τότε το ελαττούμενο περιεχόμενο O<sub>2</sub> τείνει να κάνει την επαναπαθητικοποίηση δυσκολότερη και την διάβρωση πιο σοβαρή.

### 1.7.3 Ηλεκτροχημική διάβρωση μεταξύ των κραματικών φάσεων.

Τοπική διάβρωση παρατηρείται σε μεταλλικά υλικά εξαιτίας προσμίξεων ή σωματιδίων άλλης φάσης με χημικές συνθέσεις και ηλεκτροχημικά δυναμικά διαφορετικά από την κύρια φάση. Εφόσον οι διαφορετικές φάσεις είναι σε ηλεκτρική επαφή μεταξύ τους, με παρουσία ηλεκτρολύτη, θα συμβεί διάβρωση με διάλυση της ανοδικής φάσης.

Εάν η πρόσμιξη είναι πιο ηλεκτραρνητική από την περιβάλλουσα μήτρα, θα αποτελέσει την άνοδο του σχηματιζόμενου κελίου και θα διαβρωθεί. Εφόσον η επιφάνεια της ανοδικής περιοχής είναι μικρή ως προς την κάθοδο, θα πραγματοποιηθεί ταχεία διάβρωση. Εάν οι προσμίξεις είναι σε μορφή μακρόστενων συνεχών ή ημισυνεχών «ράβδων», θα προκύψουν βαθιές διατρύσεις (σημειακές διαβρώσεις). Εάν πάλι είναι συγκεντρωμένες στα όρια των κόκκων, θα προκύψει περικρυσταλλική διάβρωση και εμφάνιση ρωγμών.

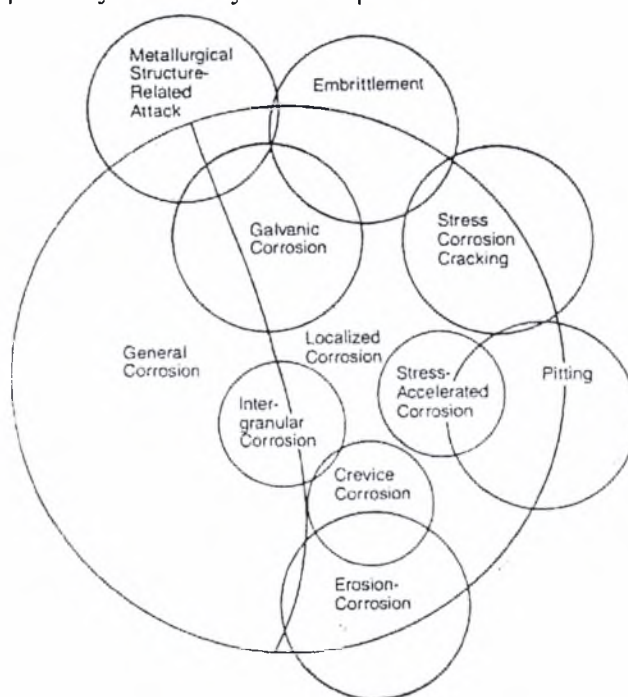
### 1.7.4 Ηλεκτροχημική διάβρωση λόγω μεταβολών στη θερμοκρασία.

Ένα μεταλλικό εξάρτημα μπορεί διαβρωθεί παρουσία ηλεκτρολύτη, εάν είναι εκτεθειμένο σε τοπική θέρμανση η οποία προκαλεί μεταβολές θερμοκρασίας στο

εσωτερικό του μεταλλικού εξαρτήματος. Αυτό προκύπτει από την εξίσωση (2) όπου τα θερμά σημεία θα αναπτύξουν υψηλότερα ηλεκτροδιακά δυναμικά απ' ό,τι οι ψυχρότερες περιοχές, οι δε διαφορές δυναμικού μεταξύ των διαφορετικών περιοχών ενδεχομένως να είναι αρκετά υψηλές ώστε να δημιουργήσουν κελία διάβρωσης. Το φαινόμενο παρατηρείται συνήθως σε εναλλάκτες θερμότητας και βραστήρες αλλά επίσης στις δομικές περιοχές αεροπορικών κατασκευών κοντά στους κινητήρες ή σε περιοχές που θερμαίνονται τοπικά από την ηλιακή ακτινοβολία.

## 1.8 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Οι μορφές διάβρωσης διακρίνονται συμβατικά σε τύπους, των οποίων οι σχέσεις αλληλεπίδρασης απεικονίζονται στην εικόνα 1-7.



Εικόνα 1-7: Σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των τύπων διάβρωσης [7].

### 1.8.1 ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η ομοιόμορφη προσβολή είναι ο πιο κοινός τύπος διάβρωσης. Μπορεί να συμβεί στην ατμόσφαιρα ή άλλα αέρια και μέσα σε ευρύ φάσμα υγρών συμπεριλαμβανομένου και του νερού. Χαρακτηρίζεται από χημική ή ηλεκτροχημική αντίδραση, στην οποία οι άνοδοι και κάθοδοι των ηλεκτρολυτικών κελίων είναι πολυπληθείς, διεσπαρμένοι με υψηλή συγκέντρωση και πυκνότητα πάνω στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού, με συνέπεια η αντίδραση να εξελίσσεται ομοιόμορφα πάνω σε ολόκληρη την εκτιθέμενη επιφάνεια ή πάνω από μια εκτεταμένη περιοχή αυτής. Συνοπτικά η ομοιόμορφη διάβρωση θεωρείται τοπική ηλεκτρολυτική προσβολή που συμβαίνει συστηματικά και ισομερώς σε όλη την επιφάνεια της κατασκευής.

Η ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση αν και αντιπροσωπεύει σημαντικό ποσοστό καταστροφής των μετάλλων με βάση τη μάζα, δεν θεωρείται, από τεχνικής απόψεως, υψηλής επικινδυνότητας, διότι η ζωή του εξοπλισμού μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια βάσει απλών συγκριτικών πειραμάτων. Απλή εμπάπτιση δοκιμίων σε κατάλληλο διαβρωτικό υγρό είναι συνήθως επαρκής.

Στις αεροπορικές κατασκευές, είναι αρκετά συνηθισμένος τύπος διάβρωσης και ιδιαίτερα σε περιοχές του αεροσκάφους όπου υπάρχει συγκέντρωση νερού ή υγρασίας.

Η ομοιόμορφη διάβρωση γενικά δημιουργεί μεγάλες περιοχές καταστροφής και εφόσον η διαβρούμενη περιοχή είναι προσιτή σε οπτική επιθεώρηση, μπορεί συνήθως να εντοπιστεί γρήγορα και να καταπολεμηθεί. Αν όμως συμβαίνει σε κλειστούς εσωτερικούς χώρους ή σε περιοχές δυσπρόσιτες σε οπτική επιθεώρηση, οδηγεί σε σοβαρές ζημιές, εκτός αν ανιχνευθούν έγκαιρα με χρήση μη καταστροφικών μεθόδων επιθεώρησης, όπως ακτίνες X (X-Rays), ή υπέρηχοι (ultrasonic), και γίνουν έγκαιρα ενέργειες αποκατάστασης των ζημιών.

Τα περισσότερα μέταλλα και κράματα παράγουν χαρακτηριστικά προϊόντα διάβρωσης που επιτρέπουν τη γρήγορη αναγνώρισή της. Τα προϊόντα διάβρωσης των κραμάτων αλουμινίου συναντώνται ως αποθέσεις λευκής ή γκρι σκόνης, αφράτης και σπειρωτής υφής. Η έγκαιρη αναγνώριση της διάβρωσης των υπόψη κραμάτων είναι σημαντική και συχνά οι πρώτες ενδείξεις είναι ο εκφυλισμός του επιφανειακού τελειώματος (φινιρίσματος).

### 1.8.2 ΓΑΛΒΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Μεταξύ δύο ανόμοιων μετάλλων, όταν εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό ή αγώγιμο διάλυμα, συνήθως αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού. Εάν τα μέταλλα έλθουν σε επαφή, τότε η προσβολή του λιγότερο ανθεκτικού σε διάβρωση μετάλλου, συνήθως αυξάνει, ενώ η προσβολή του ανθεκτικότερου υλικού ελαττώνεται, σε σχέση με τη συμπεριφορά των ίδιων μετάλλων όταν δεν είναι σε επαφή. Το λιγότερο ανθεκτικό μέταλλο καθίσταται ανοδικό και το ανθεκτικότερο μέταλλο, καθοδικό. Συνήθως τότε, η κάθοδος ή το καθοδικό μέταλλο διαβρώνεται ελάχιστα ή καθόλου. Αυτή η μορφή ηλεκτροχημικής διάβρωσης ονομάζεται γαλβανική.

Καθώς τα περισσότερα μηχανολογικά υλικά είναι κράματα, τα γαλβανικά ζεύγη συνήθως περιλαμβάνουν μεταλλικά κράματα. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι γαλβανικές σειρές που απεικονίζονται στον πίνακα 1-3 οδηγούν σε περισσότερο ακριβείς προβλέψεις των γαλβανικών σχέσεων από ότι οι σειρές ΗΕΔ. Ο πίνακας 1-3 βασίζεται σε μετρήσεις δυναμικών και πειράματα γαλβανικής διάβρωσης σε καθαρό θαλάσσιο νερό. Εξαιτίας των διαφοροποιήσεων μεταξύ των πειραμάτων φαίνονται περισσότερο οι σχετικές θέσεις των μεταλλικών υλικών παρά τα δυναμικά τους. Θεωρητικά, απαιτούνται παρόμοιες σειρές για τα μέταλλα και τα κράματα τους σε όλα τα είδη περιβάλλοντος σε διάφορες θερμοκρασίες, αλλά αυτό θα απαιτούσε ένα σχεδόν αόριστο αριθμό πειραμάτων.

Ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτών των γαλβανικών σειρών είναι οι αγκύλες που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα. Τα κράματα που ομαδοποιήθηκαν στις αγκύλες αυτές, είναι περίπου όμοια στη βασική τους σύνθεση. Η αγκύλη δηλώνει ότι στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές υπάρχει μικρός κίνδυνος γαλβανικής διάβρωσης εάν τα μεταλλικά υλικά σε μια δοθείσα αγκύλη συνδεθούν ή έλθουν σε επαφή μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υπόψη υλικά είναι κοντά στη σειρά και το δημιουργούμενο δυναμικό μεταξύ των ζευγών είναι μικρό. Όσο μεγαλύτερη η απόσταση των υλικών στη σειρά, τόσο μεγαλύτερο το δημιουργούμενο δυναμικό. Απουσία πραγματικών πειραμάτων σε δοθέν περιβάλλον, η γαλβανική σειρά παρέχει ικανοποιητική ένδειξη των δυνατών γαλβανικών αποτελεσμάτων.

**Πίνακας 1-3: Γαλβανική Σειρά Μετάλλων και Κραμάτων τους [8]**

↑ Noble or cathodic	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)
	Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)
	18-8 Mo stainless steel (passive)
	18-8 stainless steel (passive)
	Chromium stainless steel 11-30% Cr (passive)
↓ Active or anodic	Inconel (passive) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)
	Nickel (passive)
	Silver solder
	Monel (70 Ni, 30 Cu)
	Cupronickels (60-90 Cu, 40-10 Ni)
	Bronzes (Cu-Sn)
	Copper
	Brasses (Cu-Zn)
	Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)
	Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)
Inconel (active)	
Nickel (active)	
Tin	
Lead	
Lead-tin solders	
18-8 Mo stainless steel (active)	
18-8 stainless steel (active)	
Ni-Resist (high Ni cast iron)	
Chromium stainless steel, 13% Cr (active)	
Cast iron	
Steel or iron	
2024 aluminum (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)	
Cadmium	
Commercially pure aluminum (1100)	
Zinc	
Magnesium and magnesium alloys	

Το δυναμικό που δημιουργείται σε ένα γαλβανικό κελί αποτελούμενο από ανόμοια μέταλλα μεταβάλλεται χρονικά. Το δημιουργούμενο δυναμικό προκαλεί ροή ρεύματος και συνεπώς διάβρωση στο ανοδικό ηλεκτρόδιο. Καθώς εξελίσσεται η διάβρωση, προϊόντα της διάβρωσης μπορεί να συσσωρευτούν είτε στην άνοδο είτε στην κάθοδο είτε και στα δυο. Αυτό μειώνει την ταχύτητα εξέλιξης της διάβρωσης.

Διάβρωση λόγω γαλβανικών φαινομένων είναι συνήθως εντονότερη κοντά στις συνδέσεις εξαρτημάτων, με την προσβολή να μειώνεται αυξανόμενης της απόστασης από την περιοχή σύνδεσης. Η επηρεαζόμενη απόσταση εξαρτάται από την αγωγιμότητα του δ/τος.



**Εικόνα 1-8: Γαλβανική Προσβολή λόγω Ανόμοιων Μετάλλων σε Αεροπορική Κατασκευή**

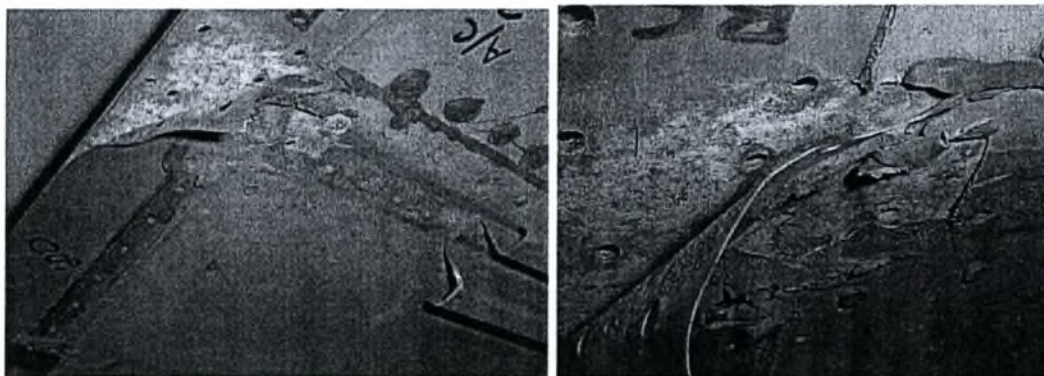
Στις αεροπορικές κατασκευές, το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διάβρωση στις οπές συνδέσεων σε επικαλύψεις κραμάτων αλουμινίου ή μαγνησίου όταν χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι κοχλίες ή ήλοι (εικόνα 1-8).

Γενικά όσο μεγαλύτερη η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ανόμοιων μεταλλικών υλικών σε ένα γαλβανικό κελί τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός της χημικής προσβολής. Γι' αυτό οι προσπάθειες επικεντρώνονται στην αποφυγή επαφής διαφορετικών μεταλλικών υλικών, τοποθετώντας μονωτικό υλικό, συνήθως διαχωριστικό παρέμβυσμα (sealant) ή συνδυασμούς διαχωριστικών μεταξύ των δύο μερών πριν να συναρμολογηθούν.

Μια σημαντική παρατήρηση που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση, είναι ότι η γαλβανική διάβρωση είναι σοβαρή όταν η επιφάνεια της ανόδου είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με της καθόδου. Αντιθέτως η διάβρωση είναι ελάχιστη αν η επιφάνεια της ανόδου είναι μεγάλη συγκρινόμενη με της καθόδου. Έτσι σε περιπτώσεις συνδυασμού συνδέσμων-επικάλυψης, θα συμβεί πιο σοβαρή διάβρωση αν οι σύνδεσμοι είναι η άνοδος και η επικάλυψη η κάθοδος.

### 1.8.3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΤΑ ΔΙΑΚΕΝΑ

Έντονη τοπική διάβρωση μπορεί να συμβεί μέσα σε διάκενα μεταλλικών επιφανειών που εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον. Αυτή η μορφή προσβολής οφείλεται συνήθως σε μικρά ποσά λιμναζόντων διαλυμάτων που δημιουργούνται σε «τυφλές» οπές, σε επιφάνειες παρεμβυσμάτων, σε συνδέσεις επιφανειών με εναποθέσεις ελασμάτων και σε διάκενα κάτω από κοχλίες, παξιμάδια, κεφαλές ήλων (πριτσινιών) κλπ. Η μορφή αυτή της διάβρωσης λέγεται διάβρωση στα διάκενα (crevice corrosion) (εικόνα 1-9).



**Εικόνα 1-9:** Διάβρωση σε διάκενα αεροπορικών κατασκευών

Ουσίες που συμβάλουν σε αυτή την μορφή της διάβρωσης είναι άμμος, ακαθαρσίες, προϊόντα διάβρωσης και άλλα στερεά. Οι ουσίες ενεργούν ως φράγμα και δημιουργούν κατάσταση λίμνασης διαλυμάτων. Η επαφή μεταξύ μεταλλικών και μη μεταλλικών επιφανειών μπορεί επίσης να προκαλέσει διάβρωση στα διάκενα, όπως στην περίπτωση ενός παρεμβύσματος (gasket, sealant, packing κλπ).

Για να ενεργήσει ως περιοχή διάβρωσης ένα διάκενο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέψει την είσοδο υγρού αλλά αρκετά στενό ώστε να διατηρήσει μια λιμνάζουσα ζώνη. Έτσι, αυτή η μορφή της διάβρωσης συνήθως παρατηρείται σε ανοίγματα πλάτους μερικών χιλιοστών του μέτρου ή λιγότερο, ενώ συναντάται σπάνια σε μεγάλες οπές ή σχισμές.

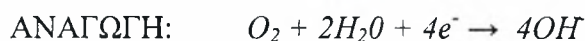
#### 1.8.3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΑΚΕΝΑ

Παλαιότερα υπήρχε η αντίληψη ότι η διάβρωση στα διάκενα οφείλονταν απλά στις διαφορές συγκέντρωσης του μεταλλικού ιόντος ή του οξυγόνου ανάμεσα στο

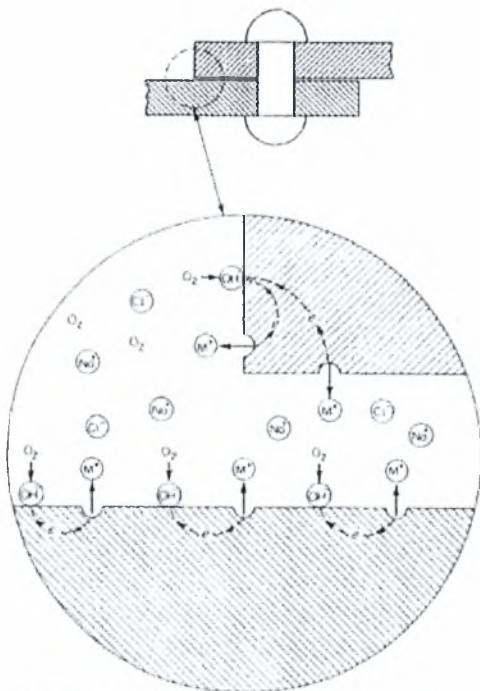
διάκενο και στις παρακείμενες περιοχές [9]. Πιο πρόσφατες μελέτες όμως απέδειξαν [10] ότι αν και όντως υπάρχουν οι παραπάνω διαφορές, αυτές δεν αποτελούν τις βασικές αιτίες της διάβρωσης.

Για την κατανόηση του βασικού μηχανισμού της διάβρωσης στα διάκενα, έστω ένα ηλωμένο έλασμα από μέταλλο  $M$  εμβαπτισμένο σε θαλασσινό νερό ( $pH = 7$ ) όπως φαίνεται στην εικόνα 1-10. Η ολοκληρωμένη αντίδραση περιλαμβάνει την διαλυτοποίηση του μετάλλου  $M$  και την αναγωγή του οξυγόνου σε ιόντα υδροξυλίου.

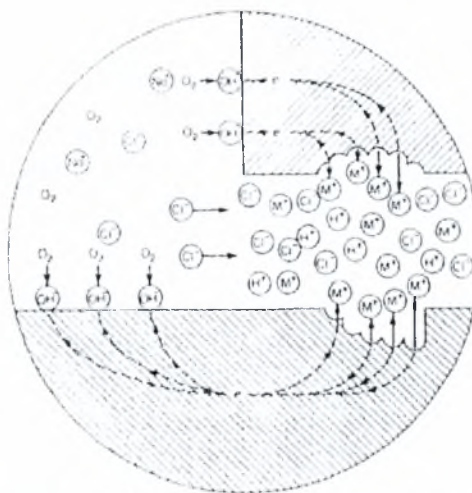
Έτσι:



Αρχικά οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται ομοιόμορφα πάνω σε ολόκληρη την επιφάνεια συμπεριλαμβανομένου και του εσωτερικού του διακένου. Η αρχή διατήρησης του φορτίου ισχύει στο μέταλλο και στο διάλυμα. Κάθε ηλεκτρόνιο που παράγεται κατά το σχηματισμό ενός μεταλλικού ιόντος καταναλώνεται αμέσως από την αντίδραση αναγωγής του οξυγόνου. Επίσης ένα υδροξυλίων παράγεται για κάθε μεταλλικό ιόν στο διάλυμα.



**Εικόνα 1-10:** Αρχικό στάδιο διάβρωσης στα διάκενα [11]



**Εικόνα 1-11:** Προχωρημένο στάδιο διάβρωσης στα διάκενα [11]

Σύντομα το οξυγόνο μέσα στο διάκενο λιγοστεύει εξαιτίας της περιορισμένης μεταφοράς, οπότε η αναγωγή του οξυγόνου παύει στην περιοχή. Τούτο από μόνο του δεν προκαλεί αλλαγή στη διαβρωτική συμπεριφορά. Εφόσον όμως η περιοχή μέσα στο διάκενο είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την εξωτερική περιοχή, ο συνολικός βαθμός της αναγωγής του οξυγόνου παραμένει σχεδόν αμετάβλητος. Γι' αυτό ο βαθμός της διάβρωσης με και χωρίς το διάκενο παραμένει σταθερός.

Η μείωση του οξυγόνου έχει μια σημαντική έμμεση επίδραση η οποία γίνεται περισσότερο αισθητή αυξανομένης της έκθεσης. Μετά τη μείωση του οξυγόνου δεν πραγματοποιείται περαιτέρω αναγωγή του οξυγόνου αν και η διάλυση του μετάλλου  $M$  εξακολουθεί να πραγματοποιείται, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-11. Τείνει έτσι να δημιουργηθεί περίσσεια θετικού φορτίου στο διάλυμα ( $M^+$ ) το οποίο εξισορροπείται

αναγκαστικά με την μετακίνηση ιόντων χλωρίου στο διάκενο. Υδροξύλια επίσης μετακινούνται από την περιφέρεια αλλά επειδή έχουν μικρότερη ταχύτητα από τα χλωριόντα, μετακινούνται πιο αργά. Ως αποτέλεσμα, εμφανίζεται αυξημένη συγκέντρωση χλωριδίου μέσα στο διάκενο. Εκτός από τα αλκάλια, μεταλλικά άλατα συμπεριλαμβανομένου των χλωριδίων και σουλφιδίων υδρολύονται προς νερό:



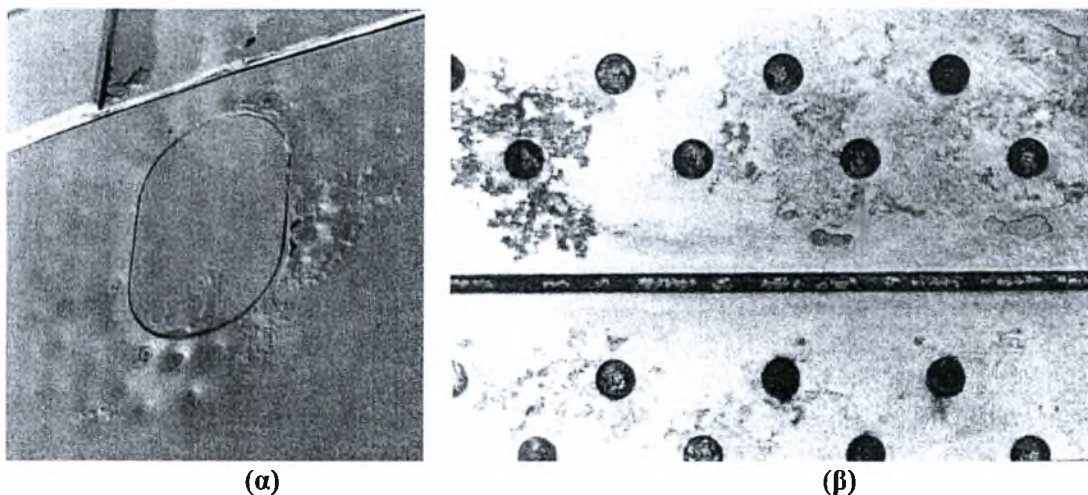
Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι υδατικό διάλυμα ενός τυπικού μεταλλικού άλατος χλωριδίου διασπάται σε αδιάλυτο υδροξείδιο και αέριο οξύ. Έχει διαπιστωθεί ότι τα ιόντα χλωριδίου και υδρογόνου επιταχύνουν τους ρυθμούς διάλυσης των περισσοτέρων μετάλλων και κραμάτων. Και τα δύο είναι παρόντα στο διάκενο ως αποτέλεσμα της μετακίνησης και της υδρόλυσης. Συνεπώς ο ρυθμός διαλυτοποίησης του Μ αυξάνει όπως φαίνεται στην εικόνα 1-11. Η αύξηση στη διαλυτοποίηση αυξάνει την μετακίνηση και το αποτέλεσμα είναι μια επιταχυνόμενη (αυτοκαταλυτική) με υψηλούς ρυθμούς διαδικασία. Καθώς η διάβρωση μέσα στο διάκενο αυξάνει, ο βαθμός της αναγωγής του οξυγόνου των παρακείμενων επιφανειών επίσης αυξάνει, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-11, με αποτέλεσμα να προστατεύονται καθοδικά οι εξωτερικές επιφάνειες. Έτσι, κατά τη διάβρωση στα διάκενα, η προσβολή περιορίζεται μέσα στα διάκενα ενώ οι υπολοιπούμενες επιφάνειες υπόκεινται σε μικρή ή αμελητέα ζημιά.

Μεταλλικά υλικά που η αντίστασή τους σε διάβρωση εξαρτάται από στρώματα οξειδίου ή παθητικά στρώματα είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε διάβρωση στα διάκενα. Αυτά τα στρώματα καταστρέφονται από υψηλές συγκεντρώσεις χλωριδίων ή ιόντων υδρογόνου και ο ρυθμός διάλυσής τους αυξάνει αξιοσημείωτα.

#### 1.8.4 ΝΗΜΑΤΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η νηματοειδής διάβρωση αποτελεί ειδικό τύπο διάβρωσης στα διάκενα. Έχει παρατηρηθεί σε επιφάνειες αλουμινίου καλυμμένες με οργανικές βαφές.

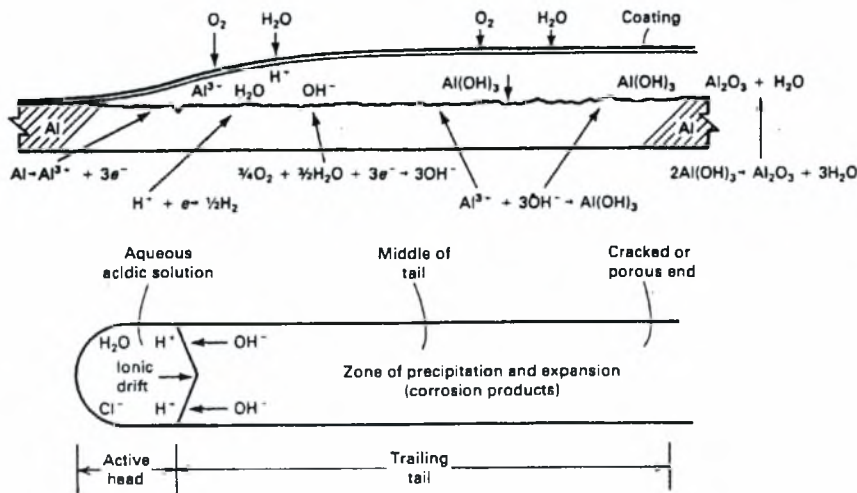
Αυτή η μορφή διάβρωσης μπορεί να γίνει αρκετά σοβαρή πριν να ανιχνευθεί, καθώς συχνά καλύπτεται είτε από προστατευτικά στρώματα ή χρώμα, γι' αυτό και συχνά αναφέρεται ως διάβρωση υποστρώματος. Τυπικό παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 1-12α, όπου οι φουσκάλες (blisters) του χρώματος συγκεντρώθηκαν γύρω από τις οπές των ήλων σε ένα φύλλο κράματος αλουμινίου.



Εικόνα 1-12: Νηματοειδής διάβρωση σε αεροπορικές κατασκευές [3]



Αναγνωρίζεται από το χαρακτηριστικό νηματοειδές ίχνος των προϊόντων διάβρωσης κάτω από το στρώμα βαφής (εικόνα 1-12β). Εμφανίζεται κυρίως όταν η υγρασία του αέρα είναι 78% - 90% και η επιφάνεια ελαφρά όξινη. Η διάβρωση αρχίζει στις ρωγμές του επιχρίσματος/χρώσης και προχωρά κάτω από το επίχρισμα/χρώση λόγω της διάχυσης της υγρασίας και του οξυγόνου από τον αέρα. Επίσης μπορεί να αρχίσει σε περιοχή σημειακής διάβρωσης από κάποιο βελονισμό (pit), αλλά αντί να εξελιχθεί σε βάθος στο μέταλλο, αναπτύσσεται πλαγίως και δημιουργεί νηματοειδείς γραμμές διάβρωσης στην επιφάνεια της κατασκευής, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1-13.



Εικόνα 1-13: Μηχανισμός νηματοειδούς διάβρωσης [12]

Εάν η νηματοειδής διάβρωση δεν εντοπιστεί και αντιμετωπιστεί έγκαιρα αλλά η επιφάνεια καλυφθεί με επιπλέον προστατευτικό επίστρωμα, η διάβρωση μπορεί να εξελιχθεί σε περικρυσταλλική, ιδιαίτερα γύρω από περιοχές και «ραφές» σύνδεσης.

Στις αεροπορικές κατασκευές συνήθως απαντάται σε προστατευμένα κράματα αλουμινίου, με κάποια μορφή επιμετάλλωσης, όπου η αρχική σημειακή διάβρωση διεισδύει στην προστασία και κατόπιν μεταβάλλει διεύθυνση από τους υποκείμενους κόκκους και εξαπλώνεται παράλληλα με την επιφάνεια σε πολλαπλά περιστρεφόμενα νημάτια (εικόνα 1-14). Βρίσκεται επίσης κάτω από οργανικά προστατευτικά στρώματα - όπως χρώματα - και αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας της εισχώρησης της υγρασίας μεταξύ των βαμμένων επιφανειών υπό συνθήκες έντονης υγρασίας και υψηλών περιβαλλοντικών θερμοκρασιών. Έχει παρατηρηθεί επίσης ότι η διάβρωση αρχίζει στις οπές των συνδέσεων, όπου το μέταλλο είναι απροστάτευτο και μετά επεκτείνεται κατά μήκος της επιφάνειας της επικάλυψης και κάτω από το χρώμα.



Εικόνα 1-14: Νηματοειδής διάβρωση σε αεροπορική κατασκευή

Μπορεί να αντιμετωπιστεί τοποθετώντας το πτητικό μέσο σε περιβάλλον με σχετική υγρασία κάτω από 70%, χρησιμοποιώντας βαφές/χρώματα με μικρό βαθμό διάχυσης οξυγόνου και υδρατμών και πλένοντας το μέσο ώστε να απομακρυνθούν τα όξινα συστατικά από τις επιφάνειες (π.χ. οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, χλωρίδια).

#### 1.8.5 ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η σημειακή διάβρωση (pitting corrosion) αποτελεί μορφή ιδιαίτερα έντονης τοπικής προσβολής που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό οπών στο μέταλλο που λέγονται βελονισμοί (pits) ή τρύμματα. Οι οπές είναι συνήθως μικρής διαμέτρου. Τα στίγματα των οπών μπορεί να είναι απομονωμένα ή τόσο κοντά μεταξύ τους ώστε να σχηματίζουν τραχείες επιφάνειες.

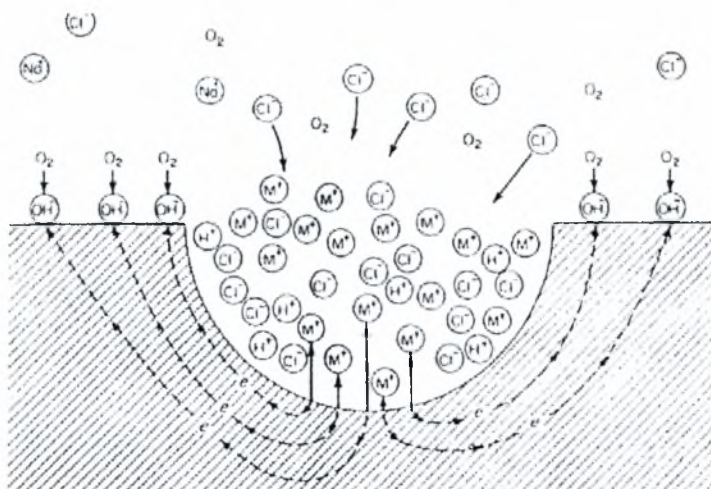
Πρόκειται για μια από τις πλέον καταστροφικές μορφές διάβρωσης. Προκαλεί την αστοχία του εξοπλισμού εξαιτίας διάτρησης με πολύ μικρή απώλεια βάρους της όλης κατασκευής. Ο εντοπισμός των στιγμάτων είναι γενικά δύσκολος αφενός λόγω του μικρού τους μεγέθους, αφετέρου επειδή συνήθως καλύπτονται με προϊόντα διάβρωσης. Επιπρόσθετα, η ποσοτική μέτρηση και σύγκριση της έκτασης της προσβολής είναι δυσχερής εξαιτίας του διαφορετικού βάθους και πλήθους των σχηματιζομένων στιγμάτων κάτω από όμοιες συνθήκες.

Τα τρύμματα συνήθως εξελίσσονται κατά τη διεύθυνση της βαρύτητας. Τα περισσότερα αναπτύσσονται κατακόρυφα σε οριζόντιες επιφάνειες. Μικρότερος αριθμός ξεκινά από κατακόρυφες επιφάνειες και σπάνια εξελίσσονται με φορά προς τα πάνω από τη βάση οριζόντιων επιφανειών. Η σημειακή διάβρωση χρειάζεται σημαντική περίοδο μέχρι να γίνει ορατά αντιληπτή. Η περίοδος εξαρτάται από το είδος του μετάλλου και το περιβάλλον. Εφόσον όμως αρχίσει, ο βελονισμός εισχωρεί στο μέταλλο με ταχύ ρυθμό.

Το τρύμμα από διάβρωση είναι προϊόν ενός μοναδικού τύπου ανοδικής αντίδρασης. Πρόκειται για μια αυτοκαταλυτική διαδικασία, δηλαδή οι διαδικασίες διάβρωσης μέσα στο τρύμμα δημιουργούν συνθήκες που ευνοούν και είναι απαραίτητες για την συνεχιζόμενη δραστηριότητα εντός του τρύμματος. Τούτο παριστάνεται σχηματικά στην εικόνα 1-15.

Όπως φαίνεται, ένα μέταλλο Μ υφίσταται σημειακή διάβρωση σε αεριζόμενο διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Μέσα στο τρύμμα πραγματοποιείται ταχεία διάβρωση, ενώ στις παρακείμενες επιφάνειες λαμβάνει χώρα αναγωγή του οξυγόνου. Η διαδικασία είναι αυτοπροωθούμενη και αυτοαναπαραγόμενη καθώς η ταχεία διάλυση του μετάλλου μέσα στο τρύμμα τείνει να παράγει περίσσεια θετικού φορτίου στην περιοχή, με αποτέλεσμα απελευθέρωση χλωριούχων ιόντων για τη διατήρηση της ηλεκτροουδετερότητας. Επομένως στο τρύμμα παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση  $MCl$  και υψηλή συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου, ως αποτέλεσμα της υδρόλυσης. Τόσο τα ιόντα του υδρογόνου όσο και του χλωρίου, προάγουν την διάβρωση των περισσότερων μετάλλων και κραμάτων και όλη η διαδικασία επιταχύνεται με το χρόνο. Εφόσον η διαλυτότητα του οξυγόνου είναι σχεδόν μηδενική σε συμπυκνωμένα διαλύματα, μέσα στο τρύμμα δε συμβαίνει αναγωγή οξυγόνου.

Αντίθετα η αναγωγή του καθοδικού οξυγόνου πάνω στις παρακείμενες επιφάνειες των τρυμμάτων τείνει να καταστείλει τη διάβρωση. Υπό μια έννοια, τα τρύμματα προστατεύουν καθοδικά την υπόλοιπη επιφάνεια του μετάλλου.



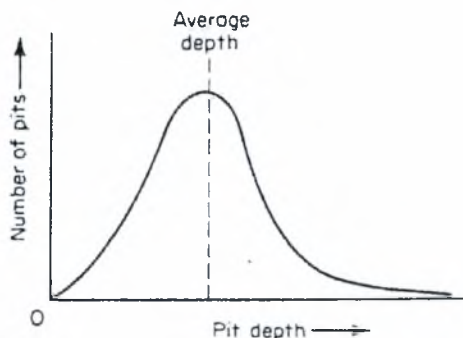
**Εικόνα 1-15:** Αυτοκαταλυτική διεργασία της σημειακής διάβρωσης [13]

Αν και η εικόνα 1-15 υποδεικνύει το μηχανισμό με τον οποίο ένα τρύμμα αυξάνεται μέσω αυτοπροώθησης, δεν δείχνει εμφανώς την έναρξη της διαδικασίας. Τούτο είναι δυνατόν να δείχθει θεωρώντας τμήμα του μετάλλου  $M$ , απαλλαγμένο από οπές ή τρύμματα, εμβαπτισμένο σε αεριζόμενο διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Αν για οποιοδήποτε λόγο ο ρυθμός της διάβρωσης του μετάλλου είναι στιγμιαία υψηλός σε ένα συγκεκριμένο σημείο, ιόντα χλωρίου θα απελευθερωθούν σε εκείνο το σημείο. Εφόσον το χλώριο προάγει την διάβρωση, η αλλαγή αυτή τείνει να δημιουργήσει συνθήκες ευνοϊκές για περαιτέρω ταχεία διάβρωση στο υπόψη σημείο. Τοπικά, η προσβολή μπορεί να είναι στιγμιαία υψηλή εξαιτίας μιας επιφανειακής ρωγμής ή άλλου ελαττώματος ή τυχαίων αλλαγών στη σύνθεση του διαλύματος. Είναι προφανές ότι κατά την έναρξη ή τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης ενός τρύμματος οι συνθήκες είναι μάλλον ασταθείς. Η υψηλή συγκέντρωση ιόντων χλωρίου και υδρογόνου τοπικά μπορεί να παρασυρθεί από ρεύματα μέσα στο διάλυμα εφόσον δεν υπάρχει κάποια προστατευτική κοιλότητα του τρύμματος. Έχει παρατηρηθεί ότι τα νέα τρύμματα είναι όντως ασταθή και πολλά γίνονται ανενεργά μετά από ολιγόλεπτη ανάπτυξη [13].

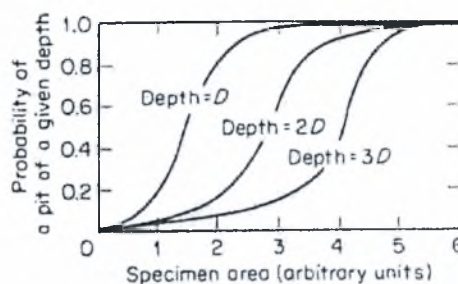
Η επίδραση της βαρύτητας όπως αναφέρθηκε, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αυτοκαταλυτική φύση της τρυμματικής διάβρωσης. Εφόσον το πυκνό διάλυμα μέσα στο τρύμμα είναι απαραίτητο για τη συνεχιζόμενη δραστηριότητά του, τα τρύμματα είναι κατεξοχήν σταθερά όταν αναπτύσσονται κατά τη διεύθυνση της βαρύτητας. Επίσης τα τρύμματα γενικά αρχίζουν να παρουσιάζονται στις ανώτερες επιφάνειες των δειγμάτων γιατί τα ιόντα χλωρίου συγκρατούνται ευκολότερα κάτω από τις συνθήκες αυτές.

Καθώς η σημειακή διάβρωση αποτελεί εντοπισμένο τύπο διάβρωσης, τα συμβατικά πειράματα απώλειας βάρους δεν αποτελούν τις πλέον ενδεδειγμένες μεθόδους για υπολογιστικούς ή συγκριτικούς σκοπούς. Η απώλεια μετάλλου είναι πολύ μικρή και δε δείχνει το βάθος διείσδυσης. Περισσότερο ενδείκνυνται οι μετρήσεις του βάθους του τρύμματος. Εντούτοις η μέτρηση της απώλειας βάρους αποτελεί αρκετά συχνά εφαρμοζόμενη μέθοδο καθώς οι μετρήσεις του βάθους του τρύμματος είναι περίπλοκες λόγω του ότι υπάρχει στατιστική διαφοροποίηση στα βάθη των τρυμμάτων σε ένα δείγμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-16. Να σημειωθεί ότι το μέσο τρυμματικό βάθος είναι ανεπαρκής τρόπος υπολογισμού της φθοράς, διότι η ζημιά προκαλείται από το βαθύτερο τρύμμα.

Από την εικόνα 1-16 προκύπτει ότι η μέτρηση του μέγιστου τρυμματικού βάθους είναι περισσότερο αξιόπιστος τρόπος έκφρασης της σημειακής διάβρωσης. Ωστόσο, τέτοιες μετρήσεις δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της ζωής του εξοπλισμού, αφού το τρυμματικό βάθος είναι επίσης συνάρτηση του μεγέθους του δείγματος.



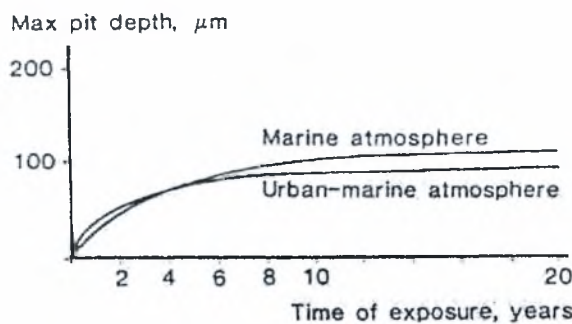
**Εικόνα 1-16:** Σχέση τρυμματικού βάθους και αριθμού τρυμμάτων [13]



**Εικόνα 1-17:** Σχέσεις βάθους τρύμματος και επιφάνειας διάβρωσης [13]

Τούτο φαίνεται στην εικόνα 1-17, που παρουσιάζεται η πιθανότητα εντοπισμού ενός τρύμματος δεδομένου βάθους σε συνάρτηση με την εκτεθειμένη επιφάνεια. Για παράδειγμα, υπάρχει πιθανότητα της τάξης του 0.2 (20%), ένα τρύμμα με βάθος  $d$  να εμφανίζεται πάνω σε δείγμα στην περιοχή 1. Σε ένα δείγμα τέσσερις(4) φορές μεγαλύτερο είναι σχεδόν βέβαιο (πιθανότητα 1.0) ότι θα προκύψει τρύμμα του ίδιου βάθους και με πιθανότητα 90% θα προκύψει επίσης τρύμμα διπλασίου βάθους. Συνεπώς προσπάθειες να προλεχθεί η «ζωή» ενός εξαρτήματος με βάση πειράματα που διενεργούνται σε μικρά εργαστηριακά δείγματα, είναι μάλλον άσκοπες [13].

Στην περίπτωση κραμάτων Al, επιβαρυνμένες με ρύπους ατμόσφαιρες ευνοούν την ανάπτυξη τρυμμάτων (pits) στην επιφάνεια των κραμάτων, που είναι γενικά δυσδιάκριτα με γυμνό οφθαλμό. Τα τρύμματα επικαλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης που συνήθως είναι οξειδία και υδροξειδία αλουμινίου. Η ανάπτυξη σε βάθος των pit είναι σχετικά ταχεία κατά τα πρώτα χρόνια της έκθεσης αλλά τελικώς σταματά όπως φαίνεται διαγραμματικά στην εικόνα 1-18. Το τελικό βάθος σπανίως ξεπερνά τα 200  $\mu\text{m}$  ακόμη και κατόπιν αρκετών δεκαετιών έκθεσης [14].



**Εικόνα 1-18:** Μέγιστο βάθος pit σε φύλλο AlMn1,2 μετά 20έτη ατμοσφαιρική έκθεση [14]

Χαρακτηριστικά αναφέρεται [14] ότι στα κράματα Al με κύριο κραματικό στοιχείο το Mn, τα μέγιστα βάθη pit που έχουν μετρηθεί για διάφορες ατμόσφαιρες είναι:

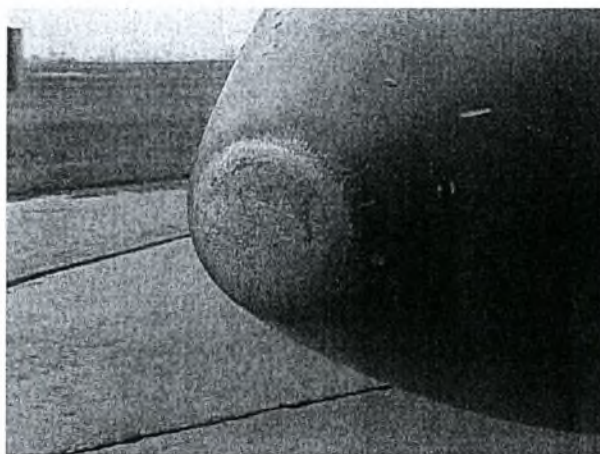
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	Μέγιστο μετρούμενος βάθος pit μετά 20 έτη έκθεσης (μm)
Αγροτική	10-55
Αστική	100-190
Παραθαλάσσια	85-260

Η σημειακή διάβρωση είναι σύνθητες φαινόμενο σε αεροσκάφη που επιχειρούν σε περιβάλλον κοντά σε θάλασσα όπου τα ιόντα χλωρίου προάγουν την τοπική διάλυση του προστατευτικού στρώματος οξειδίου. Αντίθετα η σημειακή διάβρωση σε παθητικά μέταλλα είναι ασυνήθιστη σε διαλύματα που δεν περιλαμβάνουν ιόντα, εφόσον το στρώμα οξειδίου παραμένει σταθερό και προστατευτικό.

### 1.8.6 EROSION CORROSION

Erosion corrosion ονομάζεται η επιτάχυνση ή η αύξηση του ρυθμού της προσβολής πάνω σε ένα μεταλλικό υλικό εξαιτίας της σχετικής κίνησης μεταξύ ενός διαβρωτικού ρευστού και της επιφάνειας του υλικού κατά την οποία εμπλέκονται επιδράσεις μηχανικής φθοράς ή εκτριβής. Το μέταλλο απομακρύνεται από την επιφάνεια υπό μορφή διαλυμένων ιόντων ή σχηματίζει στερεά προϊόντα διάβρωσης τα οποία απομακρύνονται μηχανικά από την περιοχή της διάβρωσης.

Το φαινόμενο erosion corrosion αναγνωρίζεται από ραβδώσεις, χαραγές, κυματισμούς, στρογγυλοποιημένες οπές και βαθουλώματα. Σε πολλές περιπτώσεις, αστοχίες εξαιτίας της erosion corrosion επέρχονται σε σχετικά σύντομο διάστημα και είναι απρόσμενες καθώς τα πειράματα εκτίμησης της διάβρωσης διενεργούνται είτε υπό στατικές συνθήκες, είτε οι επιδράσεις της διάβρωσης δεν λαμβάνονται καθόλου υπόψη.



**Εικόνα 1-19:** Erosion Corrosion σε εξωτερική δεξαμενή καυσίμου αεροσκάφους

Τα περισσότερα μεταλλικά υλικά είναι ευπαθή σε erosion corrosion. Πολλά εξαρτώνται από την ανάπτυξη προστατευτικού στρώματος (παθητικότητα) για αντοχή στη διάβρωση όπως στην περίπτωση του αλουμινίου. Γενικά σκληρά και συμπαγή στρώματα παρέχουν υψηλότερο βαθμό προστασίας. Το φαινόμενο erosion corrosion επέρχεται ως αποτέλεσμα της ζημιάς των προστατευτικών επιφανειών οπότε το υποκείμενο υλικό υφίσταται προσβολή με ταχύ ρυθμό.

Μεταξύ των διαβρωτικών μέσων που μπορούν να προκαλέσουν erosion corrosion συμπεριλαμβάνονται αέρια, υδατικά διαλύματα, οργανικά συστήματα και

υγρά μέταλλα. Για παράδειγμα, θερμά αέρια μπορούν να οξειδώσουν ένα μέταλλο και μετά με υψηλή ταχύτητα να παρασύρουν ένα κατά τα άλλα προστατευτικό στρώμα.

Εφόσον η διάβρωση εμπλέκεται στη διαδικασία της erosion corrosion, όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η ταχύτητα επίσης του περιβάλλοντος ρευστού παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς επηρεάζει έντονα τους μηχανισμούς των αντιδράσεων διάβρωσης και συμβάλει στην μηχανική φθορά ιδιαίτερα όταν το διάλυμα περιέχει στερεά σε αιώρηση. Η επίδραση της ταχύτητας μπορεί να είναι αμελητέα ή να αυξάνεται αργά έως ότου προσεγγισθεί μια κρίσιμη ταχύτητα, και κατόπιν η προσβολή μπορεί να αυξηθεί με ταχύ ρυθμό.

Πολλές αστοχίες από erosion corrosion συμβαίνουν επίσης λόγω στροβιλισμού ή τυρβώδους ροής. Ο στροβιλισμός μάλιστα προκαλεί μεγαλύτερη αναταραχή του ρευστού στην επιφάνεια του υλικού από ότι η περίπτωση της στρωτής ροής.

Η μορφή της ροής εξαρτάται από το ρυθμό και την ποσότητα του ρευστού που διακινείται καθώς και από την γεωμετρία ή την σχεδίαση του εξοπλισμού. Έτσι εκτός από την υψηλή ταχύτητα, η γεωμετρία του μηχανολογικού εξαρτήματος και οτιδήποτε καταστρέφει την στρωτή ροή μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα erosion corrosion.

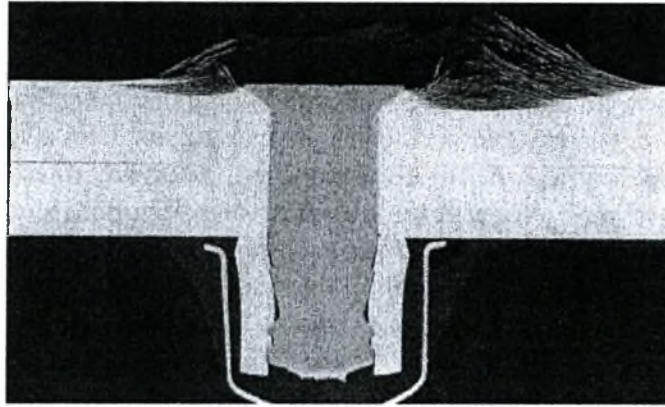
Προβλήματα αυτής της μορφής διάβρωσης είναι έντονα σε πτητικά μέσα που επιχειρούν σε ζεστά ερημικά κλίματα. Παρ' όλη την ξηρασία εξ' αιτίας των χαμηλών βροχοπτώσεων, οι έρημοι έχουν συχνά αρκετή υγρασία κυρίως τη νύχτα. Οι υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν την διάβρωση, παραμορφώνουν τις επικαλύψεις και δημιουργούν ρωγμές στα προστατευτικά επιστρώματα. Παράλληλα η σκόνη και η άμμος - που συχνά είναι υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα - διαβρώνουν την επιστρωση της επιφάνειας. Επίσης η ανάμειξή τους με ελαιολιπαντικά και υδραυλικά υγρά έχει ως αποτέλεσμα συνδυασμένη λειτουργία (συνεργιστικά φαινόμενα) που προκαλούν απόξεση. Ακόμη στερεά υλικά που προσκρούουν κατά τις προσγειώσεις, καταστρέφουν τα προστατευτικά επιστρώματα αφήνοντας το μέταλλο εκτεθειμένο στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Το φαινόμενο erosion corrosion αποτελεί επίσης συνηθισμένη μορφή φθοράς σε έλικες αεροσκαφών και κινητά μέρη στροβιλοκινητήρων που λειτουργούν είτε στο ρεύμα αέρα εισόδου, είτε στο ρεύμα καυσαερίων και γενικά υπό συνθήκες στροβιλισμού. Στοιχεία όπως στροφέια, πτερύγια συμπιεστή και στροβίλου, ακροφύσια και οδηγοί βαλβίδες είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε τέτοιου είδους φθορά.

#### 1.8.7 ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Στην περίπτωση της περικρυσταλλικής διάβρωσης, η προσβολή εκτείνεται στα όρια των κόκκων του υλικού και μπορεί να φθάσει σε πολύ μεγάλο βάθος, εξασθενίζοντας την κατασκευή.

Σε προϊόντα εξέλασης, όπου οι κρύσταλλοι γίνονται επίπεδοι και επιμηκύνονται κατά τη διεύθυνση της κατεργασίας, η παρουσία περικρυσταλλικής διάβρωσης μπορεί να οδηγήσει σε στρωματοποίηση και αποφλοιώση (exfoliation), παράγοντας ένα φαινόμενο, όπου οι επιφανειακοί κρύσταλλοι πιέζονται προς τα έξω από τα υποκείμενα προϊόντα της διάβρωσης. Τούτο είναι γνωστό ως διάβρωση αποφλοιώσης (exfoliation) και αποτελεί σοβαρή μορφή περικρυσταλλικής διάβρωσης (εικόνα 1-20).



**Εικόνα 1-20:** Περικρυσταλλική διάβρωση που οδήγησε σε exfoliation [15]

Κατά την περικρυσταλλική διάβρωση και την αποφλοίωση, το υλικό στις οριακές επιφάνειες των κόκκων συμπεριφέρεται ανοδικά σε σχέση με το μέταλλο στο εσωτερικό των κόκκων. Σε περιβάλλον διάβρωσης, η διάλυση των ανοδικών ορίων των κόκκων συνήθως συμβαίνει με πολύ γρήγορους ρυθμούς, ενώ ο όγκος του κράματος επηρεάζεται ελάχιστα. Η μικρή περιοχή της ανόδου σε σχέση με την καθοδική περιοχή επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό διάβρωσης. Η ανοδική φύση των ορίων των κόκκων εξηγείται λόγω των τοπικών συγκεντρώσεων ακαθαρσιών, του εμπλουτισμού ή της απομάκρυνσης από τα όρια, στοιχείων του κράματος. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να συνδυαστούν με την ύπαρξη φάσεων στα όρια των κόκκων, που μπορεί από μόνες τους να συμπεριφέρονται ανοδικά σε σχέση με το κράμα.

#### 1.8.8 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Οι αστοχίες από διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking – SCC) αναφέρονται σε αστοχίες που προξενούνται από την ταυτόχρονη ύπαρξη μηχανικής καταπόνησης και ενός διαβρωτικού μέσου.

Η διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση προέρχεται από το συνδυασμό τριών παραγόντων:

- α. Διαβρωτικό περιβάλλον.
- β. Παραμένουσες ή και επιβαλλόμενες εφελκυστικές τάσεις.
- γ. Μικροδομή.

Για την εμφάνιση SCC είναι απαραίτητη η ύπαρξη στο περιβάλλον ιόντων, όπως π.χ. χλωριόντων ( $Cl^-$ ), η διαβρωτική συμπεριφορά των οποίων σχετίζεται άμεσα με την καταστροφή του προστατευτικού στρώματος οξειδίων.

Κατά την SCC το μέταλλο ή το κράμα δεν έχει προσβληθεί στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του, ενώ λεπτές ρωγμές αναπτύσσονται προς το εσωτερικό του. Το φαινόμενο έχει σοβαρές επιπτώσεις καθώς μπορεί να εκδηλωθεί αστοχία με καταπονήσεις εντός των προβλεπόμενων από τη σχεδίαση ορίων καταπόνησης.

Η διάβρωση παίζει σημαντικό ρόλο στην έναρξη των ρωγμών. Ένα τρύμμα, μια ανωμαλία ή άλλη ασυνέχεια στην επιφάνεια του μετάλλου λειτουργεί ως θέση συγκέντρωσης τάσεων. Η συγκέντρωση τάσεων στην κορυφή της εγκοπής αυξάνεται σημαντικά καθώς μειώνεται η ακτίνα κύκλου της εγκοπής. Συχνά παρατηρείται οι ρωγμές από διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση να αρχίζουν στη βάση ενός τρύμματος. Επίσης ασυνέχειες του προστατευτικού επιφανειακού στρώματος μπορούν να αποτελέσουν σημεία γέννησης (nucleation sites) και εμφάνισης SCC.

### 1.8.9 ΚΟΠΩΣΗ ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η κόπωση με διάβρωση έχει οριστεί ως η μείωση της αντίστασης σε κόπωση που οφείλεται στην παρουσία ενός διαβρωτικού μέσου. Έτσι η κόπωση με διάβρωση δεν ορίζεται από την άποψη της εμφάνισης της αστοχίας, αλλά από την άποψη των μηχανικών ιδιοτήτων. Αναφέρεται συνήθως στην ύπαρξη μιας εκτενούς περιοχής καλυμμένης με προϊόντα διάβρωσης και μιας μικρότερης εκτραχυνθείσας περιοχή που προκύπτει από την τελική ψαθυρή θραύση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία των προϊόντων διάβρωσης σε ένα σημείο θραύσης από κόπωση, δε δηλώνει απαραίτητως κόπωση με διάβρωση. Η κόπωση με διάβρωση είναι πιθανώς μια ειδική περίπτωση της δημιουργίας ρωγμών από διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Ωστόσο, ο τρόπος θραύσης και τα προληπτικά μέτρα διαφέρουν και για το λόγο αυτό εξετάζεται χωριστά.

### 1.8.10 ΘΡΑΥΣΗ ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Η ψαθυροποίηση από υδρογόνο αποτελεί έναν τύπο αστοχίας που οφείλεται στην συνδυασμένη δράση του υδρογόνου και παραμενουσών ή εφαρμοζόμενων τάσεων.

Η αιτία της ψαθυροποίησης λόγω υδρογόνου είναι η διείσδυση του ατομικού υδρογόνου μέσα στη δομή του μετάλλου. Εξ' αιτίας του μικρού μεγέθους και μάζας, το ατομικό υδρογόνο εμφανίζει μεγάλη διάχυση στα περισσότερα μέταλλα συμπεριλαμβανομένου και του αλουμινίου. Έτσι διεισδύει στις πιο πολλές καθαρές μεταλλικές επιφάνειες σχετικά εύκολα και διαχέεται ταχέως σε περιοχές όπου παραμένει σε διάλυση και κατακρυσνίζεται ως μοριακό υδρογόνο ( $H_2$ ) δημιουργώντας μικρές ρωγμές ή φυσαλίδες.

Έτσι η ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου προκαλείται μόνο από τον ατομικό τύπο. Η εφαρμογή καθοδικής προστασίας, ο γαλβανισμός και ο καθαρισμός μετάλλων αποτελούν τις κυριότερες πηγές υδρογόνου στα μέταλλα.

Η συσσώρευση υδρογόνου σε υψηλής αντοχής κράματα συνήθως οδηγεί σε θραύση και τούτο παρατηρείται κατ' εξοχήν σε στατικά φορτισμένα εξαρτήματα μερικές ώρες ή μέρες μετά την φόρτιση και την έκθεση τους σε υδρογόνο. Παρόμοιες αστοχίες παρατηρούνται σε καινούργια και αχρησιμοποίητα εξαρτήματα ενώ εκτίθενται σε πηγή υδρογόνου, όταν θερμικές και μηχανουργικές κατεργασίες έχουν αφήσει ιδιοτάσεις σε αυτά. Για την ελαχιστοποίηση της συσσώρευσης υδρογόνου, διαδικασίες όπως ο καθαρισμός μετάλλων ή η ηλεκτροεπίστρωση πρέπει να παραγματοποιούνται υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες.

Ιδιαίτερα για τα αεροπορικά κράματα αλουμινίου των σειρών 2XXX και 7XXX, μελέτες έδειξαν ότι φυσαλίδες υδρογόνου έχουν την τάση να σχηματίζονται στα όρια των κόκκων των κράματων που εκτίθενται σε υγρή ατμόσφαιρα (πηγή υδρογόνου).



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ - REFERENCES

---

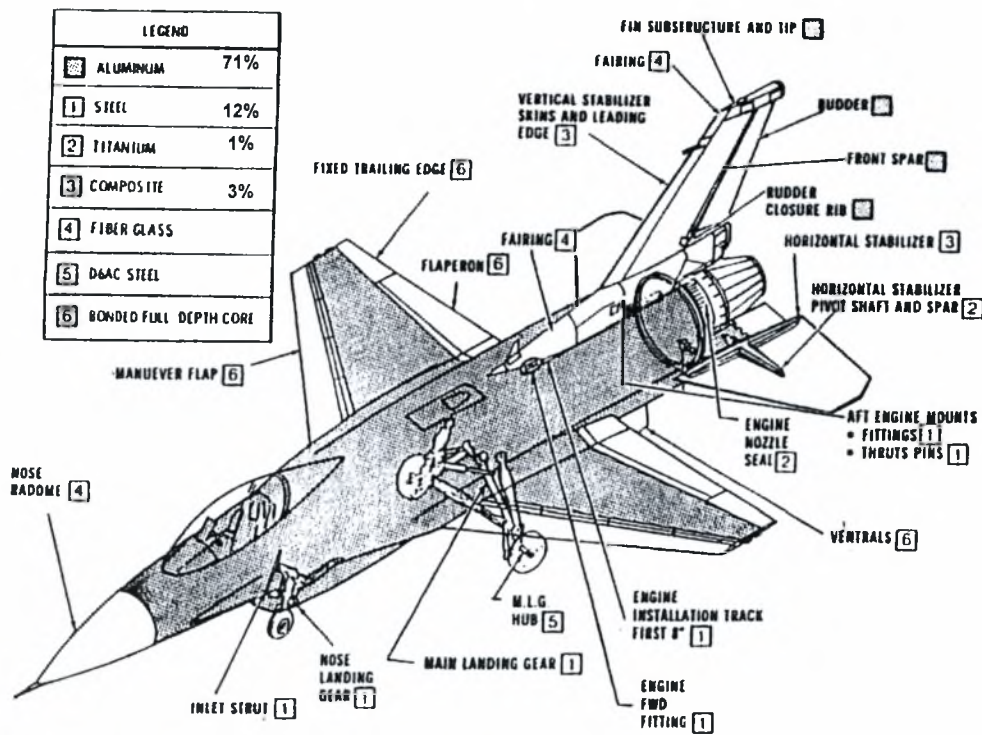
1. Fontana M.G., "Corrosion Engineering", page 13, Figure 2-2, McGraw-Hill Publishing Company.
2. AGARD AG-278, Volume I, "AGARD Corrosion Handbook, Volume 1, Aircraft Corrosion: Causes and Case Histories", W.Wallace, D.W.Hoeppner and P.V. Kandachar, July 1985, pp.9-10.
3. Corrosion Advisory, FAA, AC43-4A, 25 Jul 1991.
4. Fontana M.G., "Corrosion Engineering", page 42, Table 3-1, McGraw-Hill Publishing Company.
5. "Aircraft Weapon Systems Cleaning and Control" NAVAIR 01-1A-509, TO 1-1-691, 1 May 2001, page 2-6.
6. "An Introduction to Metallic Corrosion", Evans U.R., 3<sup>rd</sup> Edition, Edward Arnold, London, 1981.
7. "The Forms of Corrosion" C.P. Dillon in *Process Industries Corrosion – The Theory and Practice*, NACE, page 3.
8. Fontana M.G., "Corrosion Engineering", page 43, Table 3-2, McGraw-Hill Publishing Company.
9. Fontana M.G., "Corrosion Engineering", page 53, McGraw-Hill Publishing Company.
10. G.J. Schafer and P.K. Foster, *Journal Electrochemical Society* 106:468 (1959) and L.Rosenfeld and I.K.Marshakov, *Corrosion* 20:115t (1964).
11. Fontana M.G., "Corrosion Engineering", page 54-55, Figures 3-9 and 3-10, McGraw-Hill Publishing Company.
12. Hollingsworth E.H., Hunsicker H.Y., "Forms of Corrosion" in *Metals Handbook*, Volume 13, 9th Edition, Corrosion, ASM, 1987, pp.106, Fig 4.
13. Fontana M.G., "Corrosion Engineering", page 67-72, McGraw-Hill Publishing Company.
14. Einar Mattsson, "Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers", Ellis Horwood Ltd, pp. 153-155.
15. Abbott W.H., Kinzie R., "Corrosion Monitoring in Military Environments", page 12, Figure 7, presented in *USAF ASIP 2003 Conference*.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

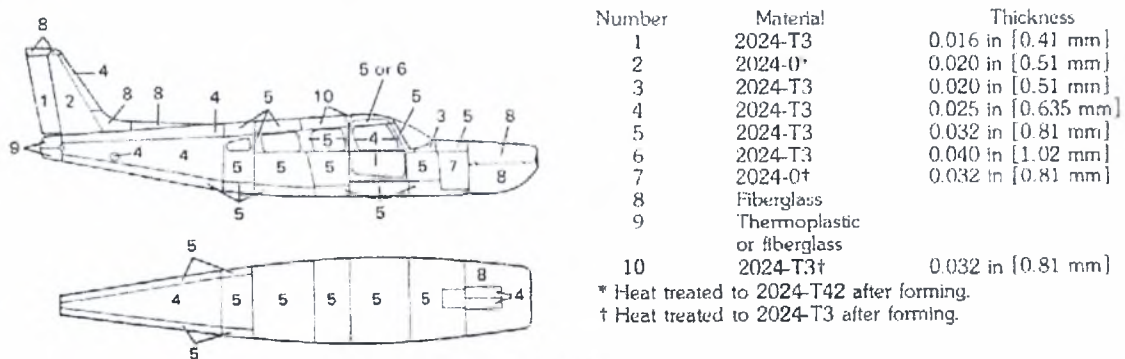
### ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ Η ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα υλικά στις αεροπορικές κατασκευές είναι τα κράματα αλουμινίου, όπως φαίνεται παραστατικά στις εικόνες 2-1α και 2-1β. Επίσης αλουμίνιο χρησιμοποιείται συχνά ως προστατευτικό επίστρωμα.



Εικόνα 2-1α: Υλικά κατασκευής σύγχρονου μαχητικού αεροσκάφους [1, 2]



Εικόνα 2-1β: Υλικά κατασκευής σύγχρονου μικρού επιβατικού αεροσκάφους [3]

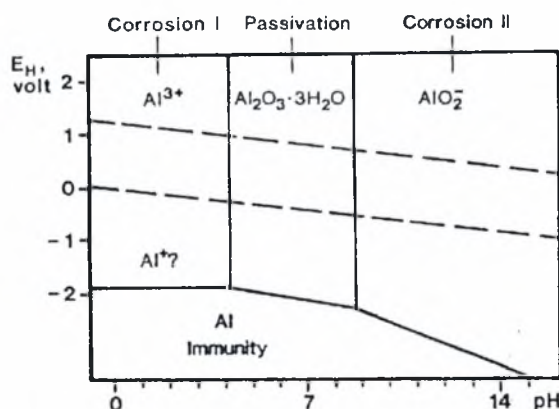
Τα κράματα αλουμινίου των αεροπορικών κατασκευών διακρίνονται γενικά σε χυτά και διαμορφούμενα εν ψυχρώ κράματα. Περαιτέρω διακρίσεις είναι δυνατόν να γίνουν με βάση τις μηχανικές ή θερμικές κατεργασίες των κραμάτων που αποσκοπούν στην ενίσχυση της αντοχής των.

## 2.2 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ - ΓΕΝΙΚΑ

Το αλουμίνιο, από θερμοδυναμικής απόψεως, είναι από τα πλέον ενεργά μέταλλα προς αντίδραση, συμπεριφερόμενο ανοδικά ως προς όλα τα μέταλλα εκτός από το μαγνήσιο, βηρύλιο και ψευδάργυρο, λόγω της θέσης τους στην ηλεκτροχημική σειρά. Ωστόσο είναι γενικά ανθεκτικό στη διάβρωση καθώς προστατεύεται από στρώματα οξειδίου τα οποία αναπτύσσονται γρήγορα στην επιφάνεια του υλικού στους περισσότερους τύπους περιβάλλοντος. Έτσι, μια επιφάνεια αλουμινίου που είναι εκτεθειμένη στον αέρα αποκτά τάχιστα ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του αλουμινίου που δρά προστατευτικά έναντι περαιτέρω προσβολής του μετάλλου.

Γενικά διακρίνονται δύο(2) στρώματα προστατευτικού οξειδίου, το εσωτερικό και το εξωτερικό στρώμα. Το εσωτερικό στρώμα του σχηματιζόμενου οξειδίου, είναι συμπαγές, άμορφο και το πάχος του καθορίζεται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Το εξωτερικό στρώμα είναι μεγαλύτερου πάχους και αποτελείται κυρίως από ενυδατωμένο οξείδιο. Ενδεικτικές τιμές πάχους του προστατευτικού στρώματος κυμαίνονται μεταξύ 200Å – 2000Å [4].

Η διάβρωση του αλουμινίου μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα μιας κατάστασης ισορροπίας μεταξύ αντιθέτων δυνάμεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του προστατευτικού οξειδίου. Από τις δυνάμεις αυτές, μια τείνει να αποικοδομήσει το σχηματισθέν οξείδιο, ενώ η άλλη τείνει να το συνθέσει. Συνεπώς η απουσία διαβρωτικών συνθηκών οδηγεί στον ταχύ σχηματισμό προστατευτικού στρώματος οξειδίου, ενώ όταν οι δυνάμεις αποικοδόμησης είναι αρκούντως ισχυρές, παρατηρείται διάβρωση.

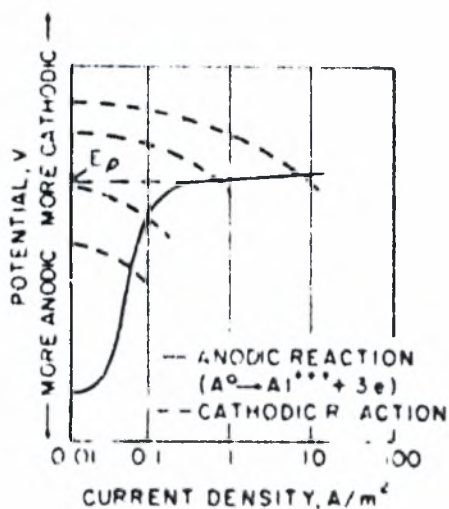


Εικόνα 2-2: Συνθήκες παθητικότητας αλουμινίου και διαβρωτικής του συμπεριφοράς (Διάγραμμα Pourbaix) [5]

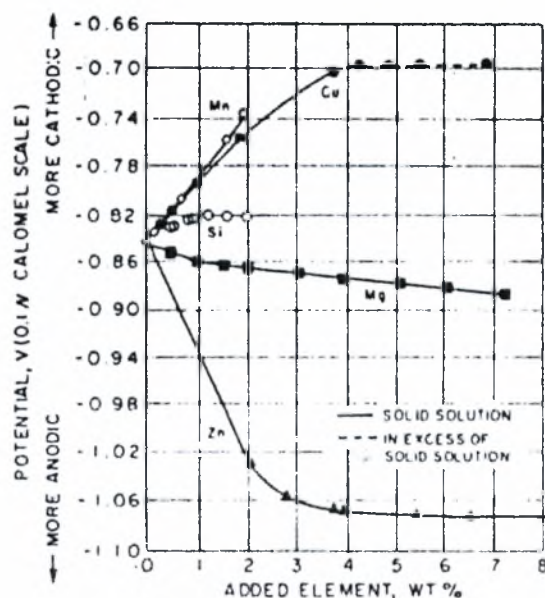
Στην εικόνα 2-2 φαίνονται οι συνθήκες θερμοδυναμικής σταθερότητας του στρώματος οξειδίου του αλουμινίου (διάγραμμα Pourbaix). Όπως παρατηρείται, το αλουμίνιο είναι παθητικό στην περιοχή του pH από 4 μέχρι 8.5 ανάλογα με την θερμοκρασία και τον ρυθμό με τον οποίο το στρώμα οξειδίου διαλύεται στον ηλεκτρολύτη [6]. Εκτός αυτής της περιοχής, το αλουμίνιο μπορεί να διαβρωθεί με τον σχηματισμό ιόντων  $Al^{3+}$  σε όξινα διαλύματα ή τον σχηματισμό ιόντων  $AlO_2^-$  σε βασικό περιβάλλον. Υπάρχουν επίσης ειδικές περιπτώσεις όπου το Al δεν διαβρώνεται εκτός της παθητικής περιοχής, όπως για παράδειγμα όταν το στρώμα οξειδίου δεν είναι διαλυτό ή όπου διατηρείται από την οξειδωτική φύση του διαλύματος.

Εξαιρετικά τοπική διάβρωση στο Al μπορεί να συμβεί στην παθητική περιοχή συντελώντας συνήθως σε σημειακή διάβρωση (pitting). Η τάση για σημειακή διάβρωση μπορεί να καθοριστεί από το δυναμικό της σημειακής διάβρωσης που είναι απλά το δυναμικό σε ένα συγκεκριμένο διάλυμα πάνω από το οποίο τα τρύματα θα

αρχίσουν να αναπτύσσονται και κάτω του οποίου όχι. Το δυναμικό της σημειακής διάβρωσης βρίσκεται εφαρμόζοντας ένα μεταβλητό εξωτερικό δυναμικό μεταξύ του μεταλλικού υλικού (άνοδος) και μίας καθόδου που είναι εμβαπτισμένα σε ηλεκτρολύτη ελεύθερο από καθοδικά αντιδρώντα. Η σχέση ανάμεσα στο δυναμικό της ανόδου και του ρεύματος καθορίζεται και οι συνθήκες εγκαθίστανται, όπου το μεταλλικό υλικό πολώνεται. Στην περίπτωση αυτή, τα επίπεδα των δυναμικών χάνουν την σταθερή τους τιμή και πραγματοποιείται ταχεία άνοδος του ρεύματος. Το δυναμικό αυτό λέγεται δυναμικό σημειακής διάβρωσης και φαίνεται στην εικόνα 2-3 για κράμα Al 1100 εμβαπτισμένο σε ουδέτερο δ/μα χλωριούχου νατρίου (NaCl).



Εικόνα 2-3: Δυναμικό σημειακής διάβρωσης Al 1100 [7]



Εικόνα 2-4: Επιδράσεις κύριων στοιχείων κραματοποίησης στο δυναμικό της ηλεκτρολυτικής διάλυσης αλουμινίου [8]

Μόνο όταν το καθοδικό δυναμικό είναι ικανό να πολώσει το μεταλλικό υλικό στο δυναμικό σημειακής διάβρωσής του, παρατηρείται αρκετό ηλεκτρικό ρεύμα και σημειακή διάβρωση. Η σημειακή διάβρωση είναι κοινός τύπος διάβρωσης στα κράματα αλουμινίου σε εκτεθειμένα διαλύματα σε αέρα που περιέχει ιόντα αλογόνου, εφόσον αναπτύσσει ηλεκτροδιακά δυναμικά που είναι ίσα ή υπερβαίνουν το δυναμικό του βελονισμού. Σε μη αεριζόμενα διαλύματα όμοιας συγκέντρωσης αλογόνων (π.χ. Cl<sub>2</sub>) απουσία του καθοδικού αντιδρώντος O<sub>2</sub>, το αλουμίνιο μπορεί να μην διαβρωθεί από βελονισμό εφόσον δεν πολώνεται στο δυναμικό βελονισμού. Γενικά το αλουμίνιο δεν αναπτύσσει σημειακή διάβρωση σε αεριζόμενα διαλύματα των περισσότερων μη αλογονούχων αλάτων, επειδή τα δυναμικά βελονισμών στα διαλύματα αυτά είναι αισθητά πιο καθοδικά από εκείνα σε διαλύματα αλογόνων και δεν πολώνεται στα δυναμικά αυτά.

Η διαβρωτική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου επηρεάζεται έντονα από την χημική σύνθεση των κραμάτων που καθορίζεται από τα στοιχεία των ακαθαρσιών και των κραματικών προσθηκών, καθώς επηρεάζουν τα ηλεκτρολυτικά δυναμικά διάλυσης των κραμάτων. Τα δυναμικά διάλυσης καθορίζονται αρχικά από την σύνθεση των στερεών διαλυμάτων πλούσιων σε αλουμίνιο το οποίο είναι η κύρια φάση των κραμάτων. Σωματίδια δευτερευουσών φάσεων όπως κατακρημνίσματα και προϊόντα διαλυτοποίησης είναι επίσης σημαντικά στην διάβρωση, καθώς έχουν συνήθως διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά από τα στερεά διαλύματα αλουμινίου

και συνεπώς μπορεί να δημιουργήσουν γαλβανικά ζεύγη. Συνέπεια των παραπάνω είναι η πρόκληση ειδικών περιπτώσεων διάβρωσης όπως περικρυσταλλική ή αποφλοιώσης (exfoliation).

Τα κύρια κραματικά στοιχεία σε κράματα αλουμινίου είναι Zn, Mg, Si, Cu και Mn. Οι επιδράσεις αυτών των στοιχείων στα δυναμικά των κραμάτων αλουμινίου φαίνονται στην εικόνα 2-4. Τα αντιδρώντα στοιχεία Zn και Mg μειώνουν το δυναμικό των διαλυμάτων αλουμινίου παράγοντας διμερή κράματα. Το Si, Cu και Mn έχουν το αντίθετο αποτέλεσμα στο δυναμικό του διαλύματος και καθώς οι επιδράσεις των υπόψη κραματικών στοιχείων σε τριμερή ή υψηλότερης τάξης κράματα είναι κατά προσέγγιση προσθετικές, τα δυναμικά κραμάτων εμπορικού τύπου εκτείνονται σε ευρύ πεδίο [7].

### 2.2.1 ΧΥΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Τα χυτά κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία είναι θερμικά κατεργασμένα κράματα βασισμένα σε κραματικά συστήματα Al-Si-Mg, Al-Si-Cu-Mg και Al-Cu-Mg. Χρησιμοποιούνται λόγω της υψηλής τους πλαστικότητας, των μικρών τάσεων συστολής κατά την στερεοποίηση, της υψηλής αντίστασης στη θραύση εν θερμώ και της καλής στεγανότητας υπό πίεση. Αυτές είναι οι κυριότερες ιδιότητες-χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την διασφάλιση καλής χυτευσιμότητας. Επίσης τα σημαντικότερα κράματα από αυτά, έχουν υψηλή αντίσταση σε διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα.

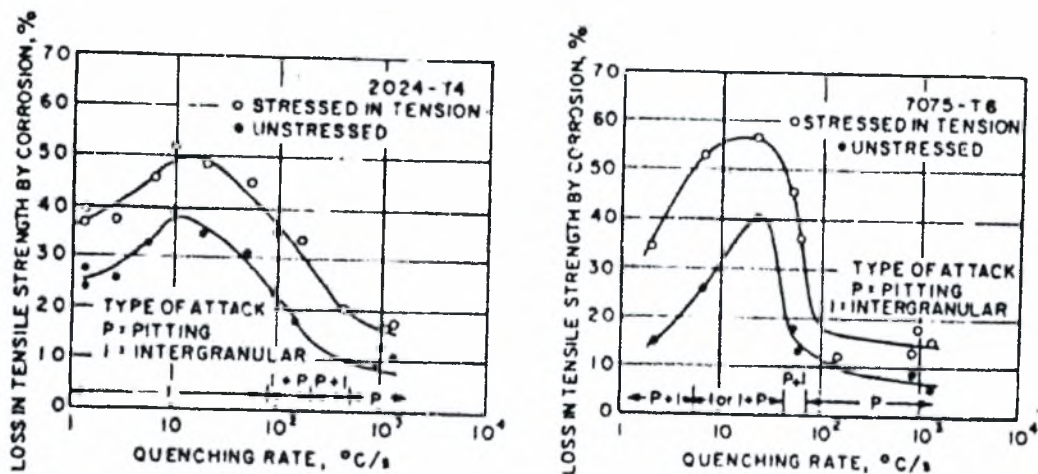
Το Si αποτελεί κύριο κραματικό στοιχείο σε πολλά κράματα και ελεύθερο Si ή πυριτικές ενώσεις υπάρχουν σε σχετικά υψηλά ποσοστά. Οι ενώσεις αυτές είναι ισχυρά καθοδικές για το πλέγμα του αλουμινίου κατά μερικές εκατοντάδες millivolt και γι' αυτό προάγουν την διάβρωση. Ωστόσο οι επιδράσεις στην αντίσταση σε διάβρωση είναι ελάχιστες εξ' αιτίας των χαμηλών εντάσεων των ρευμάτων διάβρωσης, που εξηγείται από το γεγονός ότι τα σωματίδια Si είναι ισχυρά πολωμένα.

### 2.2.2 ΔΙΑΜΟΡΦΟΥΜΕΝΑ ΕΝ ΨΥΧΡΩ, ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Είναι τα πιο σημαντικά και ευρύτερα χρησιμοποιούμενα κράματα στις αεροπορικές κατασκευές. Τα σημαντικότερα κράματα είναι του τύπου Al-Cu-Mg (σειρά 2XXX) ή Al-Zn-Mg (σειρά 7XXX). Κράματα της σειράς 6XXX, συστήματος Al-Mg-Si όπως 6061 χρησιμοποιούνται επίσης σε μικρότερο βαθμό.

Τα κράματα αυτά σκληρύνονται με κατεργασίες σκλήρυνσης δια κατακρημνίσεως, που περιλαμβάνουν κατεργασία θερμικής διαλυτοποίησης (αργή θέρμανση), ταχεία βαφή και είτε φυσική γήρανση σε θερμοκρασία δωματίου, είτε τεχνητή γήρανση σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η απόκριση των υπόψη κραμάτων σε σκλήρυνση καθώς και σε άλλες ιδιότητες, όπως αντίσταση σε διάβρωση, είναι έντονα εξαρτώμενες από τις παραμέτρους των θερμικών κατεργασιών.

Θερμοκρασίες για διαλυτοποίηση, ταχύτητες βαφής και ο βαθμός γήρανσης όπως επηρεάζεται από τον χρόνο γήρανσης και την θερμοκρασία γήρανσης είναι οι σημαντικότεροι παράμετροι που πρέπει να θεωρηθούν. Η εικόνα 2-5 παριστάνει την επίδραση της ταχύτητας βαφής στην αντίσταση σε διάβρωση για τα κράματα Al 2024-T4 και 7075-T6 σε σχέση με το ποσοστό απώλειας της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω της έκθεσης σε διαβρωτικά διαλύματα.



Εικόνα 2-5: Επίδραση του ρυθμού βαφής στη διαβρωτική συμπεριφορά μη προστατευμένων δοκιμίων κραμάτων αλουμινίου [ 8, 9]

Φαίνεται ότι μικρές ταχύτητες βαφής της τάξης του  $1^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  καθιστούν το κράμα Al 2024 επιρρεπές σε περικρυσταλλική διάβρωση. Αντίστοιχα το Al 7075 καθίσταται ευπαθές τόσο σε περικρυσταλλική όσο και σημειακή διάβρωση. Καθώς η ταχύτητα βαφής αυξάνεται, ο ρυθμός διάβρωσης επίσης αυξάνεται μέχρι να επιτευχθεί ένα μέγιστο μεταξύ 10 και  $50^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ . Σε ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες βαφής, η αντίσταση σε διάβρωση αυξάνεται και ο τύπος της διάβρωσης μεταβάλλεται από περικρυσταλλική σε σημειακή (pitting). Αυτές οι μεταβολές στην ταχύτητα ψύξης κατά την βαφή, οδηγούν σε ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα στην απόκριση της χρονοσκλήρυνσης των κραμάτων. Στην περίπτωση του Al 7075, μείωση στην ταχύτητα ψύξης κάτω από  $103^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  οδηγεί σε σημαντική απώλεια απόκρισης σε χρονοσκλήρυνση και αντοχή πριν να συμβεί κάποια σημαντική αλλαγή στην αντίσταση σε διάβρωση. Ωστόσο με το κράμα Al 2024, η απόκριση χρονοσκλήρυνσης παραμένει αρκετά σταθερή πάνω από ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ψύξης από περίπου  $50^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  ως περίπου  $104^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ , ενώ η αντίσταση σε διάβρωση ελαττώνεται γρήγορα καθώς η ταχύτητα βαφής πέφτει κάτω από  $103^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  περίπου. Γι' αυτό το λόγο πολλές προδιαγραφές θερμικών κατεργασιών απαιτούν επίδειξη μαζί αντοχής ή σκληρότητας και αντίστασης σε περικρυσταλλική διάβρωση [9].

Οι ανωτέρω τύποι κραμάτων χρησιμοποιούνται σε πλήθος θερμικών κατεργασιών, οι πιο συνήθεις από τις οποίες είναι οι ακόλουθες:

- F ή O : ως εκ παραγωγής ή από ανόπτηση αντίστοιχα.
- H : για προϊόντα που έχουν υποστεί σκλήρυνση με παραμόρφωση.
- W : αργή θέρμανση (κατεργασία πριν τη φυσική γήρανση).
- T3 : αργή θέρμανση, ψυχρή κατεργασία και φυσική γήρανση.
- T4 : αργή θέρμανση, φυσική γήρανση.
- T6 : αργή θέρμανση, τεχνητή γήρανση.
- T7 : αργή θέρμανση και σταθεροποίηση (υπεργήρανση).
- T8 : αργή θέρμανση, ψυχρή κατεργασία και τεχνητή γήρανση.

Ένα ή περισσότερα ψηφία που ακολουθούν αυτούς τους βασικούς προσδιορισμούς κατεργασιών είναι ενδεικτικοί των μεταβολών στο βαθμό-ένταση της ψυχρής κατεργασίας, του χρόνου γήρανσης ή και των δύο.

Κράματα της σειράς 2XXX χρησιμοποιούνται σε όλες τις παραπάνω συνθήκες κατεργασίας και η συμπεριφορά τους ως προς την διάβρωση μεταβάλλεται

ανάλογα. Είναι γενικώς επιρρεπή σε διάβρωση αποφλοιώσης ιδιαίτερα όταν βρίσκονται σε μορφή φύλλου μετάλλου ή ελάσματος. Τούτο είναι συνέπεια των επιμηκυμένων κόκκων που διαμορφώνονται κατά την μηχανουργική κατεργασία τους προσδίδοντας μια χαρακτηριστικά προσανατολισμένη μικροδομή, καθώς και της θερμικής κατεργασίας τους, η οποία δημιουργεί κατακρημνίσεις περικρυσταλλικά, στα όρια των κόκκων, συμβάλλοντας σε τοπικές διακυμάνσεις της σύστασης του κράματος.

Οι διακυμάνσεις αυτές αποδίδονται σε κατακρημνίσεις χαλκού στα όρια των κόκκων και προκαλούν τοπικά ανοδικές περιοχές που ευαισθητοποιούν το υλικό στη διάβρωση [10]. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2-4, μεταβολές στη συγκέντρωση του χαλκού στα κράματα, οδηγεί σε αισθητές αλλαγές στο ηλεκτροδιακό δυναμικό και τοπικές μεταβολές στη σύνθεση που μπορεί να προκαλέσουν τοπικά γαλβανικά κελιά. Επίσης στο χαλκό που πρωτοδιαλύεται σε κραματικό διάλυμα, παρατηρείται η τάση να επικάθεται στην ελεύθερη επιφάνεια προς σχηματισμό μικρών καθόδων χαλκού που επίσης προκαλούν πάλι τοπικά μικροσκοπικά γαλβανικά κελιά. Η διαβρωτική προσβολή αυτών των ευαισθητοποιημένων κραμάτων στα όρια των επιμηκυμένων κόκκων του υλικού, προκαλεί αποφλοιώση (exfoliation), η οποία προάγεται περαιτέρω από τις τάσεις που αρχίζουν να αναπτύσσονται στα όρια των κόκκων από τα προϊόντα της διάβρωσης. Αυτά τα κράματα είναι επίσης ιδιαίτερα επιρρεπή σε SCC, κυρίως όταν φορτίζονται κατά την διεύθυνση του πάχους τους. Ωστόσο τόσο η αντίσταση σε SCC όσο και σε αποφλοιώση μπορούν να βελτιωθούν με θερμικές κατεργασίες όπως T6 ή T8 που περιλαμβάνουν τεχνητή γήρανση.

Τα κράματα της σειράς 7XXX περιέχουν υψηλά ποσά ψευδαργύρου και μαγνησίου και περιλαμβάνουν κράματα χωρίς χαλκό όπως το 7005 και κράματα όπως τα 7010, 7050, 7075, 7178 και 7475 που περιέχουν χαλκό. Τα κράματα αυξάνουν την αντοχή τους με τη διαδοχική κατακρήμιση πλούσιων ζωνών σε μέταλλο-διαλύτη (G-P ζώνες) και σε κατακρημνίσματα όπως οι φάσεις  $\eta'$  και  $\eta$  ( $MgZn_2$ ). Αυτά τα κράματα έχουν αντοχή σε μεγάλη περιοχή και είναι μεταξύ των υψηλότερων σε αντοχή διαθέσιμων υλικών όταν θεωρούνται με βάση τους λόγους αντοχή προς πυκνότητα. Τα κράματα είναι επίσης πιο ανθεκτικά σε ομοιόμορφη διάβρωση σε σχέση με εκείνα της σειράς 2XXX, ωστόσο είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε SCC και διάβρωση αποφλοιώσης, εκτός αν υποβληθούν σε κατάλληλη θερμική κατεργασία προκειμένου να βελτιωθεί η συμπεριφορά τους.

Κράματα Al-Cu των σειρών 2XXX και 7XXX μπορεί να είναι ευαίσθητα σε περικρυσταλλική διάβρωση, αν δεν εμβαπτιστούν και ψυχθούν αρκετά γρήγορα μετά τη θερμική κατεργασία. Αυτά τα κράματα ισχυροποιούνται με την κατακρήμιση φάσεων Cu-Al ή Cu-Ag-Al όπως  $CuAl_2$  ή  $CuMgAl_2$  κατά τη διάρκεια γήρανσης σε θερμοκρασία δωματίου (φυσική γήρανση) ή με μέτρια υψηλές θερμοκρασίες (τεχνητή γήρανση). Παρ' όλα αυτά αργή ψύξη από 400°C σε 260°C μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό τμηματικών κατακρημνίσεων στα όρια των κόκκων με επακόλουθη αύξηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των απαλλαγμένων από χαλκό ζωνών και στο παρακείμενο υλικό. Έτσι ο ρυθμός ψύξης συμβάλλει έντονα στη διαβρωτική αντίσταση υλικών όπως τα κράματα 2024-T4 και 7075-T6. Για μέγιστη αντιδιαβρωτική αντίσταση απαιτείται γρήγορος ρυθμός ψύξης, όχι κάτω από 200°C/sec. Γι' αυτό τα συστατικά πρέπει να αναμειγνύονται σε υψηλές θερμοκρασίες συνήθως στην περιοχή των 490°C, ώστε να διαλύονται όλες οι κατακρημνιζόμενες φάσεις και μετά να τοποθετούνται γρήγορα σε ψυκτικό μπάνιο για ταχεία ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου. Όταν η ψύξη γίνεται εξ' ολοκλήρου σε νερό, αυτό πρέπει να είναι σε θερμοκρασία δωματίου και να ψύχεται ώστε να διατηρείται μια

θερμοκρασία κάτω των 38°C κατά την διάρκεια της ψύξης. Ο βαθμός γήρανσης μετά την ψύξη που επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το χρόνο γήρανσης επίσης επιδρά στην περικρυσταλλική διάβρωση. Κατεργασίες υπεργήρανσης όπως T8 (ή T851) για κράματα της σειράς 2XXX ή T76 (ή T7651) ή T73 (T7351) για τα κράματα σειράς 7XXX προσδίδουν γενικά αυξημένη αντίσταση σε περικρυσταλλική διάβρωση [11].

Τα κράματα της σειράς 6XXX είναι μέσης αντοχής υλικά που παρέχουν αντίσταση σε διάβρωση ανώτερη για τα περισσότερα από τα κράματα των σειρών 2XXX και 7XXX. Αυξάνουν την αντοχή τους με κατακρήμνιση της ένωσης  $Mg_2Si$  η οποία είναι εξίσου ανοδική στο αλουμίνιο και ενεργή (αντιδρά) σε όξινα διαλύματα. Ωστόσο η κατακρήμνιση του  $Mg_2Si$  έχει αμελητέα επίδραση στο ηλεκτροδιακό δυναμικό του αλουμινίου και γι' αυτό η αντίσταση στη διάβρωση δεν επηρεάζεται αξιοσημείωτα. Μικρά ποσοστά Cr, Mn και Zr μπορεί να προστεθούν για τον έλεγχο της δομής των κόκκων, αλλά σε επίπεδα που δεν επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση σε διάβρωση. Ο Cu χρησιμοποιείται σε κράματα όπως το 6061, προς ενίσχυση της αντοχής και συχνά ευθύνεται για την κατώτερη αντίσταση σε διάβρωση του κράματος σε σχέση με τα κράματα χωρίς Cu, όπως το 6063. Γενικά η αντίσταση σε διάβρωση μειώνεται καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα του Cu, αλλά τα περισσότερα εμπορικά κράματα έχουν περιεκτικότητα σε Cu λιγότερο από 1%.

Ο Cu αποτελεί κραματικό στοιχείο που επηρεάζει σημαντικά την αντοχή και την αντίσταση σε διάβρωση. Απαιτείται για την ανάπτυξη του υψηλότερου δυνατού επιπέδου αντοχής και είναι παρών σε ποσά πάνω από 1.8% σε κράματα όπως 7050 (2.3%) και 7178 (2%). Αν και χαμηλότερης αντοχής, τα κράματα χωρίς Cu είναι αρκετά ανθεκτικά σε γενική διάβρωση και συγκρίσιμου επιπέδου με μερικά από τα ανθεκτικά σε διάβρωση κράματα των σειρών 3XXX, 5XXX και 6XXX. Η προσθήκη Cu οδηγεί σε γενική μείωση της αντίστασης σε ομοιόμορφη διάβρωση, αλλά ταυτόχρονα έχει ευεργετικό αποτέλεσμα στην αντίσταση σε SCC. Μεγάλης σημασίας είναι το γεγονός ότι υψηλή περιεκτικότητα σε Cu επιτρέπει στα κράματα να υποστούν γήρανση σε υψηλότερες θερμοκρασίες χωρίς επιπλέον απώλεια αντοχής. Γι' αυτό οι κατεργασίες T76 και T73 αναπτύχθηκαν για να παρέχουν αντίσταση σε διάβρωση αποφλοίωσης και SCC με μόνο μέτρια απώλεια αντοχής από την κατάσταση της μέγιστης αντοχής της κατεργασίας T6. Για τις συνθήκες T76 και T73, αυτές οι απώλειες αντοχής κυμαίνονται μεταξύ 6-8% και 10-15% αντίστοιχα [8].

Πολλά από τα προαναφερθέντα κράματα χρησιμοποιούνται με τις επιφάνειες τους γαλβανισμένες για διαβρωτική προστασία. Το γαλβανισμένο κράμα επιλέγεται να είναι ανοδικό ως προς τον πυρήνα του κράματος κατά 80 ως 100 mV ώστε να παρέχει καθοδική προστασία στον πυρήνα. Ο γαλβανισμός που κανονικά χρησιμοποιείται με προϊόντα ελασμάτων και σωλήνων εφαρμόζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί ένας μεταλλουργικός δεσμός με τον πυρήνα και μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ή και στις δύο πλευρές του προϊόντος. Εξαιτίας της καθοδικής προστασίας που παρέχεται από το γαλβανισμό, η διάβρωση επεκτείνεται αρχικά μόνο στην περιφέρεια της επικάλυψης του πυρήνα και μετά απλώνεται κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Η μέθοδος θεωρείται αρκετά αποτελεσματική για την αποφυγή διάτρησης προϊόντων ελασματοουργικής μορφής όπως οι επικαλύψεις πτέρυγας και ατράκτου.

### 2.2.3 ΔΙΑΜΟΡΦΟΥΜΕΝΑ ΕΝ ΨΥΧΡΩ, ΜΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Τα κράματα της σειράς 5XXX είναι τα πιο σημαντικά κράματα του τύπου που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Περιέχουν Mg με μικρότερα ποσά Mn και/ή Cr. Στα κράματα που περιέχουν λιγότερο από 3% κραματικών



προσθηκών τα στοιχεία είτε παραμένουν διαλυτοποιημένα είτε κατανέμονται ως πλήρως αραιωμένα σωματίδια δεύτερης φάσης  $Al_8Mg_5$ . Αυτά τα κράματα έχουν υψηλή αντίσταση σε διάβρωση σχεδόν ίση με εκείνη του εμπορικά καθαρού αλουμινίου. Σε πιο ισχυρά κραματωμένα υλικά, είναι δυνατό να σχηματιστεί ένα σχεδόν συνεχές δίκτυο  $Al_8Mg_5$  κατά μήκος των ορίων των κόκκων, εκτός αν ληφθεί μέριμνα κατά την διεργασία ώστε να επιτευχθεί μια ομοιόμορφη κατανομή μέσα στους κόκκους. Συνεχής περικρυσταλλική κατακρήμνιση  $Al_8Mg_5$  μπορεί να προκαλέσει ευπάθεια σε διάβρωση αποφλοιώσης και SCC.

Στα πιο ισχυρά κραματωμένα υλικά της σειράς, όπως το κράμα 5090, μπορεί να περιέχεται Mg με περιεκτικότητα πάνω από εκείνη του 2024-T3. Αν και μικρότερης αντοχής από το 7075-T6, χάριν της χαμηλότερης πυκνότητας και της εξαιρετικής αντίστασης στη διάβρωση που προσφέρει, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μερικές εφαρμογές αντί του Alclad 7075-T6. Αν και το 5090 είναι ανοδικό ως προς άλλα κράματα υψηλής αντοχής όπως τα 2024, 7075 και άλλα της σειράς 5XXX, τα οποία περιέχουν λιγότερο Mg, εντούτοις είναι συμβατό με το 7072 που είναι από τα πιο κοινά κράματα γαλβανισμού. Το κράμα 5090 είναι επίσης πολύ ανθεκτικό σε αποφλοιώση και SCC [12].

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ - REFERENCES

---

1. T.O. GR1F-16C-2-00GV-00-1, General Vehicle Description HAF Series F-16C/D Blk30 & 50, pp.3-4, 6 June 1997, Lockheed Martin Corp.
2. LaCivita K.J., "Corrosion Prevention System for the F-16 Fighter Aircraft", in *AGARD LS-206 "Aging Combat Aircraft Fleets – Long Term Applications"*, October 1996, pp.8-4.
3. Kroes M.J., Watkins W.A., Delp F., "Aircraft Maintenance & Repair", 6th Edition, Macmillan/McGraw Hill, 1993, pp.27.
4. Hollingsworth E.H., Hunsicker H.Y., "Corrosion Resistance of Aluminium and Aluminium Alloys" in *Metals Handbook*, Volume 13, 9th Edition, Corrosion, ASM, 1987, pp.583.
5. Einar Mattsson, "Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers", Ellis Horwood Ltd, Fig.129, pp.152.
6. Craig B.C., "Handbook of Corrosion Data", ASTM International, 1989, pp.16.
7. Hollingsworth E.H., Hunsicker H.Y., "Corrosion Resistance of Aluminium and Aluminium Alloys" in *Metals Handbook*, Volume 2, 9th Edition, Properties and Selection of Non-ferrous Alloys and Pure Metals, ASTM, Ohio, 1979.
8. AGARD AG-278, Volume I, "AGARD Corrosion Handbook, Volume 1, Aircraft Corrosion: Causes and Case Histories", W.Wallace, D.W.Hoepfner and P.V. Kandachar, July 1985, pp.31-34.
9. Petersen V.C., "Journal of Metals, 23, April 1971, pp.40-47.
10. Posada M., Murr L.E., Niou C.S., Roberson D., Little D., Arrowood R. and George D., "Exfoliation and Related Microstructures in 2024 Aluminum Body Skins on Aging Aircraft" in *Materials Characterization Vol 38*, pp.259-272, 1997.
11. AGARD AG-278, Volume I, "AGARD Corrosion Handbook, Volume 1, Aircraft Corrosion: Causes and Case Histories", W.Wallace, D.W.Hoepfner and P.V. Kandachar, July 1985, pp.93.
12. Kattus J.R., "Aerospace Structural Metals Handbook", Volume 3, Code 3304, US Department of Defence, Materials Information Centre Publication, Belfour Stulen Inc. June 1979.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το περιβάλλον που καλούνται να επιχειρήσουν τα πτητικά μέσα ποικίλει ακόμη και εντός των γεωγραφικών ορίων μιας χώρας. Συνεπώς η διάβρωση των αεροπορικών κατασκευών μπορεί να διαφέρει αισθητά ανάλογα με το περιβάλλον που βρίσκονται. Στην περίπτωση σταθερών κατασκευών, η σοβαρότητα της ατμοσφαιρικής διάβρωσης μπορεί να δώσει μια ένδειξη για την υπολειπόμενη ζωή του δομικού τμήματος. Το πρόβλημα είναι περισσότερο πολύπλοκο στην περίπτωση των αεροπορικών κατασκευών, καθώς κατά την πτήση το πτητικό μέσο συναντά πέραν των δυναμικών φορτίσεων, και ευρέως μεταβαλλόμενες συνθήκες ως αποτέλεσμα της γεωγραφικής θέσης, της εμβέλειας, του υψομέτρου και των μετεωρολογικών συνθηκών. Ωστόσο, επειδή τα πτητικά μέσα βρίσκονται για σημαντική χρονική διάρκεια στο έδαφος, το περιβάλλον της βάσης τους επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη διαβρώσεων και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος (μετεωρολογικά στοιχεία και ατμοσφαιρικοί ρύποι) θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη.



**Εικόνα 3-1:** Τυπικό περιβάλλον λειτουργίας πτητικών μέσων σε αεροπλανοφόρο

Ένα πτητικό μέσο εξάλλου συναντά ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες για σύντομες χρονικές περιόδους. Κατά την απογείωση και την προσγείωση, έρχεται σε επαφή με σκόνη, χαλίκια, πέτρες, αντιπαγωτικά άλατα από το διάδρομο, τα οποία δύναται να προκαλέσουν ζημιά στο εκτεθειμένο μέταλλο ή χρώμα. Ομοίως εκτίθεται σε πλήθος καθαριστικών και αντιπαγωτικών/αποπαγωτικών υγρών τα οποία επίσης δημιουργούν ασυνήθιστες διαβρωτικές συνθήκες αν και προφανώς επιλέχθηκαν για να ελαχιστοποιούν τη διάβρωση. Αεροσκάφη που επιχειρούν από αεροπλανοφόρα είναι εκτεθειμένα σε σοβαρό ψεκασμό θαλάσσιου άλατος, ενώ οι εκπομπές από τις εξαγωγές καυσαερίων των πλοίων δημιουργούν ευρύ πεδίο διαβρωτικών

καυσαερίων, που επίσης είναι επιζήμια (εικόνα 3-1). Ενδεικτικά, στον πίνακα 3-1, παρουσιάζονται υλικά και καταστάσεις που σχετίζονται με την φυσιολογική λειτουργία και συντήρηση των πτητικών μέσων και επηρεάζουν την διαβρωτική συμπεριφορά των υλικών.

<b>Πίνακας 3-1 [1]</b>
<b>Υλικά &amp; Καταστάσεις Συντήρησης που Διαμορφώνουν το Διαβρωτικό Περιβάλλον Λειτουργίας των Πτητικών Μέσων</b>
α) Λάδια και υδραυλικά υγρά.
β) Υλικά καθαρισμού και διαλυτικά χρωμάτων.
γ) Ενέργειες συντήρησης που προκαλούν χαραγές και εκδορές.
δ) Τυχαίες ζημιές κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση.
ε) Οξέα μπαταριών.
στ) Καυσαέρια.
ζ) Αντιπαγωτικά και αποπαγωτικά υγρά.
η) Διαρροές καθαριστικών υγρών κουζινών και τουαλετών.
θ) Ρωγμές υπό φορτίο και/ ή διαρροή.
ι) Μολυσμένο/αλλοιωμένο αεροπορικό καύσιμο.

### 3.2 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑ

Η θερμοκρασία και η υγρασία αποτελούν σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν το ρυθμό της διαβρωτικής προσβολής.

Η υψηλή θερμοκρασία γενικά αυξάνει το βαθμό της διάβρωσης των μετάλλων εφόσον οι διαβρωτικές αντιδράσεις ενεργοποιούνται με την θερμότητα. Η θερμοκρασία μπορεί να αλλάξει την μορφή της προσβολής στα αεροπορικά κράματα από τοπική διάβρωση ή σημειακή διάβρωση σε ομοιόμορφη προσβολή, σε υγρό περιβάλλον ή ατμόσφαιρα με υγρασία. Επίσης, η επίδραση της θερμοκρασίας είναι σημαντική, καθώς επηρεάζει την εξάτμιση των διαβρωτικών διαλυμάτων στην μεταλλική επιφάνεια και κατά συνέπεια την συγκέντρωση των βλαβερών ρύπων.

Η περιεκτικότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα επηρεάζει έντονα καθώς συμβάλλει στην δημιουργία ενός λεπτού συχνά αδιάρατου στρώματος ύδατος στην μεταλλική επιφάνεια. Η ύγραση δημιουργεί ένα ηλεκτρικά αγωγίμο μέσο που προκαλεί ηλεκτρολυτικό κελί στο μέταλλο, το οποίο επιτρέπει την πραγματοποίηση ταχείας διάβρωσης.

Τα περισσότερα μέταλλα σχηματίζουν μια πολύ λεπτή επιφάνεια ενός στρώματος οξειδίου σε χαμηλές ποσότητες υγρασίας, το οποίο είναι συνήθως προστατευτικό. Έτσι δεν παρατηρείται σοβαρή διάβρωση μέχρι η υγρασία να φτάσει μια κρίσιμη τιμή που εκφράζεται με ποσοστό σχετικής υγρασίας (relative humidity – RH). Αυτή είναι συνήθως περίπου 60% RH. Σε υψηλότερα ποσοστά υγρασίας, λόγω της συμπύκνωσης της ύγρασης στα στρώματα του σχηματιζόμενου οξειδίου ή της εξάτμισης των προϊόντων της διάβρωσης, μπορεί να συμβεί αύξηση του βαθμού διάβρωσης. Για μερικά μέταλλα η ανωτέρω κρίσιμη τιμή υγρασίας μπορεί να επηρεαστεί από ρύπους στην ατμόσφαιρα οι οποίοι αντιδρούν με τους υδρατμούς.

Κατά συνέπεια, η γνώση των μεταβολών των μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν την θερμοκρασία και την υγρασία είναι καθοριστική προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση του περιβάλλοντος στην διαβρωτική συμπεριφορά των υλικών των πτητικών μέσων. Η ανάγκη γνώσης των παραπάνω μεταβολών επιβάλλει την καταγραφή των ατμοσφαιρικών μεταβλητών που επηρεάζουν την ατμοσφαιρική διάβρωση. Τούτη γίνεται συνήθως μέσω ενός συμβατικού μετεωρολογικού σταθμού.

### 3.3 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ

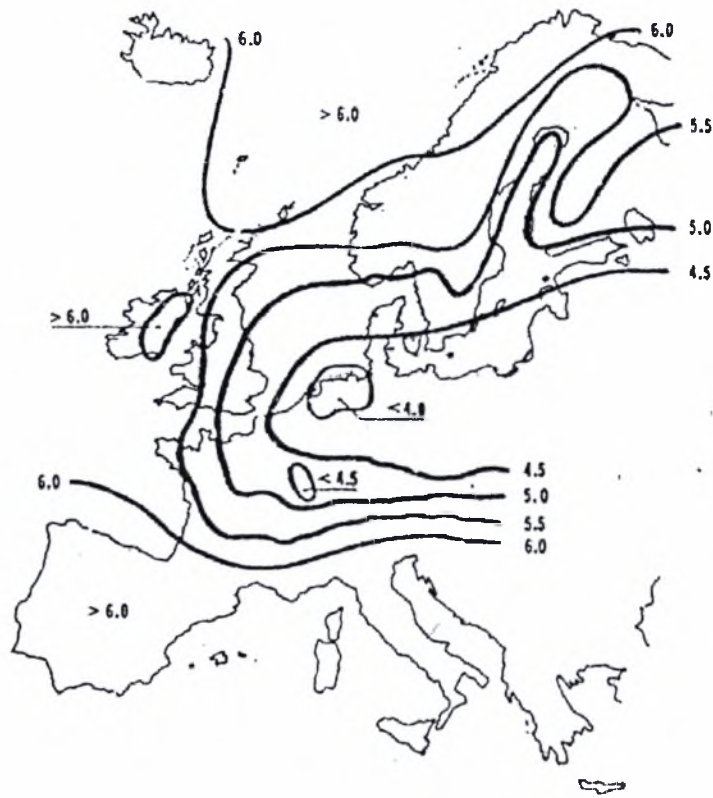
Με την έννοια ατμοσφαιρικοί ρύποι νοούνται συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>4</sub>, NaCl και σωματιδίων καπνού στην ατμόσφαιρα, των οποίων η παρουσία έχει γενικά επιζήμια αποτελέσματα στις μεταλλικές κατασκευές διότι προάγει την διάβρωσή τους. Αυξημένες συγκεντρώσεις των παραπάνω επιζήμιων συστατικών μπορεί να βρεθούν σε περιβάλλοντα εγκαταστάσεων χημικών διεργασιών ή πίσω από εξαγωγές καυσαερίων αεροπλανοφόρων, όπου μπορεί να λάβει χώρα σοβαρότατη διάβρωση.

Στον πίνακα 3-2 περιέχονται τυπικές συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων ανάλογα με τις περιοχές που μελετώνται .

Πίνακας 3-2 [2] Τυπικές Συγκεντρώσεις Ατμοσφαιρικών Ρύπων ανά Τύπο Περιβάλλοντος	
Ατμοσφαιρικοί Ρύποι	Τυπικές Συγκεντρώσεις (μg/m <sup>3</sup> )
SO <sub>2</sub>	Βιομηχανική περιοχή: Χειμώνας 350 Καλοκαίρι 100 Αγροτική περιοχή: Χειμώνας 100 Καλοκαίρι 40
SO <sub>3</sub>	Περίπου 1% της περιεκτικότητας του SO <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> S	Βιομηχανική περιοχή: 1.5 – 90.0 Αστική περιοχή: 0.5 – 1.7 Αγροτική περιοχή: 0.15 – 0.45
NH <sub>4</sub>	Βιομηχανική περιοχή: 4.8 Αγροτική περιοχή: 2.1
Ενώσεις Cl <sub>2</sub> (δείγμα αέρα)	Βιομηχανική περιοχή: Χειμώνας 8.2 (ενδοχώρα) Καλοκαίρι 2.7 Αγροτική περιοχή: Ετήσια μέση τιμή 5.4 (παράκτια)
Ενώσεις Cl <sub>2</sub> (δείγμα βροχοπτώσεως)	Βιομηχανική περιοχή: Χειμώνας 7.9 (ενδοχώρα) Καλοκαίρι 5.3 Αγροτική περιοχή: Χειμώνας 57 (παράκτια) Καλοκαίρι 18 (οι τιμές σε mg/l)
Σωματίδια καπνού	Βιομηχανική περιοχή: Χειμώνας 250 Καλοκαίρι 100 Αγροτική περιοχή: Χειμώνας 60 Καλοκαίρι 15

Ως γενικό αποτέλεσμα των ατμοσφαιρικών ρύπων είναι η ατμόσφαιρα και η βροχή που προέρχεται από αυτή να καθίστανται όξινες. Μελέτη των αναλύσεων βροχοπτώσεων για την Ευρώπη έδειξε ότι με εξαίρεση τη Μεγάλη Βρετανία, η οξύτητα (pH) και η περιεκτικότητα σε θειούχες ενώσεις των βροχοπτώσεων αυξήθηκαν σταδιακά κατά την περίοδο 1956 ως 1966. Οι δε τιμές του pH έπεσαν κατά 0.05 ως 0.10 μονάδες το χρόνο [2]. Ακόμη και στη Μεγάλη Βρετανία τιμή pH 4 δεν είναι ασυνήθιστη για βροχοπτώση σε βιομηχανικές περιοχές.

Η εικόνα 3-2 εμφανίζει την οξύτητα της βροχής πάνω από τη Δυτική Ευρώπη το 1980, σε μορφή γραμμών ισο-pH. Επισημαίνεται η υψηλή οξύτητα (pH < 4) της βροχοπτώσεως πάνω από τμήματα της Δυτικής Γερμανίας και της Ολλανδίας.



Εικόνα 3-2: Χάρτης ισο-pH νερού βροχοπτώσεων στην Δυτική Ευρώπη, 1980 [1]

### 3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ

Τό κλίμα είναι παράγοντας που επιδρά σημαντικά στη διάβρωση, εφόσον εμπεριέχει τις δύο(2) σημαντικές μεταβλητές, την θερμοκρασία και την υγρασία, που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Μια απλή διάκριση του διαβρωτικού περιβάλλοντος βάσει της δριμύτητας της διάβρωσης παρέχεται στον πίνακα 3-3:

Πίνακας 3-3 [3]

ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ			
ΒΑΘΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	ΤΥΠΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ		
Υψηλός βαθμός διάβρωσης	Τροπικό	Βιομηχανικό	Θαλάσσιο
Μέσος βαθμός διάβρωσης	Εύκρατο	Αστικό	Ενδοχώρα
Χαμηλός βαθμός διάβρωσης	Αρκτικό	Αγροτικό	

Ο πίνακας 3-3 δείχνει ότι το πλέον επιρρεπές περιβάλλον σε διάβρωση είναι το θαλάσσιο, βιομηχανικό - τροπικό. Αν και αυτό είναι αρκετά σπάνιο λόγω της έλλειψης βαρειάς βιομηχανίας στις περισσότερες τροπικές χώρες, εντούτοις το εύκρατο βιομηχανικό θαλάσσιο περιβάλλον είναι επίσης αρκετά διαβρωτικό και σύνηθες σε πολλές χώρες.

### 3.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΩΝ

Κατόπιν των ανωτέρω είναι εφικτή η κατηγοριοποίηση της διαβρωτικότητας των ατμοσφαιρών. Τούτο καθίσταται δυνατό μέσω της παρακολούθησης των ατμοσφαιρικών μεταβλητών και ανάλογα με τις τιμές των μετρούμενων μεταβλητών. Η προσέγγιση που ακολουθείται περιγράφεται αναλυτικά στην προδιαγραφή ISO TC156 και βασίζεται σε δύο διαφορετικές μεθόδους.

Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει την έκθεση τυποποιημένων δοκιμίων από χάλυβα, ψευδάργυρο, χαλκό ή αλουμίνιο στην υπό κατηγοριοποίηση ατμόσφαιρα. Τα δοκίμια αφού εκτεθούν για ένα έτος συλλέγονται και μετράται η απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας. Η τιμή της απώλειας μάζας αποτελεί δείκτη μέτρησης της διαβρωτικότητας της ατμόσφαιρας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατηγοριοποίησή της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας κατηγοριοποίησης αποτελεί ο πίνακας 3-4

**Πίνακας 3-4:** Κατηγοριοποίηση διάβρωσης μετάλλων κατά ISO βάσει αποτελεσμάτων απώλειας μάζας μετά ένα έτος έκθεσης [4]

Κατηγορία Διάβρωσης	Χάλυβας ( $g/m^2$ )	Χαλκός ( $g/m^2$ )	Αλουμίνιο ( $g/m^2$ )	Ψευδάργυρος ( $g/m^2$ )
C1	< 10	< 0.9	~ 0	< 0.7
C2	10 - 200	0.9 - 5	< 0.6	0.7 - 5
C3	201 - 400	5.01 - 12	0.6 - 2	5.01 - 15
C4	401 - 650	12.01 - 25	2.01 - 5	15.01 - 30
C5	> 650	> 25	> 5	> 30

Βάσει ISO 9223

Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει μετρήσεις της θερμοκρασίας, χρόνου ύγρανσης, ποσότητας θείου και χλωρίου στην ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία και η υγρασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του χρόνου ύγρανσης, δηλαδή του χρόνου κατά την διάρκεια του οποίου εκτεθιμένες μη αγωγίμες επιφάνειες καθίστανται αρκετά υγρές, ώστε να αρχίσουν να άγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Η εκτίμηση βασίζεται στο ποσοστό του χρόνου στον οποίο η θερμοκρασία είναι άνω των 0°C και η σχετική υγρασία είναι ταυτόχρονα άνω του 80%. Με γνωστό τον χρόνο ύγρανσης, είναι εφικτός ο προσδιορισμός της κατηγορία χρόνου ύγρανσης, σύμφωνα με τον πίνακα 3-5

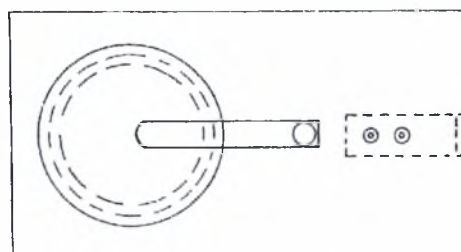
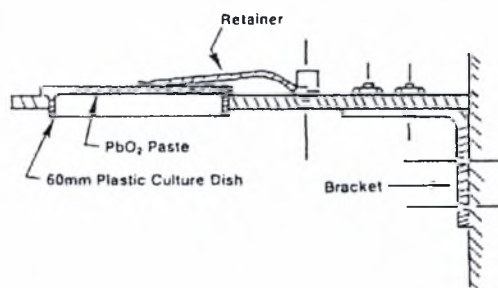
**Πίνακας 3-5 :** Κατηγοριοποίηση του χρόνου ύγρανσης κατά ISO [4]

Κατηγορία Χρόνου Ύγρανσης	Χρόνος Ύγρανσης (%)	Ωρες Ύγρανσης ανά Έτος	Τυπικά Παραδείγματα
T1	< 0.1	< 10	Εσωτερικοί χώροι
T2	0.1 - 3	< 10 - 250	Εσωτερικοί χώροι - Μη θερμαινόμενοι
T3	3 - 30	250 - 2600	Ψυχρό Κλίμα
T4	30 - 60	2600 - 5200	Εξωτερική Έκθεση σε Ηπιο Κλίμα
T5	> 60	> 5200	Εξωτερική Έκθεση σε Τροπικό Κλίμα

Βάσει ISO 9223

Η περιεκτικότητα σε SO<sub>2</sub> δύναται να εκτιμηθεί με απευθείας μέτρηση ή με τη μέθοδο του sulfation plate. Συγκεκριμένα η ποσότητα του ατμοσφαιρικού θείου συνήθως μετράται μέσω ογκομετρικής δειγματοληψίας κατά την οποία δείγματα ατμοσφαιρικού αέρα διέρχονται μέσω ειδικού ανιχνευτή που μετρά απευθείας τη συγκέντρωση SO<sub>2</sub>. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν συσκευές sulfation plate ή sulfation candle όπως αυτή που φαίνεται στην εικόνα 3-3. Οι συσκευές αυτές

βασίζονται στη χημική αντίδραση του διοξειδίου του μολύβδου με τα ατμοσφαιρικά στοιχεία του θείου προς σχηματισμό θειούχου μολύβδου (lead sulfate).



Εικόνα 3-3: Συσκευή sulfation plate [4, 5]

Συνήθως κάθε τριάντα (30) ημέρες το sulfation plate ή sulfation candle εξετάζεται για την παρουσία και καταγραφή της ποσότητας του θειούχου μολύβδου (lead sulfate) (ASTM G91). Ιδιαίτερης προσοχής τυγχάνει η τοποθέτηση της συσκευής ώστε η κατεύθυνσή της να είναι κατακόρυφη με φορά προς τα κάτω ώστε να αποφεύγεται η έκθεση του διοξειδίου του μολύβδου στο νερό της βροχής. Βάσει της πληροφορίας αυτής και του πίνακα 3-6 μπορεί να προσδιοριστεί η τάξη του SO<sub>2</sub>.

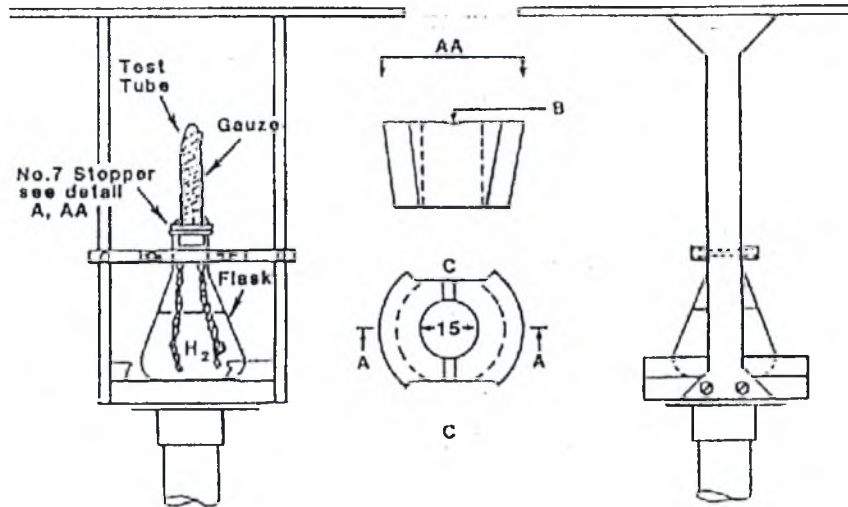
Πίνακας 3-6: Κατηγοριοποίηση SO<sub>2</sub> και Cl<sub>2</sub> κατά ISO [4]

SO <sub>2</sub>			Cl <sub>2</sub>	
Τάξη SO <sub>2</sub>	Ρυθμός Απόθεσης (mg/m <sup>2</sup> day)	Συγκέντρωση (mg/m <sup>3</sup> )	Τάξη Cl <sub>2</sub>	Ρυθμός Απόθεσης (mg/m <sup>2</sup> day)
P0	< 10	< 12	S0	<3
P1	10 – 35	12 – 40	S1	3 – 60
P2	36 – 80	41 – 90	S2	61– 300
P3	> 81	> 91	S3	>300

Βάσει ISO 9223

Παρόμοια προσδιορίζεται η τάξη του Cl<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα μέσω του προσδιορισμού της απόθεσης Cl<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα με τη μέθοδο του «υγρού κεριού» (wet candle). Συγκεκριμένα, η μέθοδος του «υγρού κεριού» έχει χρησιμοποιηθεί σε παραθαλάσσιες περιοχές έκθεσης και συνίσταται σε ένα τυλιγμένο με ύφασμα σωλήνα όπου το ύφασμα διατηρείται υγρό με νερό [6]. Το υγρό ύφασμα λειτουργεί ως συλλέκτης σωματιδίων Cl<sub>2</sub> ή σταγονιδίων. Οι χρόνοι έκθεσης κυμαίνονται από μία εβδομάδα έως ένα μήνα. Μεγαλύτερο διάστημα δεν συστήνεται καθώς το περιεχόμενο νερό θα εξατμιστεί. Όπως και στην περίπτωση του SO<sub>2</sub>, είναι σημαντικό να υπάρχει προστασία από την έκθεση στη βροχή. Η προστασία συνήθως παρέχεται μέσω καλύμματος που υπέρκειται της διάταξης. Για την αποφυγή παγοποίησης του ύδατος στις χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο αντιπαγωτικό. Η διάταξη που περιγράφηκε φαίνεται στην εικόνα 3-4.





Εικόνα 3-4: Συσκευή «υγρού κεριού» (wet candle) [4, 7]

Χαρακτηριστικές τάξεις Cl<sub>2</sub> παρουσιάζονται στον πίνακα 3-6.

Από τον παραπάνω προσδιορισμό των τάξεων των διαφόρων ατμοσφαιρικών μεταβλητών είναι εφικτή η κατηγοριοποίηση των ατμοσφαιρών ως προς τη διαβρωτικότητα τους σύμφωνα με τον πίνακα 3-7 οπότε και προκύπτει η διάβρωση που αναμένεται να συμβεί σε διάφορα αντιπροσωπευτικά μέταλλα όπως χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός και ψευδάργυρος που φαίνονται στον πίνακα 3-8.

Πίνακας 3-7: Κατηγοριοποίηση διαβρωτικού περιβάλλοντος [4]

	T2			T3			T4			T5		
	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3
Unalloyed Steels												
P0-P1	1	2	3-4	2-3	3-4	4	3	4	5	4	5	5
P2	1-2	3	3-4	3-4	3-4	4-5	4	4	5	5	5	5
P3	2	3-4	4	4	4-5	5	5	5	5	5	5	5
Zinc and Copper												
P0-P1	1	1-2	3	3	3	3-4	3	4	5	4	5	5
P2	1-2	2	3	3	3-4	4	3-4	4	5	5	5	5
P3	2	3	3-4	3	3-4	4	4-5	5	5	5	5	5
Aluminum												
P0-P1	1	2-3	4	3	3-4	4	3-4	3-4	5	4-5	5	5
P2	1-2	3-4	4	3	4	4-5	3-4	4	5	4-5	5	5
P3	2-4	4	4	3-4	4-5	5	4-5	5	5	5	5	5

NOTE: T = wetness class; P = SO<sub>2</sub> class; S = chloride class.  
Based on ISO 9223.

Πίνακας 3-8: Κατηγοριοποίηση διάβρωσης βάσει ρυθμών ατμοσφαιρικής διάβρωσης κοινών μετάλλων σε μm/year [4]

Corrosion Class	Steel		Copper		Zinc		Aluminum		Weathering Steel	
	ST	LT	ST	LT	ST	LT	ST	LT	ST	LT
1	<0.5	<0.1	<0.01	<0.01	<0.1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.1	<0.1
2	0.5-2	0.1-1.5	0.01-0.1	0.01-0.1	0.1-0.5	0.01-0.5	0.01-0.025	0.01-0.02	0.1-2	0.1-1
3	2-10	1.5-6	0.1-2	0.1-1.5	0.5-2	0.5-2	0.025-0.2	0.02-0.2	2-8	1-4
4	10-35	6-20	2-3	1.5-3	2-4	2-3.5	0.2-1.0	0.2-1.0	8-15	4-10
5	>35	>20	>3	>3	>4	>3.5	>1.0	>1.0	>15	>10

NOTE: ST = average corrosion rate during the first ten years of exposure; LT = steady state corrosion rate for long-term exposures.  
Based on ISO 9224.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω είναι εφικτή η κατηγοριοποίηση της διαβρωτικότητας των ατμοσφαιρών σε τέσσερις(4) γενικές κατηγορίες:

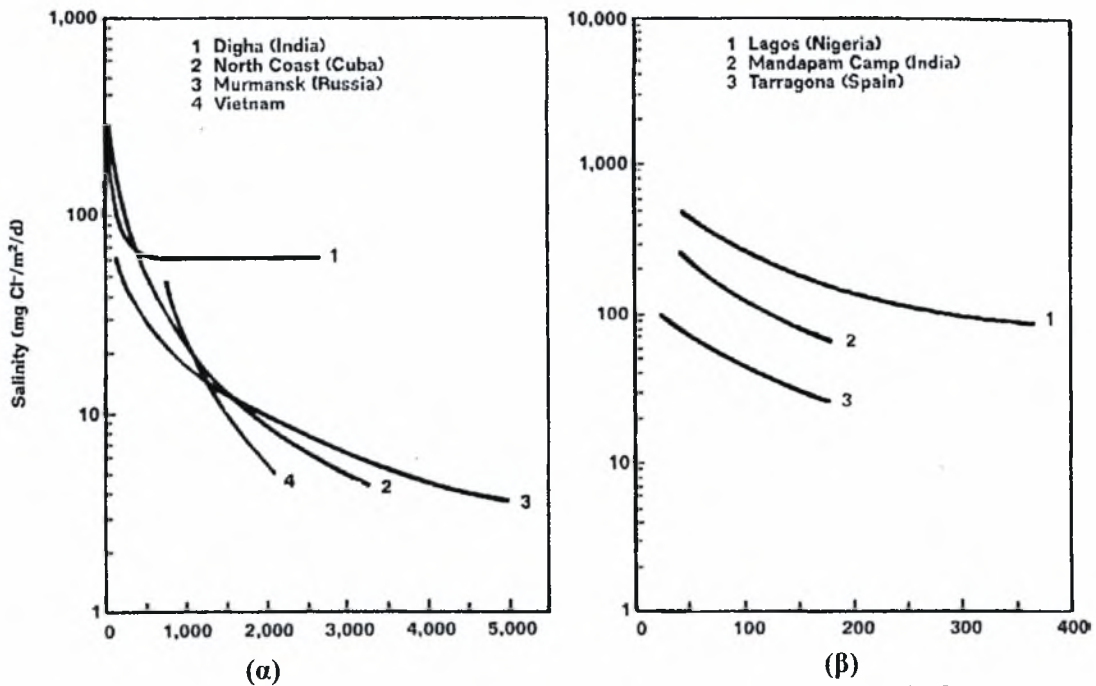
α. Υπαίθρια (αγροτική) ατμόσφαιρα (Rural). Ως τέτοια χαρακτηρίζεται η ατμόσφαιρα που δεν περιέχει χημικούς ρύπους, περιέχει ωστόσο οργανικά και ανόργανα αιωρούμενα σωματίδια. Ο ρυθμός εναπόθεσης SO<sub>2</sub> είναι μικρότερος από 10mg SO<sub>2</sub> ανά m<sup>2</sup>/ημέρα και ο ρυθμός εναπόθεσης αλάτων χλωρίου μικρότερος από 5mg NaCl ανά m<sup>2</sup>/ημέρα [8]. Ο κυριότερος διαβρωτικός παράγοντας είναι ο συνδυασμός υγρασίας, οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα. Άνυδρες και τροπικές ατμόσφαιρες θεωρούνται ειδικές περιπτώσεις της υπαίθριας ατμόσφαιρας λόγω των ακραίων τιμών σχετικής υγρασίας και ύγρανσης. Γενικά η κατηγορία αυτή θεωρείται ως η λιγότερο διαβρωτική.

β. Αστική ατμόσφαιρα (Urban). Είναι παρόμοια με την υπαίθρια υπό την έννοια ότι είναι μακριά από βιομηχανικά συγκροτήματα (και γενικότερα πηγές βιομηχανικών ρύπων). Τα υλικά που βρίσκονται στις περιοχές αυτές, υπόκεινται σε συνηθισμένες βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με τυπικούς αστικούς ρύπους SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub> που προέρχονται κυρίως από τα καυσαέρια κινητήρων εσωτερικής καύσης και των καυστήρων κτιρίων/κατοικιών. Τυπικές τιμές ρυθμού εναπόθεσης SO<sub>2</sub> κυμαίνονται μεταξύ 10-80mg ανά m<sup>2</sup>/ημέρα [8].

γ. Βιομηχανική ατμόσφαιρα (Industrial). Ως τέτοια χαρακτηρίζεται η ατμόσφαιρα που είναι επιβαρυνμένη με τους ρύπους που εκπέμπονται από εγκαταστάσεις βαρειάς βιομηχανίας. Περιέχουν συνήθως διοξείδιο του θείου, χλωρίδια, φωσφορικά και νιτρικά άλατα ή άλλους παρόμοιους ρύπους. Ο ρυθμός εναπόθεσης SO<sub>2</sub> είναι αρκετά υψηλός, μέχρι 200mg ανά m<sup>2</sup>/ημέρα [8]. Ο συνδυασμός των προαναφερομένων ρύπων με τις βροχοπτώσεις ή την πρωινή δροσιά, συνθέτουν διαβρωτικά υγρά που προσβάλλουν τα υλικά που εκτίθενται στην κατηγορία αυτή των ατμοσφαιρών.

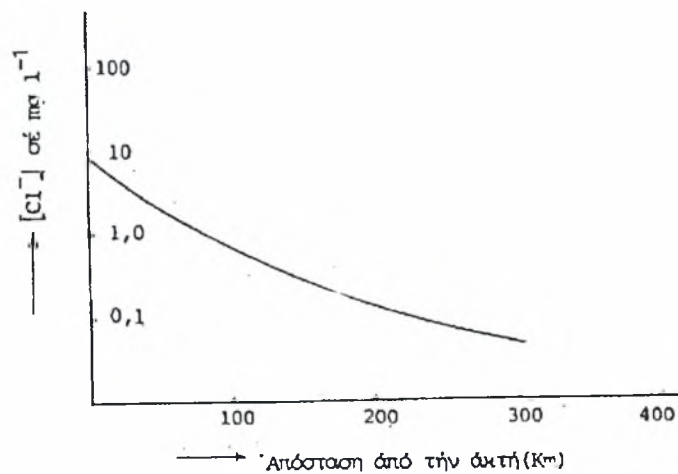
δ. Θαλάσσια Ατμόσφαιρα (Marine). Ως τέτοια χαρακτηρίζεται η ατμόσφαιρα που είναι πλούσια σε λεπτά σωματίδια-κρυστάλλους θαλασσίου αλάτος που μεταφέρονται με τους ανέμους και εναποτίθενται στα υλικά με μορφή ψεκασμού. Ο μέσος ρυθμός εναπόθεσης αλάτων χλωρίου κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5-500mg NaCl ανά m<sup>2</sup>/ημέρα. Ωστόσο μπορεί να φθάσει μέχρι και 1500 mg NaCl ανά m<sup>2</sup>/ημέρα κοντά στην ακτή ή πάνω από τη θάλασσα [8, 9]. Θεωρείται από τα πλέον διαβρωτικά περιβάλλοντα λόγω της παρουσίας αλάτων NaCl, δηλαδή χλωριδίων.

Τυπικές τιμές μεγεθών μικροκρυσταλλικών μορφών αλάτων της θάλασσας (κυρίως NaCl) που προέρχονται από την εξάτμιση των σταγονιδίων του θαλασσίου ύδατος, είναι από 1 – 10 μm και φθάνουν σε ύψος 500m πάνω από τις θαλάσσιες περιοχές [10]. Παρόμοιες τιμές μεγέθους αλάτων (1μm-20μm) και ύψους από τη θάλασσα (300m-700m) έχουν καταγραφεί και από άλλους ερευνητές [11] όπως φαίνεται στην εικόνα 3-5α,β.

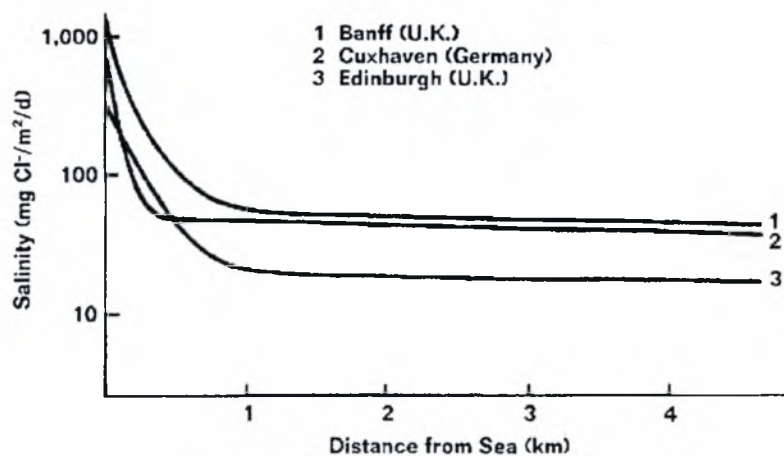


Εικόνα 3-5: Ρυθμοί εναπόθεσης Cl<sub>2</sub> σε συνάρτηση με το ύψος [11]

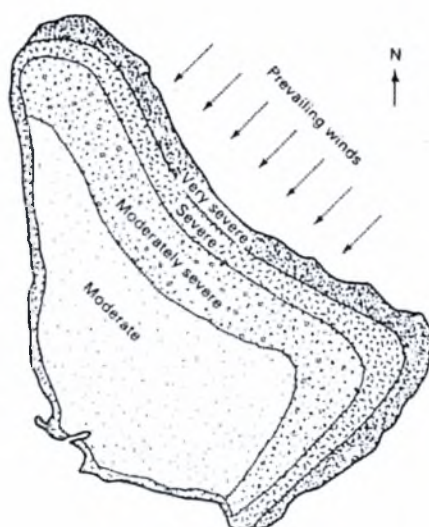
Η ποσότητα άλατος (χλωριδίων) στο θαλάσσιο περιβάλλον ελαττώνεται εκθετικά, αυξανόμενης της απόστασης από την ακτογραμμή (εικόνα 3-6α,β [9, 10]) και επηρεάζεται σημαντικά από την διεύθυνση και την ταχύτητα των ανέμων που επιδρά στον ρυθμό διάβρωσης όπως φαίνεται παραστατικά στην εικόνα 3-7.



Εικόνα 3-6α: Μείωση της συγκέντρωσης χλωρίου στη βροχή συναρτήσει της αποστάσεως από την ακτή προς το εσωτερικό της ξηράς. [10]

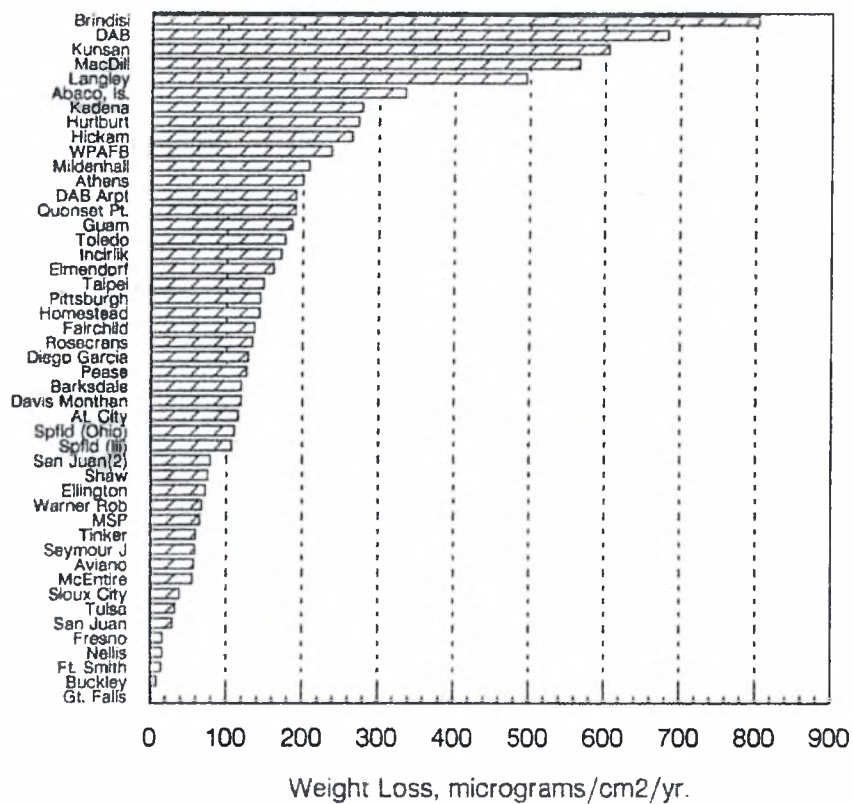


**Εικόνα 3-6β:** Εναπόθεση Cl<sub>2</sub> σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή προς το εσωτερικό της ξηράς [9]



**Εικόνα 3-7:** Επίδραση της διεύθυνσης και ταχύτητας των ανέμων στον ρυθμό διάβρωσης ως αποτέλεσμα της διαφοροποίησης της συγκέντρωσης των χλωριδίων στον αέρα [12]

Η εικόνα 3-8, παρέχει ένα γενικό οδηγό σχετικής διαβρωτικότητας ατμοσφαιρών ανά τον κόσμο, βάσει της διαβρωτικής συμπεριφοράς που παρατηρήθηκε [13] σε κράμα αλουμινίου αεροπορικών κατασκευών (Al 6061).



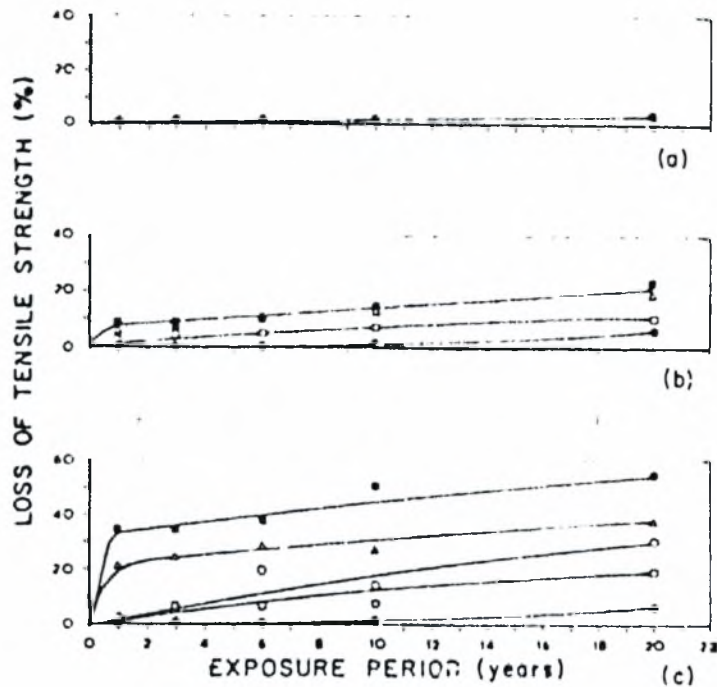
**Εικόνα 3-8:** Διαβρωτικότητα ατμοσφαιρών με βάση την απώλεια βάρους κράματος αλουμινίου (Al 6061) κατόπιν έκθεσης στο εξωτερικό περιβάλλον (χρόνος έκθεσης 270-365 ημέρες κανονικοποιημένος σε ένα (1) έτος). [13]

Είναι αξιοσημείωτο ότι περιοχές της Ν.Α. Ευρώπης (Brindisi, Αθήνα κλπ) κατατάσσονται γενικά σε περιοχές υψηλής διαβρωτικότητας. Τούτο είναι περισσότερο σαφές στην εικόνα 3-9, όπου απεικονίζεται μια γενική κατάσταση της έντασης της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος για την Ευρώπη. Στο σχήμα είναι εμφανές ότι στις νότιες περιοχές και ιδιαίτερα στα παράλια της Ελλάδας και της Ιταλίας, επικρατούν άκρως διαβρωτικές συνθήκες.



Εικόνα 3-9: Χάρτης έντασης διαβρωτικότητας περιβάλλοντος στην Ευρώπη [14]

Τα αποτελέσματα μακροχρόνιας έκθεσης μιας επιλογής κραμάτων αλουμινίου σε αγροτικό, βιομηχανικό και θαλάσσιο (θαλάσσιο-παράκτιο) περιβάλλον στις ΗΠΑ φαίνονται στην εικόνα 3-10. Στην εικόνα, η έκταση της διαβρωτικής προσβολής υποδεικνύεται από την απώλεια της αντοχής σε εφελκυσμό σε προκατεργασμένα με τάση δοκίμια διαφόρων υλικών.



**Εικόνα 3-10:** Αποτελέσματα 20-ετους έκθεσης σε αγροτικό (διάγραμμα (α)), βιομηχανικό (διάγραμμα (b)) και παραθαλάσσιο (διάγραμμα (c)) περιβάλλον κραμάτων Al 2017-T3 (■), 3003-H14 (□), 6051-T4 (Δ), 1100-H4 (ο) και Alclad 2017-T3 (●) [15]

Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι η σοβαρότητα της προσβολής αυξάνει μετακινούμενοι από το αγροτικό στο βιομηχανικό και στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η εικόνα 3-10 δεικνύει επίσης ότι η διαβρωτική προσβολή λαμβάνει χώρα ταχέως στην αρχή και στην συνέχεια τείνει να επιβραδυνθεί, πιθανώς καθώς στην επιφάνεια σχηματίζονται προϊόντα διάβρωσης ή προστατευτικό στρώμα οξειδίων.

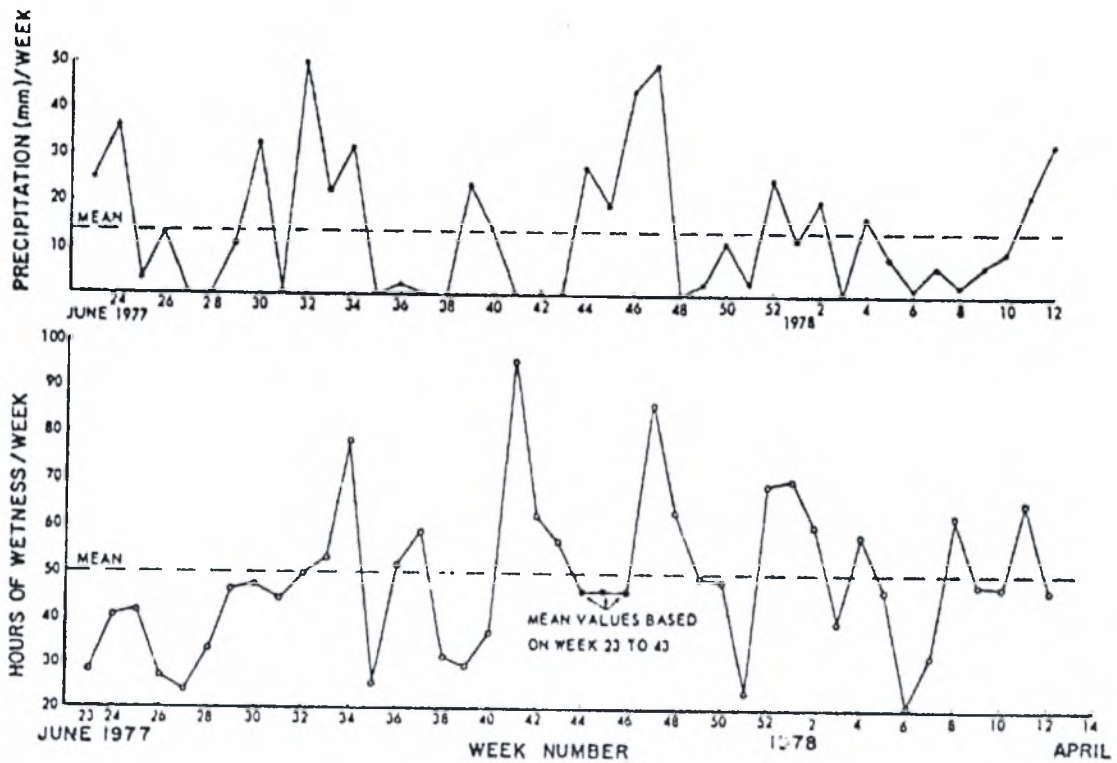
### 3.6 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, το περιβάλλον ενός αεροδρομίου ή μιας αεροπορικής βάσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα επίδρασης στην διάβρωση των αεροπορικών κατασκευών. Τούτο οφείλεται στη μεγάλη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής που περνά ένα αεροσκάφος στα αεροδρόμια σταθμευμένο και εκτεθειμένο στις καιρικές συνθήκες, είτε μέσα σε χώρους συντήρησης. Δυστυχώς μόλις τα τελευταία έτη έχουν αρχίσει να συγκεντρώνονται στοιχεία με συστηματικότητα για τα διάφορα είδη περιβάλλοντος αεροδρομίων (εικόνα 3-8) [16, 17]. Από τα συγκεντρωθέντα δεδομένα έχουν εξαχθεί ορισμένα ενδιαφέροντα στοιχεία τα οποία είναι αντιπροσωπευτικά για το περιβάλλον των αεροδρομίων της Ευρώπης.

Σε μελέτες που διεξήχθησαν [1] στο παρελθόν, καταγράφηκαν οι καιρικές συνθήκες εντός αεροδρομίου για περίοδο άνω των δέκα μηνών και μετρήθηκαν μεταξύ άλλων το ποσό της υγραποίησης, τα μέγιστα και ελάχιστα ποσά υγρασίας και ο χρόνος ύγρανσης.

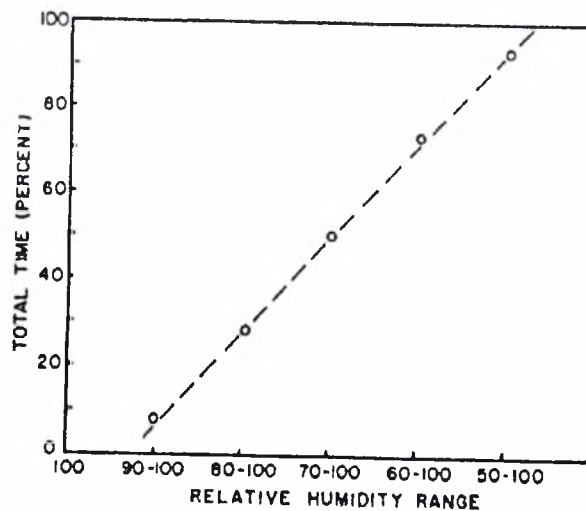
Η εικόνα 3-11 δείχνει την εβδομαδιαία μέση υγρασία και το χρόνο ύγρανσης κατά την διάρκεια της περιόδου παρατήρησης. Όπως φαίνεται η συνολική υγρασία μεταβάλλεται από 0 μέχρι περίπου 50 mm/εβδομάδα, αλλά περισσότερο σημαντική είναι η παρατήρηση ότι ο μέσος χρόνος ύγρανσης είναι περίπου 50 ώρες/εβδομάδα.

Μεγάλο μέρος από αυτό το χρόνο πρέπει να αποδοθεί στην συμπύκνωση και στην δροσιά που σχηματίζεται κατά τις πρώτες πρωινές ώρες (κατά την ανατολή του ηλίου). Αν και ενδέχεται να μην μπορεί να συσχετιστεί ένας υψηλός χρόνος ύγρανσης με την μέτρηση της διάβρωσης εφόσον η παρουσία ή η απουσία ρύπων δε λαμβάνεται υπόψη, είναι λογικό να βγει το συμπέρασμα ότι για ένα υπολογίσιμο μέρος του χρόνου, οι συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη διάβρωσης.



Εικόνα 3-11: Χρόνοι ύγρανσης και βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια έκθεσης δοκιμών σε περιοχή της Ευρώπης [1].

Από την ημερήσια μετρούμενη μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία μπορεί να σχεδιαστεί η διάρκεια του ποσοστού υγρασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 3-12.

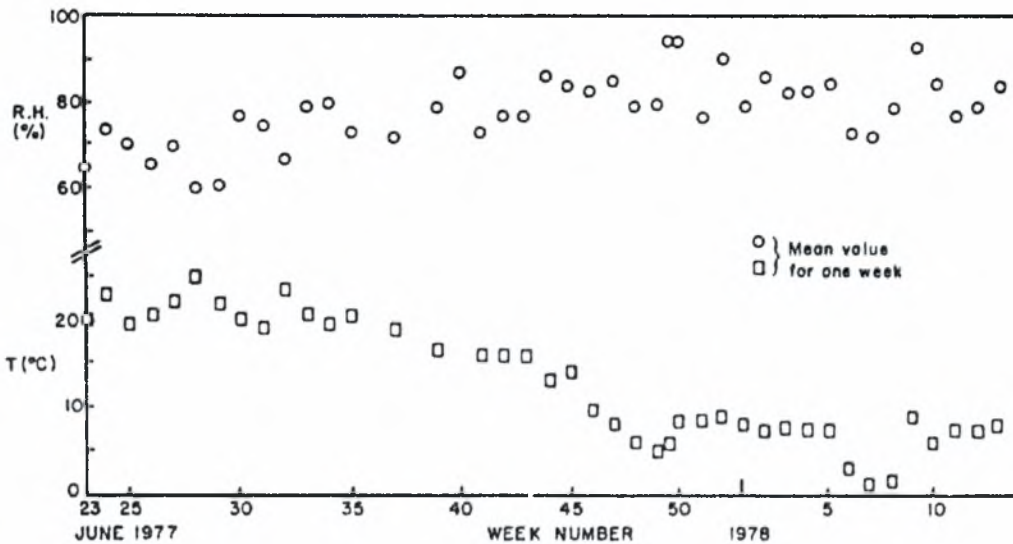


Εικόνα 3-12: Διάρκεια ποσοστών σχετικής υγρασίας (από 1-6-1977 έως 31-3-1978) [1]



Το σχήμα δείχνει ότι η σχετική υγρασία είναι πάνω από 70% για περίπου το 50% του χρόνου. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, στα περισσότερα μεταλλικά υλικά θα συμβεί πολύ γρήγορη διάβρωση όταν η σχετική υγρασία ξεπεράσει μερικές κρίσιμες τιμές, συνήθως περίπου 60%. Τα ανωτέρω αποτελέσματα δείχνουν ότι ευνοϊκές συνθήκες για διάβρωση εμφανίζονται για περίπου 70% του εξεταζόμενου χρόνου.

Ελήφθησαν επίσης μετρήσεις στην θερμοκρασία και στην σχετική υγρασία σε ένα από τα καταφύγια (shelter) των αεροσκαφών στην ίδια αεροπορική βάση [1]. Από τα στοιχεία καθορίστηκαν οι μέσες τιμές για κάθε εβδομάδα και τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 3-13. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η σχετική υγρασία αυξάνει με την μείωση της θερμοκρασίας και για σημαντική χρονική περίοδο υπερβαίνει το 80%. Στις υψηλές αυτές τιμές σχετικής υγρασίας, ένας ηλεκτρολύτης μπορεί να σχηματιστεί εύκολα από τα διαλυμένα στο νερό προϊόντα μόλυνσης και επομένως μπορεί να συμβεί πολύ γρήγορα διάβρωση.



Εικόνα 3-13: Τιμές υγρασίας και θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο εντός καταφυγίου αεροσκαφών (shelter) [1]

Είναι αξιοσημείωτο ότι υψηλό ποσοστό πτήσεων από την συγκεκριμένη αεροπορική βάση αφορούσε πτήσεις χαμηλού ύψους πάνω από θάλασσα και πτήσεις ναυτιλίας εκτελούμενες σε βιομηχανικό περιβάλλον και ύψη μεταξύ 150 m - 1500 m. Κατά συνέπεια η συναντώμενη ρύπανση στις πτήσεις και οι δεσμευμένοι στην δομή του αεροσκάφους ρύποι μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα σοβαρή διάβρωση όταν το αεροσκάφος επιστρέψει στο περιβάλλον υψηλής υγρασίας του καταφυγίου αεροσκαφών.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ - REFERENCES

1. AGARD AG-278, Volume I, "AGARD Corrosion Handbook, Volume 1, Aircraft Corrosion: Causes and Case Histories", W.Wallace, D.W.Hoepfner and P.V. Kandachar, July 1985, Section 1, Chapter 2, pp.1-7.
2. Rowlands, J.C., "The Atmosphere" in Corrosion, Vol 1, Chapter 2, Edited by L.L. Schrier, Newnes-Butterworths Press, London and Boston, 1977.
3. Corrosion Manual, Section 1, Air Publication 119A-0200-1A, United Kingdom, Ministry of Defence, 2<sup>nd</sup> Edition, October 1978
4. "Atmospheric Tests" S.W. Dean Jr., in *Corrosion Tests and Standards* by Robert Baboian, Chapter 11, pp.117-119.
5. ASTM G91.
6. Foran M.R., Gibbons E.V. and Wellington J.R., "The Measurement of Atmospheric Sulfur Dioxide and Chlorides", Chemistry in Canada, Vol.10, No 5, May 1958, pp.33-41
7. ISO 9225.
8. Mattson E., "Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers", Ellis Horwood Ltd, pp.81-82.
9. M. Morcillo, FNACE, B.Chico, E. Otero and L. Mariaca "Effect of Marine Aerosol on Atmospheric Corrosion" in *Materials Performance*, Vol.38, Issue 4, April 1999, pp.72-77.
10. Αυγουστίνος Κ. Αναγνωστόπουλος, "Η Ρύπανση του Περιβάλλοντος", Σελ. 64-65, Έκδοση 2<sup>η</sup>, 1989
11. Klassen R.D.and Roberge P.R. "Aerosol transport modeling as an aid to understanding atmospheric corrosivity patterns", in *Materials and Design*, Vol 20, pp.159-168, 1999.
12. Heidersbach R.H., "Marine Corrosion" in *Metals Handbook*, Volume 13, 9<sup>th</sup> Edition, Corrosion, ASM 1987, pp.909, Fig.36.
13. D.T. Peeler and R.C.Kinzie, "Quantification of Structural Impact of Lap Joint Corrosion Damage", presentation in USAF ASIP Conference 2000, 5-7 Dec 2000, San Antonio, Texas, USA (Battelle Institute Project).
14. Corrosion Advisory, FAA, AC43-4A, 25 Jul 1991
15. *Symposium on Atmospheric Corrosion of Non-Ferrous Metals*, ASTM-STP-175, 1956, pp.27
16. "Aircraft Weapon Systems Cleaning and Corrosion Control", NAVAIR 01-1A-509, TO 1-1-691, 1 May 2001, Table E-1, pp E4-E8
17. W.H.Abbott, "Field Site Corrosion Monitoring" presentation, Battelle-Columbus

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ Α/ΦΟΥΣ

#### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ



**Εικόνα 4-1:** Αεροπορικό Ατύχημα B737 - Αποκόλληση Τμήματος Ατράκτου λόγω Διάβρωσης

Τα πτητικά μέσα επιθεωρούνται για διάβρωση και για την κατάσταση των προστατευτικών επιστρωμάτων κατά τις εργασίες προγραμματισμένης συντήρησης. Αυτές διενεργούνται πιο συχνά όταν είναι γνωστό ότι το μέσο περιέχει υλικά ή δομικά στοιχεία που είναι επιρρεπή σε διάβρωση ή/και όταν επιχειρεί υπό αντίξοες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας. Συνήθως οι επιθεωρήσεις για διάβρωση διενεργούνται στα πλαίσια γενικότερων επιθεωρήσεων για άλλες μορφές φθορών-ζημιών ή/και κατά τις προγραμματισμένες αντικαταστάσεις υλικών.

Οπτικές επιθεωρήσεις εκτελούνται στις εξωτερικές επιφάνειες της κατασκευής καθώς και σε όλες τις εσωτερικές κατασκευές που είναι οπτικά προσπελάσιμες μέσω θυρίδων προσιτότητας είτε απ' ευθείας είτε χρησιμοποιώντας ειδικό εξοπλισμό (καθρέπτες, μεγενθυντικούς φακούς, ενδοσκόπια κλπ).

Επιπρόσθετες οπτικές επιθεωρήσεις διενεργούνται με μικρότερη συχνότητα, αλλά εντάσσονται στην τυποποιημένη ολοκληρωμένη επιθεώρηση που διενεργείται σε όλες τις προσιτές εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες. Ως βοηθητικά μέσα για τις υπόψη επιθεωρήσεις χρησιμοποιούνται ειδικοί καθρέπτες, μεγενθυντικοί φακοί, ενδοσκόπια, ειδικές μηχανικές συσκευές και όργανα μετρήσεων.

Στις περιοχές των αεροσκαφών που είναι περισσότερο επιρρεπείς σε δομικά προβλήματα, διενεργούνται ειδικές επιθεωρήσεις χρησιμοποιώντας εκτός των προαναφερομένων συσκευών, και απλές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου όπως διεισδυτικά υγρά (die penetrants) ή δινορεύματα (eddy currents).

Λεπτομερείς επιθεωρήσεις διενεργούνται σε τμήματα που απαιτούν ειδικές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου όπως ακτίνες Χ (X-Rays), μαγνητικά σωματίδια (magnetic particles), διεισδυτικά υγρά, υπέρηχους (ultrasonic). Για την εκτέλεση των παραπάνω ελέγχων, οι περιοχές ή τα εξαρτήματα της κατασκευής απαιτούν συνήθως εκτεταμένα επίπεδα αποσυναρμολόγησης.

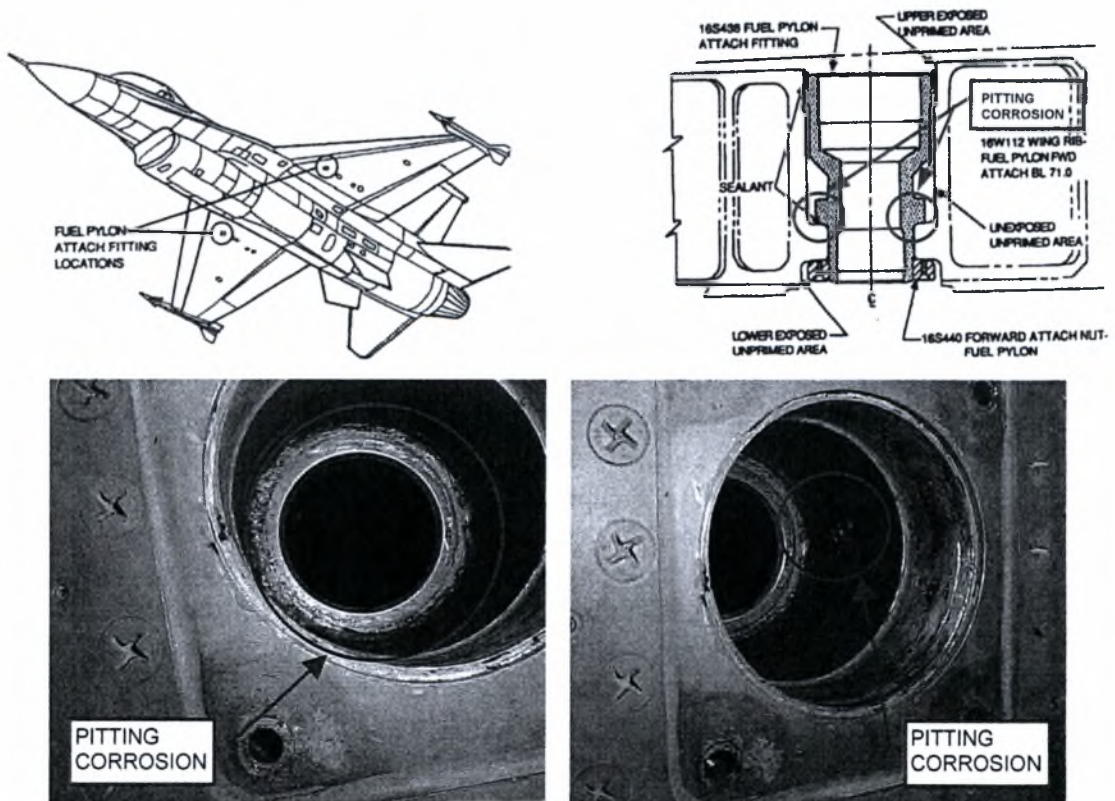
Οι προαναφερθείσες επιθεωρήσεις προγραμματίζονται και οργανώνονται ώστε να ανιχνεύουν όλους τους τύπους δομικών αστοχιών και διαβρώσεων σε πρώιμο-αρχικό στάδιο. Συνέπεια ακόμη και της ελάχιστης διάβρωσης είναι ότι μπορεί να αποκρύψει άλλες μορφές αστοχιών όπως ρωγμές από κόπωση. Γι' αυτό μεταξύ των στόχων της σύγχρονης έρευνας περιλαμβάνεται η ανάπτυξη τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου (Non-Distractive Inspection - NDI) που να προσδίδουν ικανότητα διάκρισης και διαχωρισμού των διαφορετικών μορφών ζημιών-αστοχιών.

## 4.2 ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΓΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

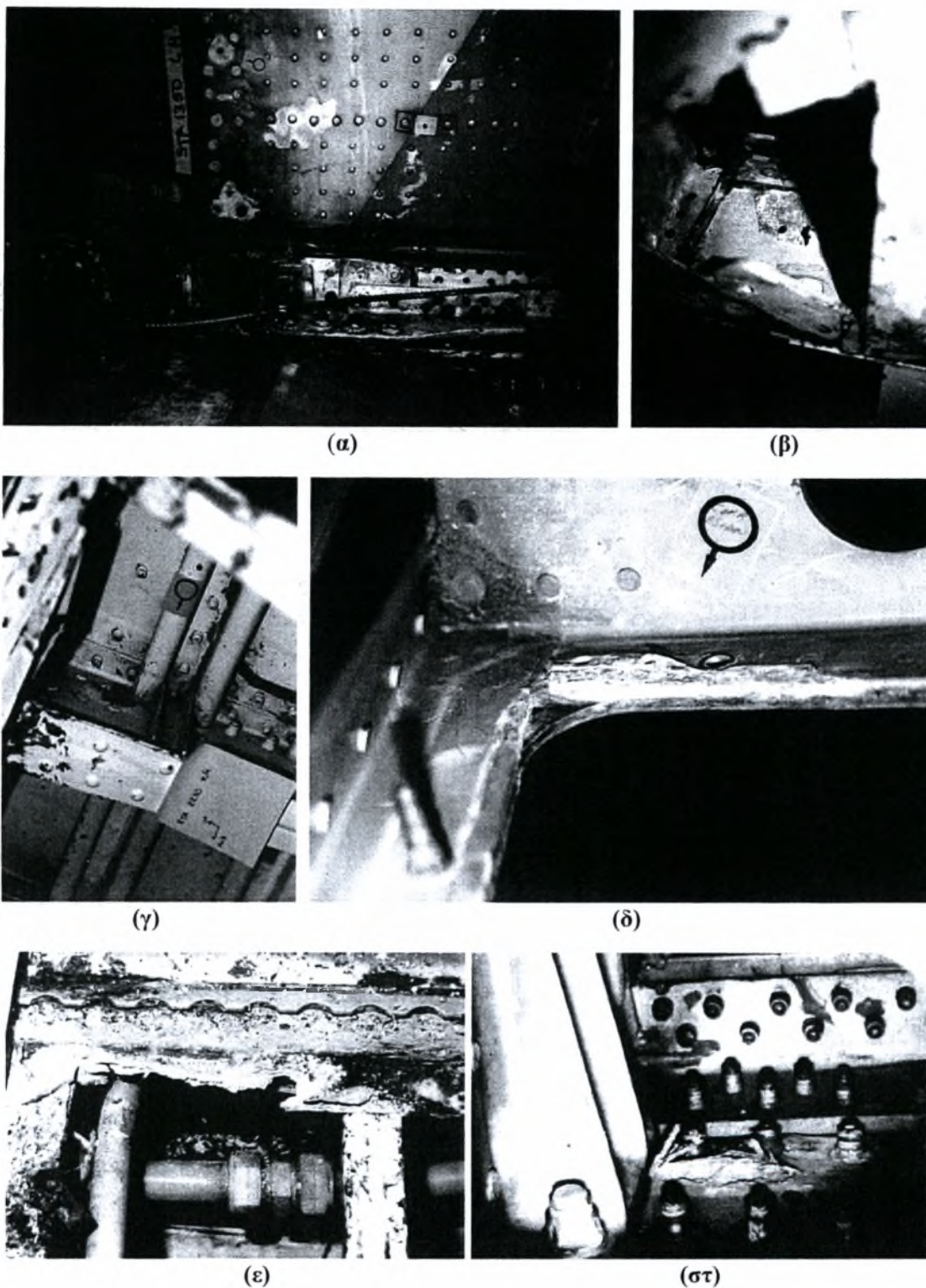
Η διάβρωση σε άβαφες, μη προστατευμένες επιφάνειες γίνεται αρχικά αντιληπτή ως εναποθέσεις ή στίγματα. Συνήθως παρατηρείται σε περιοχές ραφών της επικάλυψης, σε συνδέσεις ελασμάτων, σε επικαλυπτόμενα ελάσματα όπου συσσωρεύονται σκόνη και βρωμιά, σε σχισμές ή ενώσεις όπου συσσωρεύονται υπολείματα χημικών υγρών όπως υγρά καθαρισμού ή υλικά απομάκρυνσης διάβρωσης. Ιδιαίτερης προσοχής χρήζουν περιοχές που η υγρασία δεν εξατμίζεται γρήγορα. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις φαίνονται στις εικόνες 4-2 έως 4-4:



Εικόνα 4-2: Περίπτωση εκτεταμένης διάβρωσης ατράκτου αεροσκάφους



Εικόνα 4-3: Περίπτωση σημειακής διάβρωσης σε μαχητικό αεροσκάφος [1]



**Εικόνα 4-4α,β,γ,δ,ε,στ:** Περιπτώσεις διάβρωσης αποφλοιώσης σε μεταγωγικό αεροσκάφος

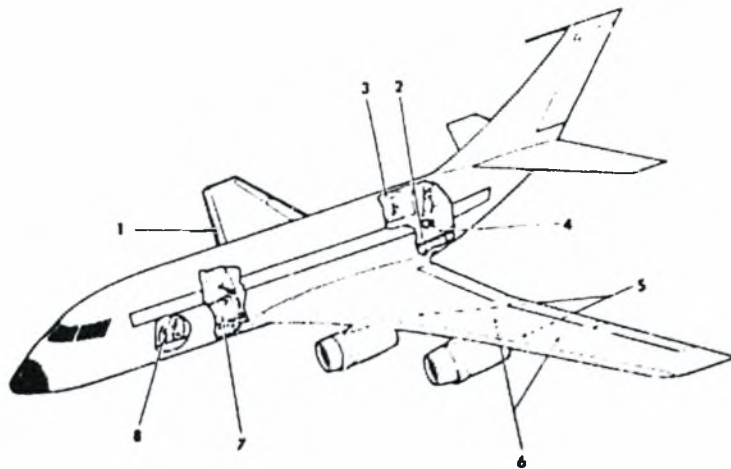
Τα προϊόντα διάβρωσης των κοινών αεροπορικών κραμάτων έχουν χαρακτηριστική εμφάνιση. Έτσι η παρατήρηση αποχρωματισμού και σχημάτων "φλεβών" στις καθαρές επιφάνειες του μετάλλου αποτελεί έγκαιρη ένδειξη για παρουσία διάβρωσης. Η εμφάνιση των προϊόντων διάβρωσης σε κοινά αεροπορικά κράματα φαίνεται στον πίνακα 4-1.

<b>Πίνακας 4-1: Διάβρωση Αεροπορικών Κραμάτων (Προϊόντα και Εμφάνιση) [2]</b>		
<b>ΤΥΠΟΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΝΗΘΗΣ ΣΥΝΑΝΤΩΜΕΝΟΣ ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ</b>	<b>ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ</b>
Κράματα Αλουμινίου	Σημειακή, Περικρυσταλλική, Αποφλοίωση, SCC	Επιφάνεια με όψη «σκωρίασης». Παρουσία λευκής ή γκρι σκόνης
Κράματα Τιτανίου	Υψηλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Παρατεταμένη επαφή με χλωριωμένα διαλυτικά ενδέχεται να υποβιβάσει τις ιδιότητες του υλικού.	Μη ορατά προϊόντα (μακροσκοπικά) σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω των 370°C)
Κράματα Μαγνησίου	Εντονα επιρρεπή σε σημειακή διάβρωση	Λευκές συσσωματώσεις λευκής σκόνης και λευκά στίγματα επί των επιφανειών του υλικού. Επιφάνεια με όψη «σκωρίασης».
Χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης (Σειρές 4000-8000)	Οξειδώσεις, σημειακή και περικρυσταλλική διάβρωση	Καφε-κόκκινο οξείδιο (σκουριά)
Ανοξειδωτοι Χάλυβες (CRES) (Σειρές 300-400)	Σημειακή διάβρωση σε παραθαλάσσιο περιβάλλον. Διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (SCC). Περικρυσταλλική (σειρά 300).	Διάβρωση αντιληπτή από τραχεία επιφάνεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις κόκκινες, καφέ ή μαύρες γραμμώσεις
Κράματα βάσεως Νικελίου (Inconel)	Γενικά ικανοποιητική ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Επιρρεπή σε σημειακή διάβρωση παρουσία θαλάσσιου ύδατος	Επικαθίσεις πράσινης σκόνης
Κράματα βάσεως Χαλκού, Ορείχαλκος, Μπρούντζος	Επιφανειακή και περικρυσταλλική διάβρωση	Μπλέ ή πρασινο-μπλε επικαθίσεις
Χρώμιο (προστατευτική επικάλυψη χαλύβων)	Σημειακή διάβρωση (προάγει την οξείδωση του χάλυβα όπου η προστατευτική επικάλυψη απομακρύνεται)	Μη ορατά προϊόντα. Φλύκταινες της επικάλυψης λόγω διάβρωσης.

Διάβρωση εμφανίζεται σπανιότερα σε προστατευμένες επιφάνειες (με βαφή χρώματος ή άλλες επιστρώσεις, ανοδίωση, επινικέλωση κτλ) παρά σε μη προστατευμένες επιφάνειες. Ωστόσο εάν το προστατευτικό επίστρωμα υποστεί ζημιά (π.χ. εκδορά) και το γυμνό μέταλλο εκτεθεί σε κάποιο διαβρωτικό μέσο θα συμβεί διάβρωση με ταχείς ρυθμούς. Το προστατευτικό επίστρωμα τότε μπορεί να αποκρύψει τη διάβρωση και οι πρώτες ενδείξεις μπορεί να είναι αποχρωματισμός του επιστρώματος ή η ανάπτυξη φυσαλλίδων ή η αποφλοίωση της βαφής. Οι ύποπτες περιοχές επιστρωμάτων πρέπει να αφαιρεθούν ώστε να επιτρέψουν πιο κοντινή επιθεώρηση του υποκείμενου μετάλλου.

#### 4.3 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΥΠΑΘΕΙΣ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Προβλήματα διαβρώσεων μπορεί να εμφανιστούν σε διάφορες περιοχές του πτητικού μέσου, ανάλογα με τον τύπο και το περιβάλλον που επιχειρεί. Η εικόνα 4-5 δείχνει μερικές από τις πλέον ευπαθείς σε διάβρωση περιοχές σε ένα μεταφορικό αεροσκάφος ευρείας ατράκτου.



**1. Κάτω από τα συστήματα αποπαγοποίησης.**  
Υγρασία συσσωρεύεται κάτω από συστήματα αποπαγοποίησης και συμβάλλει στην διάβρωση.

**2. Δομικά στοιχεία και υπερκατασκευή πατώματος.**  
Μεταλλικά πατώματα και υποκείμενες κατασκευές διαβρώνονται εάν είναι σε συνεχή επαφή με οποιαδήποτε μορφή υγρασίας.

**3. Θύρες επιβατών, πληρωμάτων και φορτοεκφόρτωσης φορτίων.**  
Τα δάπεδα και η δομή σ' αυτές τις περιοχές διαβρώνονται ως αποτέλεσμα της έκθεσης τους σε βροχοπτώσεις και στην υγρασία.

**4. Περιοχές ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (κουζίνα).**  
Υπολείμματα φαγητού, χυμοί φρούτων και άλλα υγρά σε παρατεταμένη επαφή με τη μεταλλική κατασκευή προκαλούν διάβρωση ιδιαίτερα όταν τα προστατευτικά επιστρώματα έχουν καταστραφεί.

**5. Περιοχές εκτεθειμένες σε καυσαέρια.**  
Καυσαέρια στην επικάλυψη της ατράκτου και των πτερύγων καθώς και διαρροές στη δομή της πτέρυγας μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα και να προκαλέσουν διάβρωση στα υποκείμενα μεταλλικά υλικά.

**6. Εσωτερικές δεξαμενές καυσίμων.**  
Διάβρωση μπορεί να συμβεί στις κατώτερες περιοχές των εσωτερικών δεξαμενών καυσίμων λόγω συγκέντρωσης νερού από συμπύκνωση.

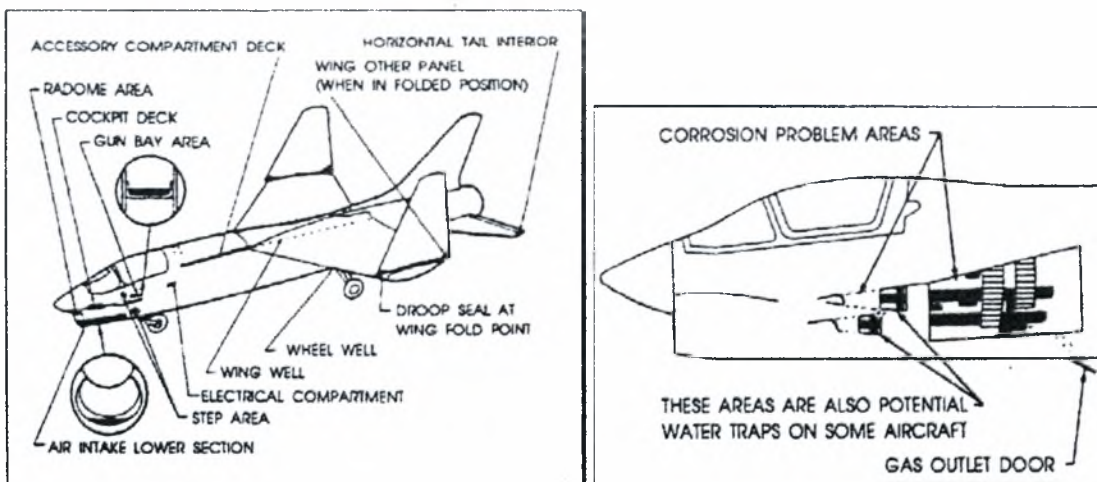
**7. Περιοχές κοινόχρηστων χώρων.**  
Υγρά απολύμανσης-καθαρισμού και ανθρώπινα λύματα στις περιοχές αυτές συντελούν σε ταχεία διάβρωση και καταστροφή της δομής.

**8. Περιοχές μπαταριών.**  
Διαρρέοντα υγρά μπαταριών (ηλεκτρολύτες) είναι εξαιρετικά διαβρωτικά.

**Εικόνα 4-5:** Ευπαθείς σε διάβρωση περιοχές σε μεταφορικό αεροσκάφος ευρείας ατράκτου.

Άλλες ευπαθείς περιοχές που δε περιλαμβάνονται στην εικόνα 4-5 αφορούν:

**Αεριοθούμενα Μαχητικά Αεροσκάφη:**



**Εικόνα 4-6:** Περιοχές αεριοθούμενου μαχητικού αεροσκάφους ευπαθείς σε διάβρωση.[2]

- Περιοχές που γειτονεύουν με φορείς εκτόξευσης πυραύλων και στην περιοχή του πυροβόλου (εικόνα 4-6).
- Περιοχές εισαγωγής σε κινητήρες.
- Πλαίσια πιλοτηρίων.
- Περιοχές αναδίπλωσης ή αλλαγής γεωμετρίας πτερύγων.

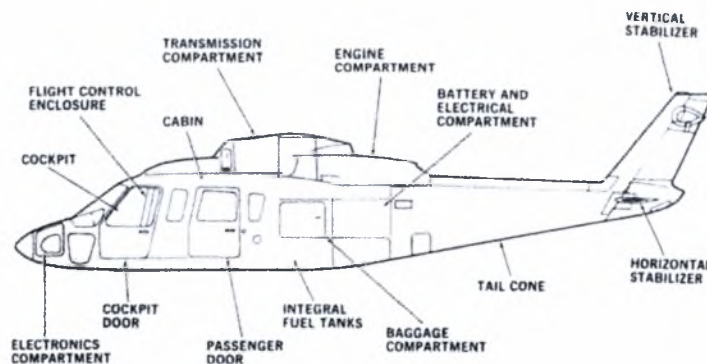


Εικόνα 4-7: Περιοχές αεριωθούμενου μαχητικού αεροσκάφους ευπαθείς σε διάβρωση.[2]

### Μεταφορικά Αεροσκάφη:

- Κύριο και ριναίο σύστημα προσγείωσης.
- Περιοχές επικάλυψης των πηδαλίων διεύθυνσεως και ανόδου-καθόδου.
- Πηδάλια κλίσεως και οι βάσεις των πτερυγίων καμπυλότητας (υπεραντωτών), οι υπεραντωτικές διατάξεις και τα χείλη εκφυγής αυτών.
- Θυρίδες εμπορευμάτων και ράμπες φόρτωσης-εκφόρτωσης.
- Θυρίδες προσιτότητας.
- Συρματόσχοινα πηδαλίων ελέγχου του αφους.
- Χείλη προσβολής επιφανειών και θέσεις γυγγλισμών.
- Διάφορες τυχαίες περιοχές.

### Ελικόπτερα:



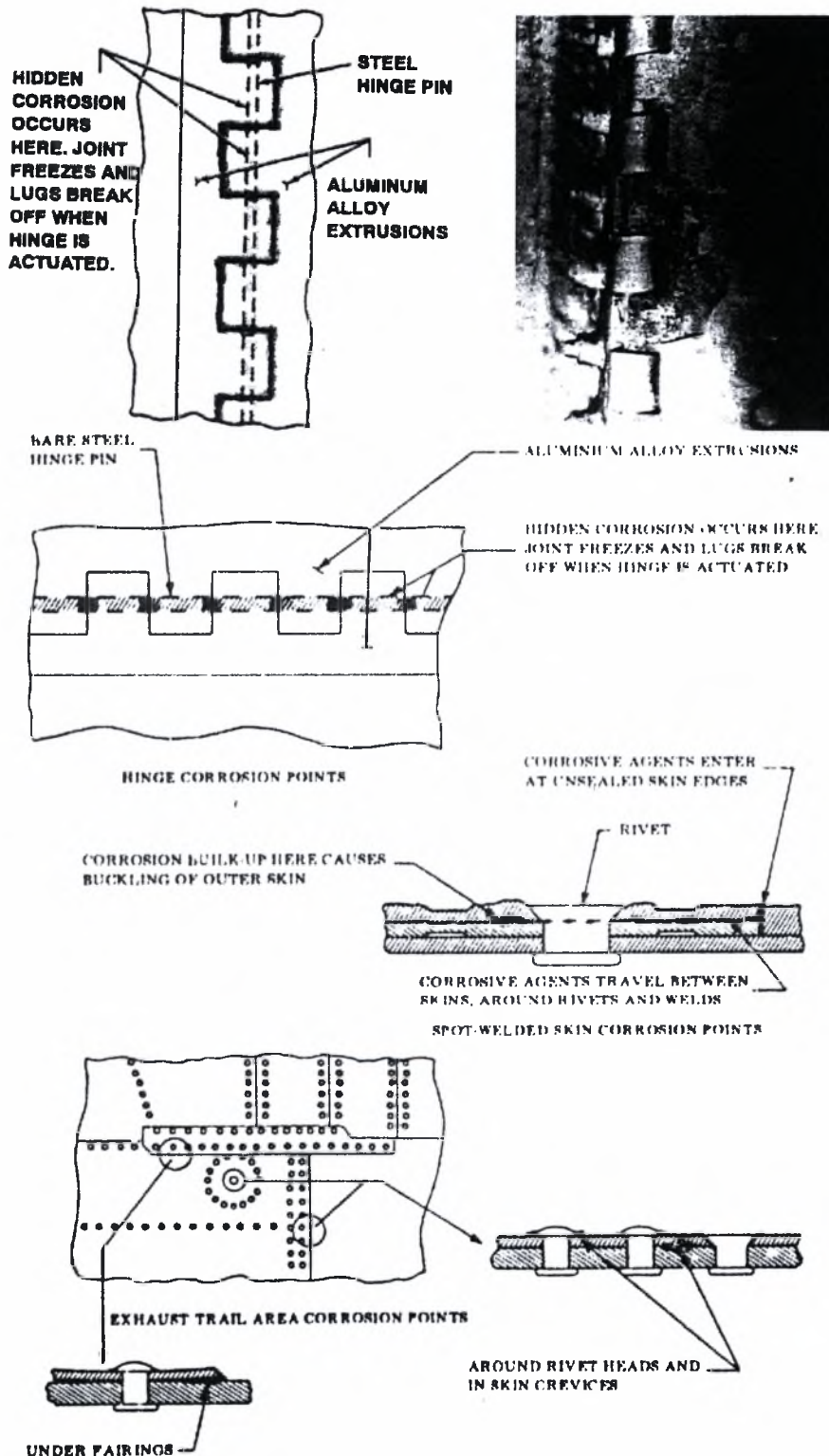
Εικόνα 4-8: Περιοχές ελικοπτέρου ευπαθείς σε διάβρωση [3].

- Σύστημα σύνδεσης της κεφαλής του κύριου στροφείου.
- Μηχανισμός σύνδεσης του ουραίου στροφείου.
- Μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης.
- Πτερύγια κύριου στροφείου και τα χείλη προσβολής τους.



### 4.3.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

Οι εξωτερικές επιφάνειες επικάλυψης από κράματα αλουμινίου είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε διάβρωση κατά μήκος των γραμμών ηλώσεων, συνδέσεων ελασμάτων με επικάλυψη, εξαρτημάτων σύνδεσης, συνδεόμενων επιφανειών ή όπου τα προστατευτικά επιστρώματα έχουν πάθει ζημιά ή έχουν παραμεληθεί. Αυτές οι περιοχές απαιτούν προσεκτική οπτική επιθεώρηση με χρήση βοηθητικών μέσων όπως μεγενθυντικοί φακοί, ειδικοί καθρέπτες, συσκευές μη καταστροφικών ελέγχων.



Εικόνα 4-9: Περιοχές εξωτερικής επικάλυψης αεροσκαφών ευπαθείς σε διάβρωση [4]

Στις επιθεωρήσεις αυτές συστήνεται προσοχή στις ακόλουθες περιοχές:

- Σε ηλεκτροσυγκολλημένες επικαλύψεις, για προϊόντα διάβρωσης που εμφανίζονται σε διάκενα διαμέσου των οποίων εισέρχεται το διαβρωτικό μέσο Η διάβρωση είναι επικρατέστερη στις εξωτερικές περιοχές (εικόνα 4-9).
- Σε άκρες θυρίδων κυψελοειδούς κατασκευής, μεντεσέδες και διανοιγμένες οπές που αποτελούν κύριες περιοχές διάβρωσης (εικόνα 4-9).
- Στις κατώτερες περιοχές της ατράκτου, περιοχές πτέρυγας, πτερυγίων καμπυλότητας και πίσω από τους τροχούς. Οι περιοχές αυτές υποφέρουν από ζημιές στα προστατευτικά επιστρώματα λόγω της πρόσκρουσης σωματιδίων που εκτοξεύονται από το διάδρομο κατά την προσγείωση, απογείωση και τροχοδρόμηση.
- Στη δομή της καλύπτρας, των θυρών επιβίβασης και φορτοεκφορτώσεως καθώς και στους σχετιζόμενους γυγγλισμούς, αρμώσεις και μηχανισμούς που υπόκεινται σε ζημιές λόγω ταυτόχρονης επίδρασης μηχανικής φθοράς και διαβρωτικής δράσης.
- Σε παράθυρα και πλαίσια θυρίδων που μπορούν να επηρεαστούν λόγω ταυτόχρονης επίδρασης μηχανικής φθοράς και διαβρωτικής δράσης.

#### 4.3.2 ΕΚΤΕΘΙΜΕΝΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ - ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ

Εκτεθιμένοι μηχανισμοί όπως συνδετήριοι ράβδοι που ενεργοποιούν επιφάνειες ελέγχου, αρμώσεις, γυγγλισμοί και συνδετήρια μπουλόνια, παξιμάδια, ροδέλες και ασφαλιστικοί πείροι γενικά κατασκευάζονται από διαφορετικά κράματα από εκείνα της κατασκευής στην οποία είναι τοποθετημένα και αρκετά ανόμοια μέταλλα μπορεί να χρησιμοποιούνται στα ίδια τα εξαρτήματα.

Τα παραπάνω εξαρτήματα και οι συνδεόμενες περιοχές της αεροπορικής κατασκευής είναι συνεπώς κύριες περιοχές για γαλβανική διάβρωση. Τα τμήματα αυτά είναι επιρρεπή σε διάβρωση ιδιαίτερα όταν τα οργανικά ή χημικά επιστρώματα τους έχουν υποστεί ζημιά, έχουν καταστραφεί ή όταν τα προστατευτικά επιστρώματα ή λιπαντικά έχουν απομακρυνθεί από διαλυτικά υγρά ή καθαριστικά κατά την πλύση του αεροσκάφους ή από τη χρήση αντιπαγωτικών υγρών.

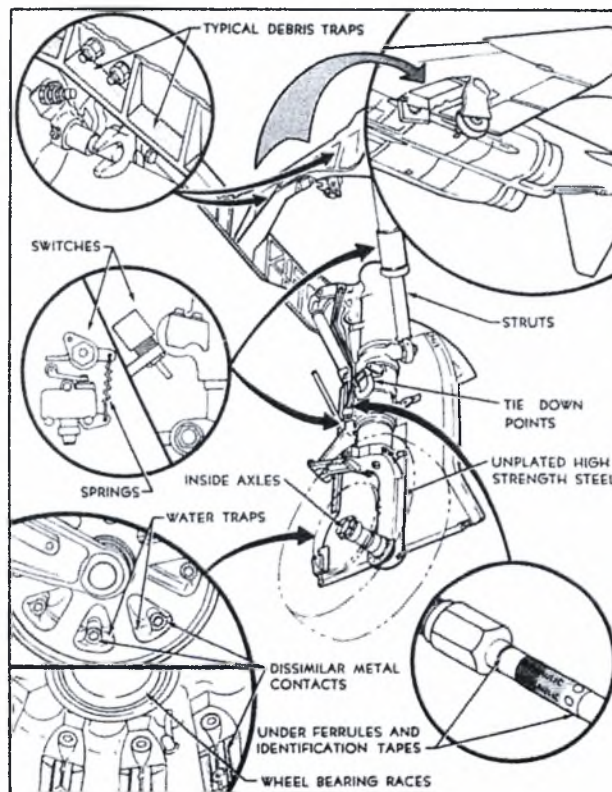
Άλλες περιοχές που χρήζουν προσεκτικής επιθεώρησης περιλαμβάνουν:

- Ηλεκτρολογικό εξοπλισμό όπως καλώδια σύνδεσης, φίσσες, βύσματα γείωσης και υποδοχείς, εξαρτήματα καθώς και περιοχές με τις οποίες ο παραπάνω εξοπλισμός είναι σε επαφή.
- Θυρίδες προσιτότητας, κεραίες, κωνικά ανοίγματα και συναφείς επιφάνειες.
- Φώτα ναυτιλίας, φώτα προσγείωσης και άλλες εξωτερικές εγκαταστάσεις φωτισμού, τα σχετιζόμενα μικροεξαρτήματα και οι παρακείμενες περιοχές.
- Έδρες προσαρμογής μηχανισμών ανύψωσης (γρύλλων), σημεία πρόσδεσης, τα σχετιζόμενα μικροεξαρτήματα και οι παρακείμενες περιοχές.
- Μηχανισμοί προσαρμογής και σημεία έδρασης των κλιμάκων επιβίβασης και πρόσβασης και τα σημεία προσαρμογής της κλίνης για την επιθεώρηση των αεροκινητήρων και των συσκευών αποπλήρωσης (κένωσης).

#### 4.3.3 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗΣ

Οι φωλεές του συστήματος προσγείωσης εκτίθενται σε εκσφενδονιζόμενα σωματίδια από τους πρόχειρους διαδρόμους προσγείωσης που προκαλούν ζημιές (εκδορές) στην προστατευτική χρώση και παραμένουν σε δυσπρόσιτες περιοχές ανάμεσα από τις διαμήκεις ενισχυτικές ράβδους (stiffeners), τις νευρώσεις και τις χαμηλότερες γενικά επιφάνειες της κατασκευής. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε περιόδους ισχυρού ψύχους, με τη χρήση χημικών ουσιών για αντιπαγοποίηση-αποπαγοποίηση των πτητικών μέσων και των χώρων κίνησής των (διάδρομοι-τροχόδρομοι), τα προβλήματα γίνονται πιο έντονα. Αλλά και σε θερμότερες περιόδους, το νερό και η λάσπη που επικάθεται, επίσης είναι δυνατό να παγώσουν (ιδιαίτερα κατά την πτήση σε μεγάλο υψόμετρο) και να προκαλέσουν ζημιά με σχηματισμό πάγου.

Οι μηχανισμοί του συστήματος προσγείωσης συνεπώς χρήζουν εξέτασης με ιδιαίτερη προσοχή στους τροχούς και ιδίως στις κεφαλές των κοχλιών και στα παξιμάδια των τροχών, στο βάνιμο, στους εκτεθειμένους διακόπτες και την ηλεκτρική συνδεσμολογία των υποσυστημάτων του συστήματος προσγείωσης (π.χ. σύστημα αντιολίσθησης τροχών). Απαιτείται συχνός καθαρισμός και πλύση, ακολουθούμενη από υγρά απομάκρυνσης του νερού και επαναλίπανση για τη διασφάλιση συνεχούς και ασφαλούς λειτουργίας.



Εικόνα 4-10: Περιοχές συστήματος προσγείωσης αεροσκαφών ευπαθείς σε διάβρωση [4]

Άλλες περιοχές του συστήματος προσγείωσης που απαιτούν συχνή επιθεώρηση για διάβρωση είναι:

- Οι περιοχές των αξόνων συμπεριλαμβανομένων και των πείρων αξόνων και διχαλωτών συνδέσμων. Επίσης βοηθητικοί άξονες, εξαρτήματα ασφάλισης, σφαιροτριβείς (ρουλεμάν) και έδρανα, δακτυλιοειδείς τριβείς, συνδέσεις αξόνων και θέσεις συναρμολογήσεων.

- Εκτεθειμένες επιφάνειες αποσβεστήρων κραδασμών και έμβολα ενεργοποίησης. Αυτά τα εξαρτήματα πρέπει να εκταθούν ώστε να επιτραπεί η επιθεώρηση των επιφανειών των εμβόλων.
- Άξονες, τροχοί, ρουλεμάν τροχών, φρένα και οι μηχανισμοί ασφάλισής τους.
- Ανοίγματα και εσοχές όπου μπορεί να συσσωρευτούν νερό και ακαθαρσίες.
- Επιφάνειες κυρίων σκελών των συστημάτων προσγείωσης.
- Μηχανισμοί λειτουργίας και ασφάλισης συμπεριλαμβανομένων εδράνων, σφαιροτριβέων (ρουλεμάν), ελατηρίων και συσκευών προσαρμογής.
- Εκτεθειμένες σωληνώσεις, ειδικά σε κοχλιωτά παξιμάδια σύνδεσης (rackot), σε δακτυλίου και κάτω από σφυκτères και ετικέτες αναγνώρισης.
- Βαλβίδες και άλλες συναρμολογήσεις.

#### 4.3.4 ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Η διαρροή ηλεκτρολύτη μπαταρίας, εάν δεν αντιμετωπιστεί αμέσως, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή διάβρωση ιδιαίτερα όταν η προστατευτική βάση έχει υποστεί ζημιά. Επιθεωρήσεις στις περιοχές αυτές διενεργούνται για διαπίστωση των ακολούθων:

- Καθαριότητα και κατάσταση προστατευτικών επιστρώσεων.
- Οι εσωτερικές περιοχές - διαμερίσματα που είναι σε επαφή με τα διαμερίσματα των μπαταριών επιθεωρούνται εφόσον οι αναθυμιάσεις από τους θερμαινόμενους ηλεκτρολύτες (υγρά) των μπαταριών είναι δύσκολα περιορίσιμοι και διασκορπίζονται πέρα από το διαμέρισμα μπαταριών.
- Οι βάσεις έδρασης μπαταριών εξετάζονται για ίχνη διαρροών υγρών μπαταρίας.

#### 4.3.5 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Τα υλικά επιστρώσεων στο εσωτερικό των δεξαμενών καυσίμων είναι αδιαπέραστα από το καύσιμο αλλά όχι εντελώς αδιαπέραστα από το νερό. Εφόσον είναι αδύνατο να διατηρηθεί το καύσιμο εντελώς καθαρό από νερό, υγρασία μπορεί να διεισδύσει διαμέσου του υλικού επίστρωσης και να προκαλέσει erosion corrosion ή περικρυσταλλική διάβρωση σε δομικά τμήματα της κατασκευής. Μικροοργανισμοί που ζούνε στο καύσιμο μπορεί να προσκολληθούν στην επίστρωση και να δράσουν καταστροφικά για τέτοια υλικά. Αυτό είναι πιθανότερο να συμβεί σε θερμά κλίματα καθώς η χρήση ειδικών προσθέτων καυσίμου (αντιπαγωτικό) με αντιμικροβιακές ιδιότητες στα ψυχρά κλίματα, ελαττώνει την πιθανότητα τέτοιας μορφής διάβρωσης. Γι' αυτό οι δεξαμενές καυσίμου πρέπει να επιθεωρούνται για τα ακόλουθα:

- Κατάσταση των υλικών επίστρωσης.
- Για ίχνη διάβρωσης, κυρίως σε περιοχές αποστράγγισης νερού-καυσίμου.
- Για ίχνη διάβρωσης από δράση μικροοργανισμών.

- Για τον προσδιορισμό της κατάστασης του μετάλλου κάτω από απωλεσθέν στεγανωτικό υλικό, υλικό επίστρωσης και συσσωρευμένων υπολλειμάτων.

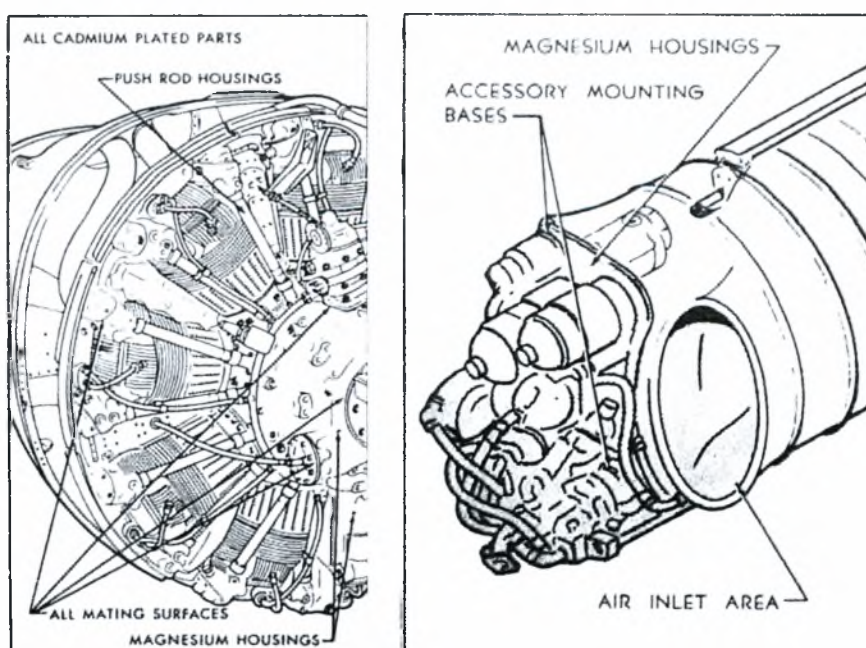
#### 4.3.6 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΚΦΥΓΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Συνδεόμενα εξαρτήματα και επικαλύψεις που βρίσκονται σε περιοχές κοντινές στα ακροφύσια των κινητήρων εκτίθενται στη ροή των καυσαερίων που γενικώς είναι αρκετά διαβρωτικά καθώς είναι πλούσια σε ρυπογόνες ουσίες (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> κλπ). Οι περιοχές αυτές πρέπει επομένως να εξετάζονται και να καθαρίζονται κανονικά για να διασφαλίσουν ότι τα κατάλοιπα των καυσαερίων δεν συσσωρεύονται στις ενώσεις, σχισμές, ραφές ή μεντεσέδες. Συνήθως διενεργούνται οι ακόλουθοι έλεγχοι:

- Τα αεροδυναμικά καλύμματα και οι θυρίδες πρόσβασης που βρίσκονται στο δρόμο των καυσαερίων αφαιρούνται και όλες οι επιφάνειες επιθεωρούνται.
- Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις ενώσεις της επικάλυψης, στους μεντεσέδες, στα εξαρτήματα σύνδεσης και στα αεροδυναμικά καλύμματα εφόσον κατάλοιπα μπορεί να παγιδευτούν και να μην απομακρυνθούν κατά τον περιοδικό καθαρισμό.
- Επιθεωρούνται οι εσωτερικές περιοχές των περύγων, περυγίων καμπυλότητας και καλυμμάτων κινητήρων που είναι στη ροή των καυσαερίων.

#### 4.3.7 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΚΑΛΥΜΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Το προστατευτικό επίστρωμα στα χείλη προσβολής και στους αγωγούς εισόδου των κινητήρων μπορεί να υπόκειται σε μικροζημιές εξαιτίας της μηχανικής δράσης της βροχής (rain erosion) όταν προσπίπτει σ' αυτές τις περιοχές και της απόξεσης από σκόνη. Αυτές οι περιοχές πρέπει να καθαρίζονται, να εξετάζονται και να ξαναπροστατεύονται όσο το δυνατό προγραμματισμένα ιδιαίτερα όταν τα αεροσκάφη επιχειρούν σε θαλάσσιο ή περιβάλλον ερήμου.



Εικόνα 4-11: Περιοχές κινητήρων αεροσκαφών ευπαθείς σε διάβρωση [4]

Προβλήματα εμφανίζονται τόσο σε στροβιλοκινητήρες όσο και σε εμβολοφόρους κινητήρες και συνήθως οι επιθεωρήσεις περιλαμβάνουν τα ακόλουθα ειδικά σημεία:

- Οι εμπρόσθιες περιοχές των κινητήρων και ιδιαίτερα σε εμβολοφόρους κινητήρες, οι κύλινδροι και οι εγκαταστάσεις ωστηρίων ράβδων.
- Βάσεις στήριξης παρελκομένων. Ιδιαίτερα τα επικαδμιωμένα τμήματα επιθεωρούνται για ίχνη διάβρωσης ή φθοράς από μηχανικό αίτιο.
- Οι δίοδοι αέρα ψύξης καθώς και κάθε σχισμή όπου μπορεί να συμβεί εναπόθεση αλάτων.
- Εξαερωτήρες (καρμπυρατέρ) και άλλες διατάξεις εισαγωγής αέρα εξετάζονται ιδιαίτερα στις συνδέσεις επιφανειών και στα εξαρτήματα σύνδεσης.
- Οι επιφάνειες ελίκων και ιδιαίτερα τα χείλη προσβολής εξετάζονται για χαραγές, στίγματα ή άλλες φθορές που μπορεί να οδηγήσουν σε διάβρωση ή κόπωση.
- Οι βάσεις στήριξης του κινητήρα και οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων και ιδιαίτερα κάτω από σφυκτικές ή παράκυκλους ασφαλείας ή συγκολλημένες ενώσεις.

#### 4.3.8 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

Η διαρροή υγρών στις περιοχές κοινόχρηστων χώρων συχνά βρίσκει διέξοδο σε δυσπρόσιτες περιοχές κάτω από τη δομή του πατώματος. Λύματα από αυτές τις περιοχές είναι ισχυρά διαβρωτικά και πρέπει να απομακρύνονται το συντομότερο δυνατό. Η επιθεώρηση στις περιοχές αυτές πρέπει να διασφαλίζει ότι:

- Όλες οι περιοχές ιδιαίτερα της ατράκτου πίσω από κοινόχρηστους χώρους όπου συλλέγονται υπολείματα φαγητών και λύματα είναι καθαρές, στεγνές και χωρίς διάβρωση.
- Οι περιοχές δομικών στοιχείων κάτω από κοινόχρηστους χώρους είναι σκόπιμο να επιθεωρούνται για καθαριότητα και για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα της προστατευτικής κατεργασίας και του επιστρώματος.

#### 4.3.9 ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΩΝ

Οι κεφαλές στροφείων ελικοπτέρων, τα πτερύγια του κυρίως στροφείου, τα πτερύγια του ουραίου στροφείου, τα κιβώτια ταχυτήτων, οι άξονες μετάδοσης κίνησης και τα ρουλεμάν είναι ευπαθή σε διάβρωση ως αποτέλεσμα έκθεσής τους στα στοιχεία της φύσης.

Τα κράματα Al, Ti και σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κύρια στις κεφαλές και στα πτερύγια στροφείων και απαιτούν συχνές επιθεωρήσεις, ιδιαίτερα σε ενώσεις και σε στεγανοποιήσεις, για διασφάλιση της καλής κατάστασης αυτών των υλικών.

Τα πτερύγια των στροφείων μπορεί να περιέχουν αφρώδες υλικό και πρέπει να κρατούνται σε καλή κατάσταση για να αποφευχθεί η απορρόφηση υγρασίας.

Προσεκτική επιθεώρηση απαιτείται επίσης όπου χρησιμοποιούνται υλικά όπως δέρμα, χαρτί, ηχομονωτικό και υλικά απομόνωσης της υγρασίας στα πτητικά μέσα.

#### 4.3.10 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Οποιαδήποτε περιοχή όπου μπορεί να συσσωρευτούν ξένα σώματα και υγρασία είναι ύποπτη για διάβρωση. Κιβώτια ή περικλειστές περιοχές κάθε μορφής συμπεριλαμβανομένου υποδοχών για ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό είναι περιοχές κύριου ενδιαφέροντος. Τα στεγανωτικά των θυρίδων προσιτότητας μπορεί να καταστραφούν επιτρέποντας την είσοδο νερού και οι υποδοχές μπορεί να αερίζονται ώστε να επιτρέψουν αέρα με υγρασία ή ψεκασμό άλατος να εισέλθει και να συμβεί διάβρωση. Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός μπορεί να μην είναι ικανοποιητικά σχεδιασμένος για να αντισταθεί στη διάβρωση και γι' αυτό πρέπει να επιθεωρείται τακτικά με υψηλή συχνότητα για ίχνη διάβρωσης και για την απόδοση του.

Ύποπτες περιοχές για διάβρωση υπάρχουν στις συνδέσεις δίπλωσης των πτερύγων, στις εσοχές των πτερυγίων κλίσεως, ανόδου - καθόδου, καμπυλότητας, των καταστροφέων άντωσης και των αερόφρενων όπου συσσωρεύονται ρύποι και υγρασία όταν αυτές οι επιφάνειες ελέγχου είναι σε κλειστή θέση. Τα συρματοσχοίνα - καλώδια ελέγχου είναι επίσης επιρρεπή σε διάβρωση ιδιαίτερα όπου εκτίθενται ή όπου περνούν διαμέσου στεγανωτικού. Τα πτητικά μέσα που εκτίθενται απ' ευθείας σε ψεκασμό άλατος, όπως αεράκατοι ή μέσα που επιχειρούν από αεροπλανοφόρα ή άλλα σκάφη, πρέπει να επιθεωρούνται συχνότερα από ότι τα μέσα που εδρεύουν σε ξηρά.

#### **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ - REFERENCES**

1. LaCivita K.J., "Corrosion Prevention System for the F-16 Fighter Aircraft", in *AGARD LS-206 "Aging Combat Aircraft Fleets – Long Term Applications"*, October 1996, pp.8-17.
2. "Aircraft Weapons Systems Cleaning and Corrosion Control", NAVAIR 01-1A-509, T.O. 1-1-691, TM 1-1500-344-23, Naval Air Systems Command, US Dept of Defense, 1 May 2001.
3. Kroes M.J., Watkins W.A., Delp F., "Aircraft Maintenance & Repair", 6th Edition, Macmillan/McGraw Hill, 1993, pp.63.
4. Corrosion Advisory, FAA, AC43-4A, page 54, 25 Jul 1991.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

#### 5.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Σκοπός του πειραματικού τμήματος της εργασίας είναι η διερεύνηση και μελέτη της διαβρωτικής συμπεριφοράς ενός εκτενώς διαδεδομένου στις αεροπορικές κατασκευές κράματος Al της σειράς 2XXX, του Al2024, κατά την έκθεσή του σε ένα αντιπροσωπευτικό περιβάλλον αεροπορικής βάσης. Το υπόψη κράμα χρησιμοποιείται εκτεταμένα υπό μορφή φύλλου μετάλλου στην επικάλυψη (skin) των πτητικών μέσων (εικόνες 2-1α, 2-1β). Συνεπώς δεν νοείται καταλληλότερο περιβάλλον διεξαγωγής πειραμάτων φυσικής έκθεσης δοκιμίων κράματος Al2024, από εκείνο που καλείται να επιχειρήσει, να σταθμεύσει και να λειτουργήσει ένα πτητικό μέσο.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η συμπεριφορά του κράματος σε διαβρωτική προσβολή απουσία φορτίσεων καθώς χρονικοί περιορισμοί δεν κατέστησαν δυνατή την επέκταση της μελέτης ώστε να συμπεριληφθούν καταστάσεις φορτίσεων, ήτοι περίπτωση διαβρώσεων υπό μηχανική καταπόνηση (SCC) ή κόπωση. Τούτο θα μπορούσε κάλλιστα να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

Παράλληλα, μέσω διεξαγωγής εργαστηριακών πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης, επιχειρείται η σύγκριση των εργαστηριακών μεθόδων με τα πειράματα φυσικής διάβρωσης, σε μια προσπάθεια προσδιορισμού της εργαστηριακής μεθόδου επιταχυνόμενης διάβρωσης που προσομοιάζει καλύτερα την φυσική διάβρωση που υπόκειται το Al2024 στο περιβάλλον της αεροπορικής βάσης. Στα πλαίσια αυτά, επιχειρείται η ανάπτυξη μοντέλων που εκφράζουν το φαινόμενο.

Ταυτόχρονα επιχειρείται ο χαρακτηρισμός του περιβάλλοντος της αεροπορικής βάσης ως προς την διαβρωτικότητά του. Σημειώνεται ότι παγκοσμίως αφιερώνονται σημαντικοί πόροι για την ανάπτυξη και λειτουργία συστημάτων συνεχούς παρατήρησης και καταγραφής των παραμέτρων που συμβάλλουν στην διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος [1,2,3]. Τα οφέλη είναι προφανή καθώς:

α. Επιτυγχάνεται εκτίμηση της αναμενόμενης φυσικής διάβρωσης μιας κατασκευής σε βάθος χρόνου με εφαρμογή συγκεκριμένης εργαστηριακής μεθόδου επιταχυνόμενης διάβρωσης. Οι οικονομικές προεκτάσεις καθίστανται εύλογες.

β. Ο χαρακτηρισμός της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος συμβάλλει στην εφαρμογή ενός οικονομοτεχνικά συμφέροντος προγράμματος αντιδιαβρωτικής προστασίας. Συγκεκριμένα είναι δυνατό να καθοριστεί η βέλτιστη συχνότητα εφαρμογής ενεργειών αντιδιαβρωτικής προστασίας των πτητικών μέσων και ο απαιτούμενος εξοπλισμός ώστε να μεγιστοποιηθεί η εκμετάλλευση του διατιθέμενου στόλου και να ελαχιστοποιηθεί το σχετιζόμενο κόστος. Τα αποτελέσματα ενσωματώνονται στα τεχνικά εγχειρίδια των πτητικών μέσων και βοηθούν στον καθορισμό της πολιτικής συντήρησης [4].

#### 5.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΕΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΕΣ

##### 5.2.1 Σύνθεση – Σύσταση & ιδιότητες υλικού

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε κράμα Al2024-T3 προδιαγραφής QQ-A-250/4 [5]. Η χημική σύσταση του κράματος φαίνεται στον πίνακα 5-1.

**Πίνακας 5-1:** Χημική σύσταση κράματος Al2024-T3

Στοιχεία	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Άλλα συνολικά	Al
Προδιαγραφή wt%	0.50 max	0.50 max	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.10 max	0.25 max	0.05 max	0.05 max	0.15 max	Υπόλοιπο
Χρησιμοποιηθέν wt%	0.10	0.18	4.35	0.67	1.36	0.02	0.07	0.03	0.01	0.15 max	Υπόλοιπο

Η θερμική κατεργασία T3 του κράματος συνίσταται σε αργή θέρμανση (ομογενοποίηση) στους 413°C, διαλυτοποίηση (solutionizing) στους 493°C, ψυχρή κατεργασία εξέλασης και φυσική γήρανση.

Οι φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες φαίνονται στον πίνακα 5-2

**Πίνακας 5-2:** Φυσικές και Μηχανικές Ιδιότητες Κράματος Al2024-T3 [6]

Φυσικές Ιδιότητες		Μηχανικές Ιδιότητες (σε θερμοκρασία δωματίου)	
Πυκνότητα ( $kg/m^3$ )	2768	Tensile strength (psi)	70000
Ειδική Βαρύτητα	2.77	Yield strength (0.2% offset) (psi)	50000
Σημείο Τήξεως (K)	775 – 911	Brinell hardness (500kg, 100 mm ball)	120
Modulus of elasticity, psi (Tension)	$10.6 \times 10^6$	Shear strength (psi)	41000
Modulus of rigidity, psi (Torsion)	$4 \times 10^6$	Fatigue strength ( $5 \times 10^8$ cycles) (psi)	20000

### 5.3 NATURAL CORROSION TEST

#### Μεθοδολογία

Ο πλέον κοινός τύπος πειραμάτων ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι η έκθεση δοκιμίων στατικά σε συγκεκριμένη τοποθεσία, δηλαδή δοκίμια εκτίθενται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε ειδικές εξέδρες ή μηχανισμούς ανάρτησης που είναι σταθερά τοποθετημένοι σε μια τοποθεσία. Η μορφή αυτή των πειραμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε προστατευμένους-στεγασμένους χώρους ή σε χώρους χωρίς καμία απολύτως προστασία [7].

Μια άλλη μορφή πειραμάτων συνίσταται στην ανάρτηση των δοκιμίων επί οχημάτων/μέσων ώστε να προσομοιωθεί κατά το δυνατόν ακριβέστερα το περιβάλλον λειτουργίας του υλικού. Η κατάσταση αυτή διαφέρει αισθητά από την στατική έκθεση, αλλά θεωρείται πιο αξιόπιστη διαδικασία πειραματικής μελέτης του υλικού στο περιβάλλον λειτουργίας του. Το μειονέκτημα είναι ότι καθίσταται δυσχερής η παρακολούθηση και καταγραφή των εξωτερικών παραγόντων που επιδρούν στην διάβρωση του υλικού, με συνέπεια ευρύτητα και διασπορά αποτελεσμάτων [7].

Προκειμένου να ξεπεραστεί η εν λόγω δυσχέρεια, έχει επινοηθεί ένας συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων κατά τον οποίο σε στατικά εκτεθειμένα δοκίμια του υλικού γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης του φυσικού περιβάλλοντος λειτουργίας του υλικού (π.χ. σύστημα αλατονέφωσης, μηχανική καταπόνηση κλπ). Επισημαίνεται ότι η έκθεση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί φυσική διάβρωση, εφόσον οι παράμετροι είναι ελεγχόμενα μεταβαλλόμενες. Η ένταση και συχνότητα εναλλαγών των παραμέτρων οδηγούν στο χαρακτηρισμό του πειράματος ως επιταχυνόμενου. Συνήθως το περιβάλλον είναι περισσότερο έντονο-δραστικό από το φυσικό, ωστόσο τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι τα αποτελέσματα είναι πιο εύκολο να αναπαραχθούν, οι συνθήκες σε μεγάλο βαθμό μπορούν να ελεγχθούν και να καταγραφούν και το πλήθος των δοκιμίων που μπορούν να εκτεθούν (στατιστικό δείγμα), είναι μεγαλύτερο σε σχέση με την περίπτωση ανάρτησης επί οχημάτων.

### Καταγραφή των Ατμοσφαιρικών Μεταβλητών

Η καταγραφή των ατμοσφαιρικών μεταβλητών που επηρεάζουν την ατμοσφαιρική διάβρωση γίνεται μέσω ενός συμβατικού μετεωρολογικού σταθμού.

Έτσι, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και άλλες μετεωρολογικές παράμετροι καταγράφονται συνεχώς και τα δεδομένα αξιοποιούνται στην πραγματοποίηση στατιστικών αναλύσεων για τις χρονικές περιόδους που εξετάζονται.

Για την μέτρηση της ύγρανσης (wetness) έχουν αναπτυχθεί ειδικές ηλεκτρικές διατάξεις που μετράνε την ύγρανση μιας επιφάνειας (βλέπε ASTM G84). Ο χρόνος ύγρανσης (Time Of Wetness – TOW) μιας επιφάνειας συνήθως ανάγεται σε ποσοστό ή κλάσμα του χρόνου για το οποίο μια επιφάνεια είναι υγρή στο μήνα ή στο έτος.

Η περιεκτικότητα σε SO<sub>2</sub> δύναται να εκτιμηθεί, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, με απευθείας μέτρηση ή με τη μέθοδο του sulfation plate.

Παρόμοια προσδιορίζεται η τάξη του Cl<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα μέσω του προσδιορισμού της απόθεσης Cl<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα με τη μέθοδο wet candle.

#### 5.3.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Ο σχεδιασμός πειραμάτων ατμοσφαιρικής διάβρωσης γίνεται με γνώμονα τον επιδιωκόμενο σκοπό των πειραμάτων. Στην περίπτωση που τα πειράματα αποσκοπούν στον χαρακτηρισμό ενός υλικού όσον αφορά τη διαβρωτική συμπεριφορά του στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, είναι σημαντικός ο καθορισμός των χρονικών διαστημάτων ελέγχου και συλλογής δοκιμίων και των υλικών αναφοράς ώστε να είναι εφικτή η εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων. Εξίσου σημαντικός είναι ο καθορισμός της μορφής των δοκιμίων, του τρόπου έκθεσής τους και αξιολόγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Η διευκρίνιση και κατανόηση των παραπάνω θεμάτων στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού των πειραμάτων, συμβάλλει στον προσδιορισμό του αριθμού των δοκιμίων, των διαφόρων επιπλέον υλικών που αναγκαιούν και τελικά του κόστους του προγράμματος των πειραμάτων.

Τα κύρια σημεία που χρήζουν προσεκτικής εξέτασης κατά το σχεδιασμό ενός προγράμματος έκθεσης δοκιμίων σε ατμοσφαιρικές συνθήκες για εκτέλεση πειραμάτων διάβρωσης μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα [8]:

- α. Σκοπός των πειραμάτων.
- β. Χρόνος έκθεσης για την επίτευξη του σκοπού των πειραμάτων.
- γ. Υλικά αναφοράς-σύγκρισης.
- δ. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- ε. Απαιτήση για αναπαραγωγή-επανάληψη των πειραμάτων.
- στ. Επικαλυπτικό προστατευτικό στρώμα (επίχρισμα) για την επιφάνεια των δοκιμίων που είναι με κατεύθυνση προς το έδαφος.
- ζ. Κατάλληλη προετοιμασία των ακμών των δοκιμίων ή κάλυψη αυτών.

#### Πρόγραμμα Έκθεσης

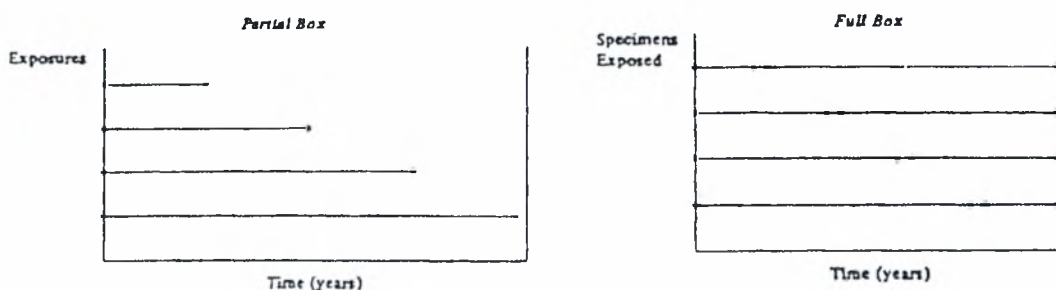
Η απλούστερη μορφή ενός προγράμματος έκθεσης δοκιμίων σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, συνίσταται στην έκθεση ομάδας δοκιμίων για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Στο τέλος της περιόδου, τα δοκίμια συλλέγονται και αξιολογούνται.

Παραλλαγή αυτής της μεθόδου αποτελεί η επιθεώρηση των δοκιμίων στο χώρο έκθεσής τους σε τακτά χρονικά διαστήματα και η καταγραφή των αποτελεσμάτων.

Μια διαφορετική προσέγγιση αποτελεί η έκθεση αρχικά μιας ομάδας δοκιμίων και κατόπιν η συλλογή τμημάτων της ομάδας δοκιμίων σε καθορισμένα χρονικά

διαστήματα. Η προσέγγιση αυτή βοηθά στην εκτίμηση της εξέλιξης της διαδικασίας αν υποτεθεί μια σχετική σταθερότητα του περιβάλλοντος έκθεσης.

Παραλλαγή αυτής της μεθόδου αποτελεί η αντικατάσταση των δοκιμίων που συλλέγονται με καινούργια τα οποία θα συλλεχθούν με την ολοκλήρωση των πειραμάτων. Με τη μέθοδο αυτή καθίσταται δυνατή η εξομάλυνση τυχόν μεταβολών στο περιβάλλον έκθεσης. Οι παραπάνω μέθοδοι αποδίδονται γραφικά στην εικόνα 5-1.



**Εικόνα 5-1:** Χρονοδιάγραμμα έκθεσης δοκιμίων σε πείραμα ατμοσφαιρικής διάβρωσης [8]

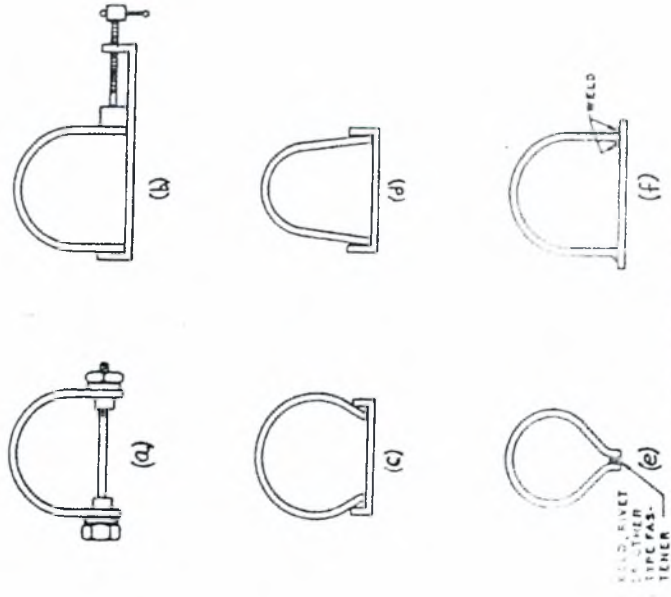
### Τύποι Δοκιμίων

Ο πλέον διαδεδομένος τύπος δοκιμίων για πειράματα ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι παραλληλόγραμμα φύλλα υλικού διαστάσεων  $100\text{mm} \times 150\text{mm}$  καταλλήλου πάχους [8]. Αυτός ο τύπος θεωρείται ο πλέον κατάλληλος για τον προσδιορισμό της απώλειας μάζας. Ωστόσο συχνά προκειμένου για μη σιδηρούχα κράματα προτιμώνται ακόμη μεγαλύτερα φύλλα υλικού διαστάσεων  $100\text{mm} \times 200\text{mm}$  [9] λόγω των περισσότερο αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων που δίνουν.

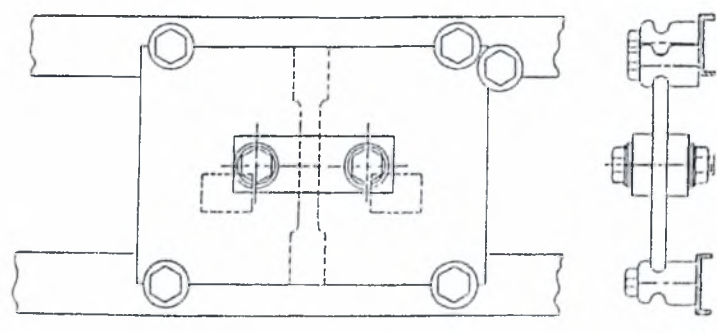
Η παραπάνω μορφή δοκιμίων δεν αποτελεί τον μοναδικό χρησιμοποιούμενο τύπο. Συνήθη παραδείγματα δοκιμίων που χρησιμοποιούνται στα πειράματα ατμοσφαιρικής έκθεσης φαίνονται στον Πίνακα 5-3 και στην εικόνα 5-2, ανάλογα με τους σκοπούς του πειράματος και τη μορφή της διάβρωσης η οποία διερευνάται.

**Πίνακας 5-3:** Τύποι δοκιμίων [8]

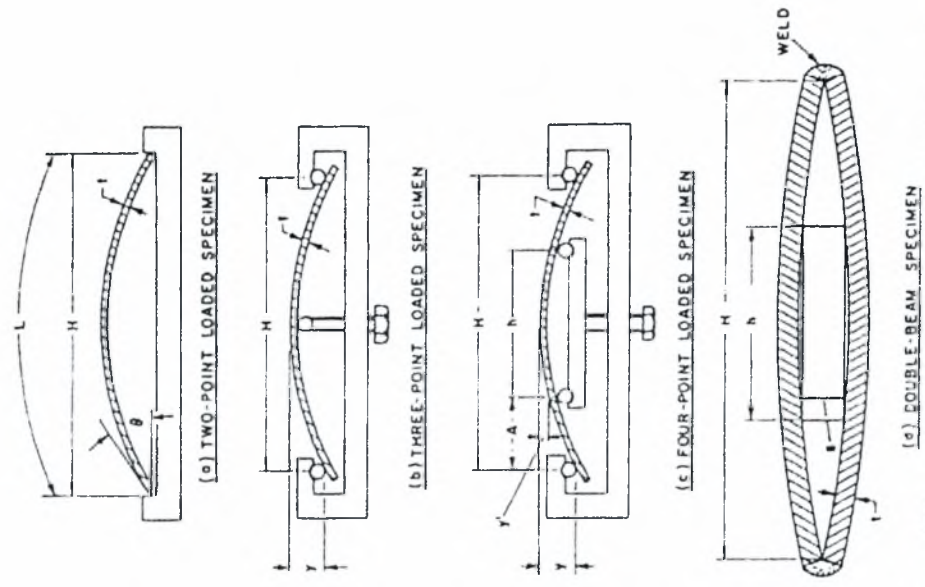
Type	Standards
Flat panel 100 by 150 mm 100 by 200 mm 100 by 300 mm	ASTM G 50
Helix wire	...
Stress Corrosion Cracking Bent Beam C Ring U Bend Direct Tension Welded	ASTM G 39 ASTM G 38 ASTM G 30 ASTM G 49 ASTM G 58
Galvanic Plate on Plate Disk on Disk Wire on Bolt	ASTM G 104 ... ...
Coated Specimen	ASTM D 1654
Fabricated Items	...



U-bend δοκίμια



Bent Beam δοκίμια



Panel Type δοκίμια (γαλβανικής διάβρωσης)

Εικόνα 5-2: Τύποι δοκιμών περιμετρώσεων διάβρωσης [8]

### Προετοιμασία δοκιμίων

Η προετοιμασία των δοκιμίων εξαρτάται από τον σκοπό του πειράματος έκθεσης [10]. Έτσι, στην περίπτωση έκθεσης στην ατμόσφαιρα δοκιμίων γυμνού μετάλλου, θα πρέπει να ληφθεί «αυθαίρετη» απόφαση σχετικά με την ποιότητα φινιρίσματος της επιφάνειας των δοκιμίων [8]. Τυπικά στάδια προετοιμασίας δοκιμίων για πειράματα ατμοσφαιρικής έκθεσης φαίνονται στον πίνακα 5-4.

**Πίνακας 5-4: Στάδια προετοιμασίας δοκιμίων [8]**

Μηχανική Προετοιμασία Κοπή σε κατάλληλο μέγεθος Φινίρισμα Ακμών Φινίρισμα Επιφανειών
Ταυτοποίηση και Καθαρισμός
Αρχική Μέτρηση Μάζας Μεγέθους Οπτική εμφάνιση Φωτογράφιση
Αποστολή σε περιοχή έκθεσης
Τελικός Καθαρισμός και Προστασία ακμών (εφόσον απαιτείται)
Έκθεση

Συχνά κατά την προετοιμασία, εφαρμόζεται ειδική λείανση της επιφάνειας των δοκιμίων και καθαρισμός με χρήση ειδικών καθαριστικών υγρών (solvents).

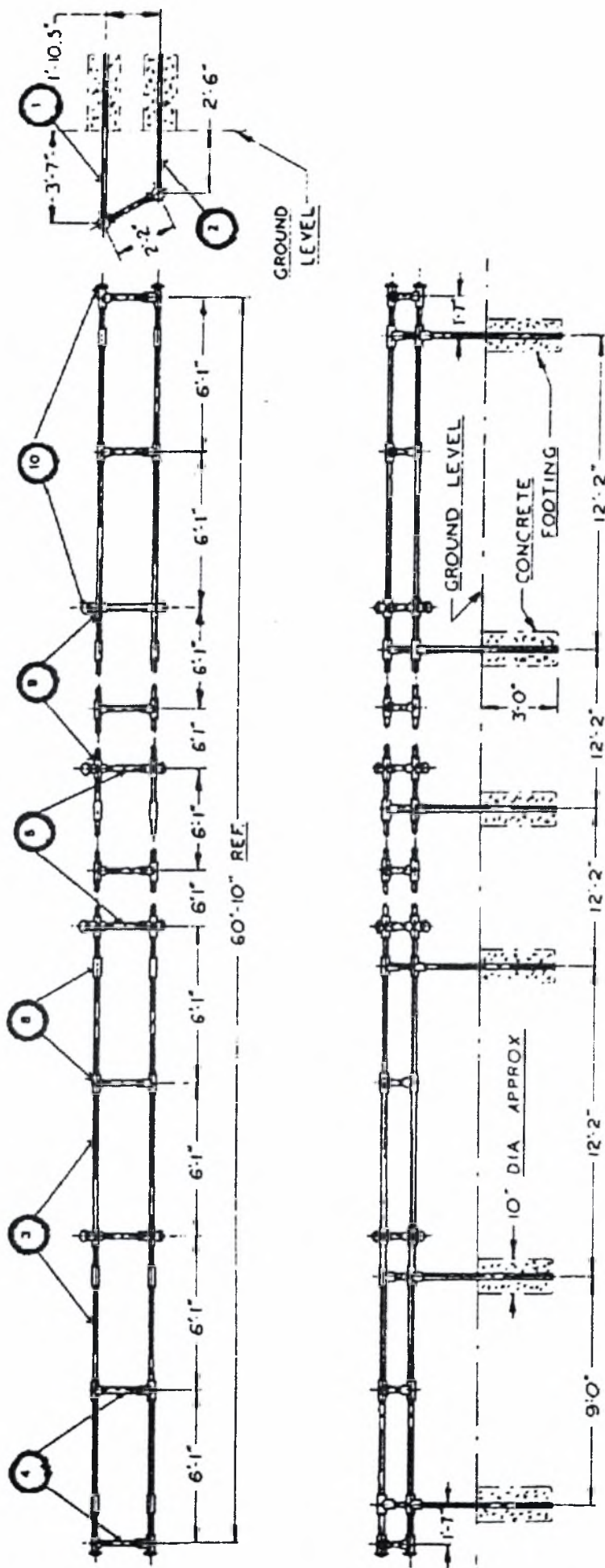
Σκόπιμη επίσης είναι η εφαρμογή ενός διακριτικού σημείου (γνωρίσματος) επί του δοκιμίου, για σκοπούς αναγνώρισης. Χρησιμοποιούμενες πρακτικές είναι η διάνοιξη οπών σε συγκεκριμένα σημεία, η χάραξη εγχοπών σε ακμές και γωνίες ή ακόμη η χρήση πλαστικών ταμπελών αναγνώρισης. Στην περίπτωση του αλουμινίου, το οποίο γενικώς δεν υπόκειται σε εκτεταμένη διάβρωση, η μέθοδος που προτιμάται είναι της εντύπωσης ενός κωδικού σημείου αναγνώρισης [8]. Το εργαλείο εντύπωσης θα πρέπει να είναι καθαρό και να προκαλεί οξείες και ευδιάκριτες εντυπώσεις ώστε να αποφεύγεται η μεταφορά ακαθαρσιών στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Ως τελευταίο στάδιο πριν την έκθεσή τους, τα δοκίμια υπόκεινται σε προσεκτική ζύγιση και μέτρηση. Επιπρόσθετα μπορούν να εφαρμοστούν και άλλες διαδικασίες, όπως αρχική εκτίμηση της επιφάνειάς τους, μέτρηση της φωτεινότητας και της ανακλαστικότητας της επιφάνειάς ή άλλες οπτικές μετρήσεις.

### Φυσική Έκθεση Δοκιμίων στην Ατμόσφαιρα – Τρόποι Αξιολόγησης της Διαβρωτικότητας του Περιβάλλοντος

Τα περισσότερα πειράματα φυσικής έκθεσης δοκιμίων στην ατμόσφαιρα διενεργούνται στατικά, όπου τα δοκίμια είναι τοποθετημένα σε ειδικές εσχάρες έκθεσης και αναρτημένα σε εξέδρες. Η θέση και κλίση των εσχάρων καθορίζεται από την περιοχή διεξαγωγής του πειράματος. Έτσι, στις ΗΠΑ, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G50, οι εσχάρες αναρτώνται με κλίση 30° ως προς την οριζόντιο [9]. Αντίστοιχα στην Ευρώπη αναρτώνται με κλίση 45° ως προς την οριζόντιο [11]

Οι εσχάρες έκθεσης σχεδιάζονται με τρόπο ώστε η αφαιροτοποθέτηση των δοκιμίων να γίνεται χωρίς να ενοχλούνται τα παρακείμενα δοκίμια. Υπόδειγμα τυπικής εξέδρας και εσχάρας έκθεσης βρίσκεται στην προδιαγραφή ASTM G50 και φαίνεται στην εικόνα 5-3.



NOTE 1—Items 1, 2, 3, 4, 5, and 8 are 1½-in. (31.8-mm) hot-dip galvanized pipe.  
 NOTE 2—Fill all legs with concrete to about 6 in. (152 mm) above ground line.

Εικόνα 5-3: Πρότυπο σχέδιο εξέδρας έκθεσης δοκιμών φυσικής διάβρωσης [8,12]

Ως γενική πρακτική στο βόρειο ημισφαίριο, χρησιμοποιείται ο προσανατολισμός των εσχάρων ώστε τα δοκίμια να κείνται προς νότο. Σε περίπτωση που επιζητείται η μέγιστη έκθεση στο ηλιακό φως, τότε τα δοκίμια τοποθετούνται με κλίση ως προς την οριζόντιο, ίση προς το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

Όταν τα δοκίμια εκτίθενται σε τοποθεσίες όπου υπάρχουν πηγές διαβρωτικών ουσιών που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, γενικώς προτιμάται η εσχάρα έκθεσης να είναι προσανατολισμένη προς την πηγή των διαβρωτικών ουσιών. Επί παραδείγματι, σε παραθαλάσσιες τοποθεσίες έκθεσης, η εσχάρα των δοκιμίων τοποθετείται στραμμένη προς την ακτογραμμή. Ομοίως σε περίπτωση παρουσίας παρακείμενων βιομηχανικών εγκαταστάσεων συστήνεται ο προσανατολισμός της εσχάρας των δοκιμίων προς την πηγή των βιομηχανικών ρύπων [10].

Με την έναρξη έκθεσης των δοκιμίων, επιβάλλεται η παρακολούθηση και καταγραφή των μετεωρολογικών παραμέτρων. Εξίσου σημαντική είναι η καταγραφή της ακριβούς θέσης του κάθε δοκιμίου επί της εσχάρας, της γεωγραφικής θέσης της ίδιας της εσχάρας έκθεσης καθώς και του κωδικού αναγνώρισης της εσχάρας (σε περίπτωση χρήσης περισσοτέρων της μίας). Ο προγραμματισμός της περισυλλογής των δοκιμίων κρίνεται απαραίτητος, ιδιαίτερα στην περίπτωση μακροχρόνιας – πολυετούς έκθεσης.

Σε πολλές περιπτώσεις κρίνεται σκόπιμη η οπτική εξέταση των δοκιμίων σε τακτά χρονικά διαστήματα και η καταγραφή των παρατηρήσεων. Στην περίπτωση αυτή, είναι απαραίτητη η υιοθέτηση ενός αντικειμενικού συστήματος αξιολόγησης ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία της καταγραφόμενης πληροφορίας. Αναλυτικές οδηγίες προς αυτή την κατεύθυνση περιέχονται στην προδιαγραφή ASTM G33 [13].

Μια ιδιαιτερότητα των πειραμάτων φυσικής έκθεσης δοκιμίων είναι ότι το περιβάλλον δεν είναι υπό τον έλεγχο του διενεργούντος τα πειράματα. Βέβαια οι τοποθεσίες επιλέγονται με κριτήριο κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, ωστόσο απρόβλεπτες μεταβλητές μπορούν να επιδράσουν κατά την βραχυπρόθεσμη ή μακροχρόνια έκθεση. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι καιρικές συνθήκες ή η παρουσία διαβρωτικών σωματιδίων ως αποτέλεσμα διεργασιών-ενεργειών που λαμβάνουν χώρα μακριά από την περιοχή έκθεσης και είναι ολοκληρωτικά εκτός ελέγχου του διενεργούντος τα πειράματα.

Συνεπώς, συντρέχει λόγος υιοθέτησης τεχνικών αξιολόγησης της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων.

Μια ευρύτατα διαδεδομένη μέθοδος αξιολόγησης της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος αποτελεί η έκθεση τυποποιημένων προτύπων δοκιμίων από υλικό γνωστής διαβρωτικής συμπεριφοράς ως μέτρο σύγκρισης και ελέγχου. Τυπικά πρότυπα δοκίμια για το σκοπό αυτό είναι κατασκευασμένα από χάλυβα (σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G92 (*“Practice for Characterization of Atmospheric Test Sites”*)). Ωστόσο, δοκίμια από ψευδάργυρο, χαλκό και αλουμίνιο μπορούν και έχουν χρησιμοποιηθεί εξίσου αποτελεσματικά [14]. Η μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση υλικού γνωστής διαβρωτικής συμπεριφοράς με τα υπό εξέταση δοκίμια και η εξαγωγή αναλόγων συμπερασμάτων. Η σημασία της μεθόδου καθίσταται προφανής αν ληφθεί υπόψη ότι δεν είναι πρακτικώς εφικτή η μέτρηση όλων των ατμοσφαιρικών μεταβλητών που επιδρούν στην ατμοσφαιρική διάβρωση.

Το μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να παρέξει πληροφορίες σχετικά με τα αίτια της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος. Προκειμένου επομένως να κατανοηθούν οι παράγοντες που συμβάλλουν στη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος, κρίνεται σκόπιμη η συλλογή δεδομένων



θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, χρόνου ύγρανσης, διάρκειας βροχοπτώσεων και ταχύτητας ανέμων [9].

Έχει παρατηρηθεί ότι διάβρωση λαμβάνει χώρα κυρίως κατά την διάρκεια που τα δοκίμια είναι υγρά. Συνεπώς η γνώση της θερμοκρασίας των δοκιμίων ενώ αυτά είναι υγρά, είναι σημαντική καθώς επηρεάζει την κινητικότητα της διάβρωσης. Δυστυχώς η παράμετρος αυτή, για πρακτικούς λόγους, σπανίως μετράται.

Η δυνατότητα συλλογής δειγμάτων βροχής κατά την διάρκεια έκθεσης και ανάλυσης αυτών ως προς την οξύτητα και την παρουσία ιόντων, αποτελεί σημαντικό ενισχυτικό στοιχείο. Ομοίως σημαντικός παράγοντας διαβρωτικότητας θεωρείται η παρουσία στοιχείων  $S_2$  και κυρίως  $SO_2$ . Συνεπώς, η δυνατότητα δειγματοληψίας και μέτρησης της συγκέντρωσης των ανωτέρω ενώσεων συμβάλλει στην διαμόρφωση σαφούς εικόνας για την διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος.

Σε παραθαλάσσιες περιοχές, θεωρείται αναγκαία η μέτρηση της περιεκτικότητας των ιόντων  $Cl_2$  (χλωριδίων) στην ατμόσφαιρα. Μέθοδοι εκτίμησης της περιεκτικότητας του  $Cl_2$  αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο πίνακας 5-5 παρουσιάζει συνοπτικά τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους των οποίων συστήνεται η καταγραφή και παρακολούθηση κατά τη διάρκεια πειραμάτων φυσικής έκθεσης δοκιμίων στις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

**Πίνακας 5-5:** Ατμοσφαιρικές παράμετροι σε πρόγραμμα έκθεσης δοκιμίων [8]

Variable	Measurement Frequency	Report	Typical Units
Temperature	Hourly	30 day A&R	°C
Temperature when Wet	Hourly	30 day A	°C
Relative Humidity	Hourly	30 day A	%
Time of Wetness	Hourly	30 day T	h or %
Insolation Time	Hourly	30 day A	H
Insolation	Hourly	30 day A	J/m <sup>2</sup> h
Precipitation Time	Hourly	30 day T	H
Precipitation	Daily	30 day T	Mm
Precipitation pH	Daily	30 day A&R	
SO <sub>2</sub> Concentration	Hourly	30 day A	ppb(vol)
SO <sub>2</sub> Deposition	30 day	30 day T	mgSO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> day
Chloride Deposition	30 day	30 day T	mgCl/m <sup>2</sup> day

A = average

R = range (high and low value)

T = total

Insolation Time = time during sun exposure

Insolation = solar heating

### 5.3.2 ΤΡΟΠΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι πολύ σημαντική η καταγραφή των παρατηρήσεων και των αποτελεσμάτων. Μετά την περισυλλογή των δοκιμίων συστήνεται προσεκτικός χειρισμός τόσο κατά τον καθαρισμό τους όσο και στην περαιτέρω επεξεργασία τους προκειμένου να μην απωλεσθούν οι πληροφορίες που φέρονται επί της επιφανείας των μέχρι την αξιολόγησή τους. Οι ευρύτερα διαδεδομένες μέθοδοι αξιολόγησης φαίνονται στον πίνακα 5-6

**Πίνακας 5-6: Μέθοδοι αξιολόγησης αποτελεσμάτων πειραμάτων ατμοσφαιρικής διάβρωσης [7]**

Technique	Value
Photographic documentation	Photographs of the specimens before and after cleaning give a permanent record of the performance of the material in the particular atmosphere.
Corrosion product analysis and surface deposits	Atmospheric-corrosion specimens usually have the corrosion product and airborne deposits on the surface at the time of removal. This adds a wealth of information on the observed behavior of the material.
Weight loss	For uniform corrosion, this is simple and can be converted to corrosion rate as g/m <sup>2</sup> /d, mils per year, etc.
Pitting and localized corrosion	Yields information on the susceptibility of a material to localized attack. Pitting corrosion is often reported as average or maximum depth of attack and is usually measured with a dial depth gage or vernier microscope. Where possible, pitting data should be treated statistically with recognized methods covered in various standards. Weight loss data should not be used indiscriminately to calculate corrosion rates where the primary form of corrosion is localized.
Rust or rust stain	Data reveal the propensity of a material to rust and the degree of rust staining. Also, through cleaning procedures, it can be determined if the original appearance was retained.
Tensile test and other physical tests	Can often yield information on the atmospheric effect on the strength of materials, cracking behavior, etc.
Appearance	Effect of environment on appearance, color retention, etc.

#### 5.4 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

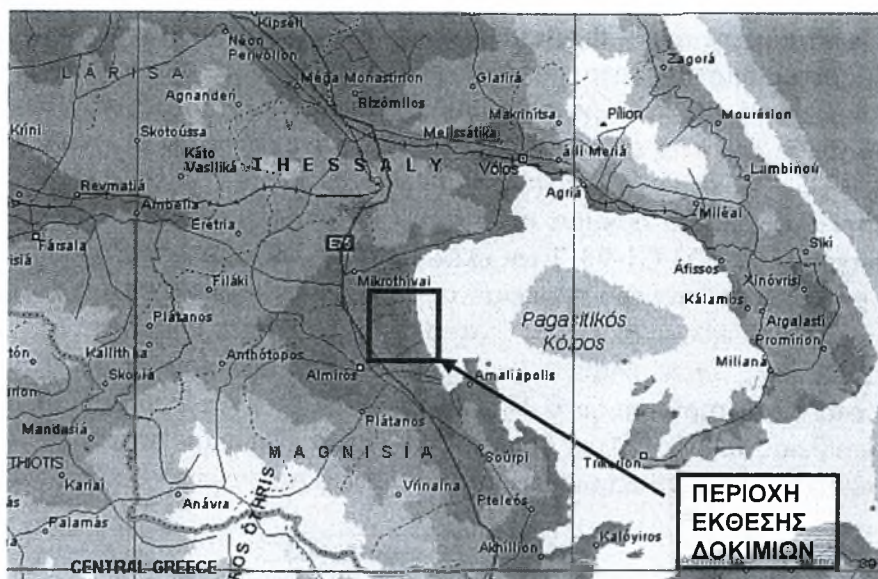
Για την διεξαγωγή των πειραμάτων έκθεσης δοκιμίων επιλέχθηκε το αεροδρόμιο της Ν.Αγχιάλου. Ο κύριος λόγος που συνέτεινε στην επιλογή του αεροδρομίου ως χώρου διεξαγωγής των πειραμάτων φυσικής διάβρωσης είναι το ότι η εργασία μελετά αεροπορικά κράματα και σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G50 οι περιοχές έκθεσης θα πρέπει να επιλέγονται με κριτήριο την αντιπροσωπευτικότητα του περιβάλλοντος που τα υπό μελέτη υλικά καλούνται να χρησιμοποιηθούν.

Επιπρόσθετα, υπάρχουν πλεονεκτήματα που ευνοούν την απρόσκοπτη διεξαγωγή του πειράματος. Πράγματι η συγκεκριμένη βάση γειτνιάζει με τη θάλασσα παρέχοντας ένα τυπικό θαλάσσιο περιβάλλον πλούσιο σε συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου (Cl<sub>2</sub>). Εξάλλου, η πτητική δραστηριότητα που υπάρχει, εξασφαλίζει την παρουσία παραγών ανθρώπινης δραστηριότητας που συμβάλλουν στη διάβρωση των αεροπορικών κατασκευών (καυσαέρια αεροκινητήρων, καυσαέρια από μηχανές εσωτερικής καύσης και εγκαταστάσεις θέρμανσης κλπ). Ειδικότερα, οι κυριότερες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης λόγω των δραστηριοτήτων της βάσης θεωρούνται οι κινητήρες των αεροσκαφών και των λοιπών επίγειων μέσων υποστήριξης πτήσεων καθώς και οι καυστήρες των εγκαταστάσεων θέρμανσης. Τα παράγωγα των παραπάνω είναι κυρίως CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> και μικρότερες ποσότητες NO<sub>x</sub>, CO.

Σημαντικό στοιχείο επίσης είναι ότι εντός του αεροδρομίου υπάρχει μετεωρολογικός σταθμός που παρέχει δυνατότητα για συνεχή παρακολούθηση και σχολαστική καταγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων καθόλη την διάρκεια της φυσικής έκθεσης των δοκιμίων. Ο εξοπλισμός που διατέθηκε για την παρακολούθηση των μετεωρολογικών δεδομένων παρατίθεται στο Παράρτημα «Α».

Τέλος, η εγγύτητα του αεροδρομίου με το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας/Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, διευκολύνει τη συλλογή των δοκιμίων και περιορίζει το χρόνο μεταφοράς στο εργαστηριακό περιβάλλον για περαιτέρω μελέτη και ανάλυση.

Η θέση της περιοχής έκθεσης σημειώνεται στο χάρτη της εικόνας 5-4.



Εικόνα 5-4: Η περιοχή έκθεσης των δοκιμίων

Το σημείο έκθεσης επιλέχθηκε να είναι σε απόσταση μικρότερη των 400m από την ακτογραμμή, ώστε το περιβάλλον έκθεσης να θεωρείται παραθαλάσσιο, σύμφωνα με την ASTM G112 [15]. Η αντίστοιχη απόσταση που έχει επικρατήσει στην πράξη είναι περίπου 2km (1.25 miles) [4]. Ωστόσο, σύμφωνα με ερευνητές [16] υπάρχουν δεδομένα που δείχνουν ότι μέχρι 4.5km – 5km από την ακτή συμβαίνει μεταφορά κρυστάλλων άλατος σε χαμηλό ύψος από το έδαφος, ανάγοντας τις περιοχές εκείνες επίσης σε περιοχές υψηλής διαβρωτικότητας.

### 5.5 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Για τα πειράματα φυσικής διάβρωσης χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από φύλλο Al2024-T3 πάχους 1.6mm προδιαγραφής QQ-A-250/4, που διατέθηκαν από την εταιρεία EAB A.E. αφού κόπηκαν σε μορφή παραλληλογράμμου με διαστάσεις 100mm×50mm. Οι ακμές των δοκιμίων είχαν υποστεί κατάλληλη λείανση ώστε να αφαιρεθούν ανωμαλίες των ακμών καθώς και εναπομένουσες τάσεις από την κοπή των δοκιμίων [8]. Η επιφάνεια έκθεσης  $A$  κάθε δοκιμίου προκύπτει από την σχέση:

$$A = 2 \frac{m}{\rho t} + 2t(l + w)$$

όπου  $A$  η επιφάνεια έκθεσης του δοκιμίου σε  $\text{cm}^2$

$m$  η αρχική μάζα του δοκιμίου σε g

$\rho$  η πυκνότητα του δοκιμίου σε  $\text{g/cm}^3$  δηλαδή  $2.768 \text{ g/cm}^3$  για το Al 2024-T3

$t$  το πάχος του δοκιμίου σε cm

$l$  το μήκος του δοκιμίου σε cm

$w$  το πλάτος του δοκιμίου σε cm

Η ανωτέρω σχέση παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την απλή χρήση των μετρούμενων διαστάσεων για τον καθορισμό της επιφάνειας κάθε δοκιμίου [17].

Λόγω του περιορισμένου αριθμού των διαθέσιμων δοκιμίων για τη διεξαγωγή όλων των πειραμάτων φυσικής και επιταχυνόμενης διάβρωσης, αποφασίστηκε η έκθεση στο περιβάλλον της αεροπορικής βάσης, οκτώ (8) δοκιμίων, με περισυλλογή τους σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα χωρίς αντικατάστασή τους.

Τα δοκίμια υπέστησαν χάραξη με εντυπωτική μεταλλική πόντα (stencil stamp) ώστε αφενός να είναι δυνατή η κωδικοποίηση-αναγνώρισή τους, αφετέρου δε να είναι

εφικτή η διάκριση της άνω επιφάνειας αυτών. Έτσι κάθε δοκίμιο χαρακτηρίστηκε με έναν αύξοντα αριθμό ανάλογα με την προγραμματισμένη σειρά περισυλλογής του κατά την διεξαγωγή του πειράματος φυσικής διάβρωσης. Ο αριθμός εντυπώθηκε στην άνω δεξιά γωνία της άνω επιφάνειας ως κωδικός αναγνώρισης δίνοντας τα σύμβολα “1”, “2”, “3”, ..., “8” στο αντίστοιχο δοκίμιο [11].

Στην συνέχεια τα δοκίμια υπέστησαν κατάλληλη προετοιμασία σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G1-90. Έτσι υπέστησαν καθαρισμό με αιθυλική αλκοόλη και έκπλυση με απιονισμένο νερό προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες και έκθεση σε ρεύμα ζεστού αέρα για να στεγνώσουν.

Ακολούθως έγινε επιβεβαίωση των διαστάσεών τους και ζύγιση καθενός δοκιμίου στο εργαστήριο σε ζυγό Tare Model 300 (Denver Instrument Company DE Series) ακρίβειας 0.001g. Όλες οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε ειδικό μητρώο που δημιουργήθηκε για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, όπως φαίνεται στην εικόνα 5-5.

<b>ΜΗΤΡΩΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ</b>	
ΔΟΚΙΜΙΟ Νο:	Υλικό: Al 2024-T3
Περιοχή Έκθεσης:	N. Αγκίαλος, 111ΠΜ
Διάρκεια Έκθεσης:	
Ημ/νία Έναρξης Έκθεσης:	21-5-1998
Ημ/νία Πέρατος Έκθεσης:	
Αρχικό Βάρος $W_0$ :	
Τελικό Βάρος $W_{τελ}$ :	
Συμβολισμός Άνω Επιφάνειας Δοκιμίου:	
Χαρακτηρισμός Άνω Επιφάνειας Δοκιμίου:	(βάσει ASTM G34)
Χαρακτηρισμός Άνω Επιφάνειας Δοκιμίου:	(βάσει ASTM G34)
<b>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:</b>	
Γεωγραφικές Συνεταγμένες:	
Υψόμετρο:	
Γωνία Κλίσης Δοκιμίου:	

**Εικόνα 5-5:** Πρότυπο Μητρώο Δοκιμίου Φυσικής Διάβρωσης

Σύμφωνα με τον σχεδιασμό, η συνολική διάρκεια του πειράματος ορίστηκε σε 24 μήνες. Το εν λόγω χρονικό διάστημα είναι το ελάχιστο απαιτούμενο για εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων προκειμένου για διάβρωση κραμάτων αλουμινίου που εκτίθενται σε παραθαλάσσιο περιβάλλον [15] όπως στην προκειμένη περίπτωση. Στο χρονικό διάστημα αυτό, σε τακτά χρονικά διαστήματα προγραμματίστηκε η παρατήρηση όλων των δοκιμίων και η περισυλλογή ενός δοκιμίου κάθε 3 μήνες για περαιτέρω μελέτη και επεξεργασία προκειμένου να αντληθούν στοιχεία για την πορεία της διάβρωσης και τη συμπεριφορά του μετάλλου. Η συχνότητα αυτή είναι σύμφωνη με την προδιαγραφή ASTM G112 στην οποία καθορίζεται ότι σε πειράματα φυσικής έκθεσης κραμάτων Al η συχνότητα παρατήρησης θα πρέπει να είναι δύο φορές ανά έτος ή συχνότερα εφόσον πρόκειται για τους 24 πρώτους μήνες έκθεσης [15]. Το χρονοδιάγραμμα που εκπονήθηκε για την παρακολούθηση της εξέλιξης του πειράματος παρατίθεται στην εικόνα 5-6.



Ως βέλτιστη χρονική περίοδος έναρξης αποφασίστηκε η άνοιξη και συγκεκριμένα το τελευταίο δεκαήμερο Μαΐου, καθώς σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G112, είναι προτιμητέο η έναρξη των πειραμάτων φυσικής έκθεσης κραμάτων αλουμινίου, να γίνεται στην αρχή των θερμότερων περιόδων του έτους όπου αναμένονται σημαντικές μεταβολές στη θερμοκρασία και σε άλλες κλιματολογικές συνθήκες και συνεπώς ο ρυθμός διάβρωσης αναμένεται να είναι μεγαλύτερος.

Κατόπιν τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στον χώρο φυσικής τους έκθεσης (σε απόσταση περίπου 400m από την ακτή) και αναρτήθηκαν σε εσχάρα έκθεσης που κατασκευάστηκε ειδικά για το σκοπό αυτό. Λεπτομέρειες για την εσχάρα έκθεσης παρέχονται στο Παράρτημα “Α” της εργασίας.

Η εσχάρα τοποθετήθηκε επί βάσεως με κλίση 45° ως προς την οριζόντιο, όπως προβλέπεται για την περιοχή της Ευρώπης, [11] και κατεύθυνση ανατολική, ώστε τα δοκίμια να είναι στραμμένα προς τη θάλασσα που θεωρήθηκε για την περιοχή η κυριότερη πηγή διαβρωτικών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (άλατα Cl<sub>2</sub>) [10].

Κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων επί της εσχάρας ελήφθη μέριμνα ώστε η επιφάνεια του δοκιμίου που έφερε τον κωδικό χαρακτηρισμού, να τοποθετηθεί με κατεύθυνση προς τα πάνω, ώστε να είναι εφικτή η διαπίστωση τυχόν διαφορών μεταξύ των επιφανειών κάθε δοκιμίου ως προς την διαβρωτική συμπεριφορά.

Η συλλογή των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με το εκπονηθέν χρονοδιάγραμμα της εικόνας 5-6. Το κάθε δοκίμιο αμέσως μετά την περισυλλογή του υποβλήθηκε σε διαδικασία καθαρισμού, περαιτέρω μετρήσεων και μελέτης σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στην προδιαγραφή ASTM G1-90 που συνίστανται στα ακόλουθα:

α. Οπτική επιθεώρηση ώστε να πραγματοποιηθεί προκαταρκτική αξιολόγηση της κατάστασης του κάθε δοκιμίου πριν υποστεί οποιοδήποτε καθαρισμό. Στα πλαίσια αυτά έγινε και μια αρχική προσπάθεια κατηγοριοποίησης της επιφάνειας του δοκιμίου με βάση την παρατηρούμενη διάβρωση.

β. Καθαρισμός με έκπλυση με άφθονο νερό και ζύγιση του δοκιμίου. Ο σκοπός του αρχικού αυτού σταδίου καθαρισμού ήταν η απομάκρυνση από την επιφάνεια τυχόν φερτών ακαθαρσιών και επικαθίσεων χωρίς ουσιαστική επίδραση στην απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης. Κατόπιν το δοκίμιο στέγνωσε σε ρεύμα θερμού αέρα.

γ. Καθαρισμός με εμβάπτιση σε αραιό διάλυμα HNO<sub>3</sub> 8-10% κ.ο. στους 20°C-25°C για διάστημα 3 min και ελαφρά χρήση λεπτού, μαλακού πινέλου. Η επιλογή του μέσου καθαρισμού (διάλυμα HNO<sub>3</sub> 8-10% κ.ο.) και του χρόνου εμβάπτισης έγινε σύμφωνα με το Annex A1 της προδιαγραφής ASTM G1-90 (Procedure C.1.2). Αποτέλεσε το κύριο στάδιο καθαρισμού του δοκιμίου με επιδίωξη την απομάκρυνση μόνο των προϊόντων της διάβρωσης χωρίς να απομακρυνθεί μέταλλο βάσης. Ακολούθησε έκπλυση με άφθονο απιονισμένο νερό και καθαρισμός με υπερήχους (ultrasonic cleaning) σε ειδική συσκευή του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που περιγράφεται στο Παράρτημα “Α”. Κατόπιν, έγινε στέγνωμα του δοκιμίου σε ρεύμα θερμού αέρα και ζύγιση με αντίστοιχη καταγραφή της μεταβολής της μάζας του. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε, σύμφωνα με την μέθοδο που περιγράφεται στο Παράρτημα “Β”, μέχρι να απομακρυνθούν πλήρως τα προϊόντα της διάβρωσης. Τούτο επιβεβαιώθηκε οπτικά στο στερεοσκόπιο, όπου και έγινε φωτογράφιση της επιφάνειας του κάθε δοκιμίου. Κατά την τελική ζύγιση καταχωρήθηκε στο αντίστοιχο μητρώο του δοκιμίου η μάζα του μετά τον καθαρισμό από τα προϊόντα διάβρωσης.

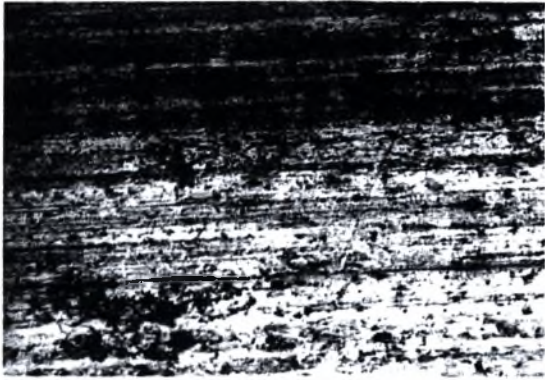
Μετά την στερεοσκοπική εξέταση του δοκιμίου εξετάστηκε μεταλλογραφικά τομή της διαβρωμένης επιφάνειας προκειμένου να εκτιμηθεί το βάθος διαβρωτικής προσβολής, η έκτασή της και οι επιπτώσεις στη δομή του κράματος. Για τον σκοπό αυτό, έγινε κοπή τμημάτων του διαβρωμένου δοκιμίου με ειδική συσκευή κοπής ακριβείας, τύπου Minitom Struers (βλέπε Παράρτημα “Α”) και εγκιβωτισμός με χρήση ειδικής συσκευής εγκιβωτισμού στο κενό, τύπου Eronac Struers.

Τα εγκιβωτισμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε προσεκτική λείανση, στίλβωση και προσβολή με χημικό αντιδραστήριο Keller’s. Επισημαίνεται ότι η επιλογή του κατάλληλου αντιδραστήριου αποτελεί υπόθεση κατά κύριο λόγο εμπειρική, παρά την υπάρχουσα βιβλιογραφία, η οποία δίνει κατευθυντήριες γραμμές. Το αντιδραστήριο Keller’s είναι διάλυμα  $\text{HNO}_3$ , HF και HCl σε απεσταγμένο  $\text{H}_2\text{O}$ . Συγκεκριμένα για την παρασκευή 100 ml Keller’s αναμίχθηκαν 95.0ml απεσταγμένου  $\text{H}_2\text{O}$ , 2.5ml  $\text{HNO}_3$ , 1.0ml HF και 1.5ml HCl.

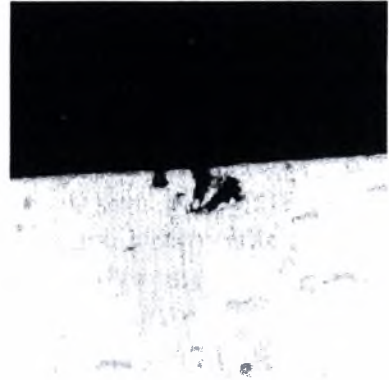
Το κάθε δοκίμιο προσβάλλεται από το αντιδραστήριο για χρόνο περίπου 14 sec, και στην συνέχεια ξεπλένεται με απεσταγμένο  $\text{H}_2\text{O}$  θερμοκρασίας 40-50°C. Τελικά εμβαπτίζεται για χρόνο 2-3 sec σε  $\text{HNO}_3$  (65%), πλένεται ξανά με άφθονο απεσταγμένο  $\text{H}_2\text{O}$  και στεγνώνεται με θερμό αέρα.

Με την μέθοδο αυτή επιτεύχθηκε η αποκάλυψη της μεταλλογραφίας του υλικού ώστε αυτή να καταστεί ορατή στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Ακολούθησε καταγραφή και φωτογράφιση των παρατηρήσεων προκειμένου να αξιοποιηθούν στην περαιτέρω ανάλυση και σχολιασμό.

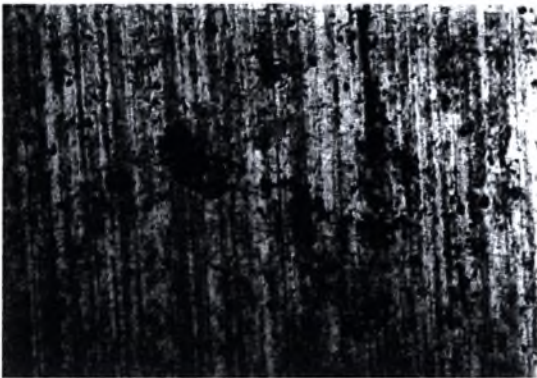
Ενδεικτικές φωτογραφίες από την στερεοσκοπική και μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων παρουσιάζονται στις εικόνες 5-7α έως 5-7ιστ. Περισσότερα στοιχεία περιέχονται στο Παράρτημα “ΣΤ”.



**Εικόνα 5-7α:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.



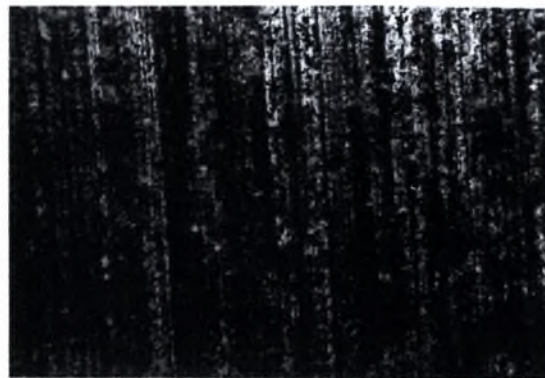
**Εικόνα 5-7β:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες



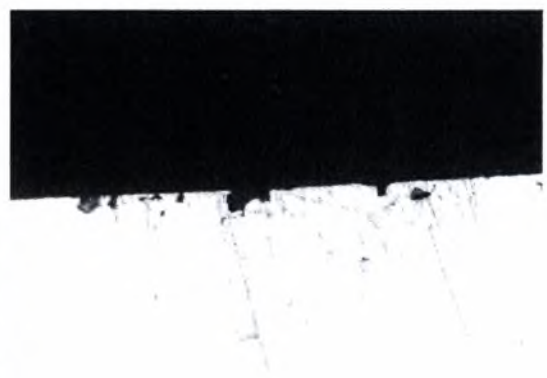
**Εικόνα 5-7γ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.



**Εικόνα 5-7δ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες



**Εικόνα 5-7ε:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.



**Εικόνα 5-7στ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες

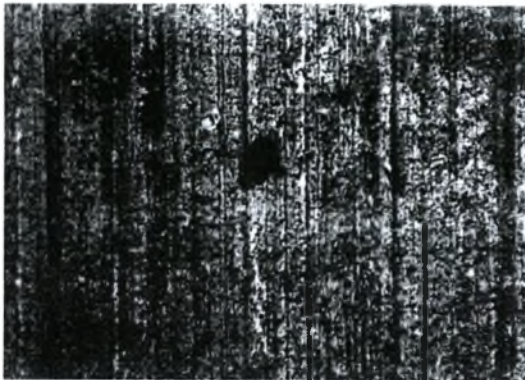




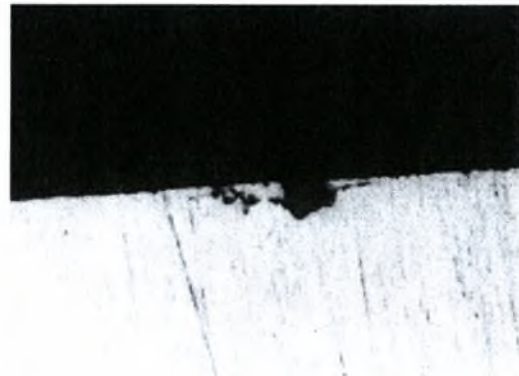
**Εικόνα 5-7ζ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες



**Εικόνα 5-7η:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



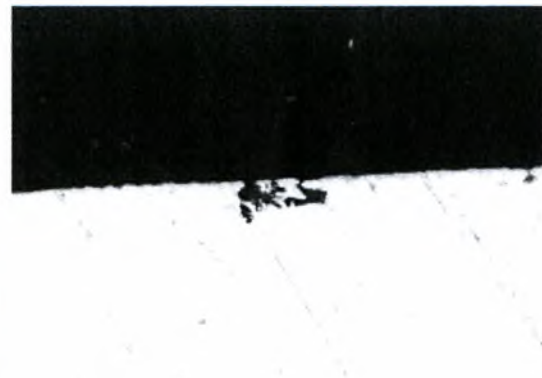
**Εικόνα 5-7θ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.



**Εικόνα 5-7ι:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες



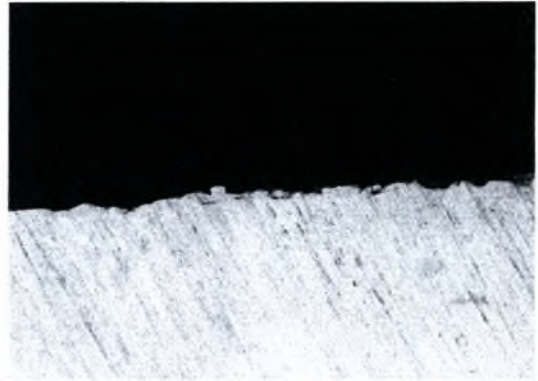
**Εικόνα 5-7ια:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.



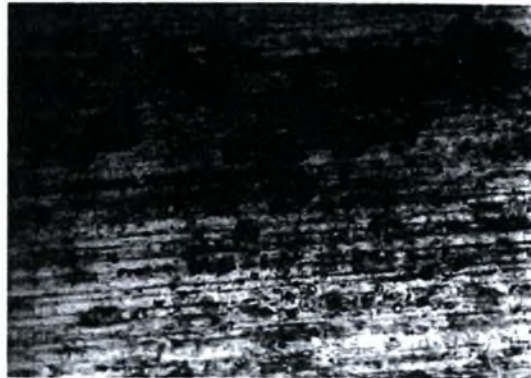
**Εικόνα 5-7ιβ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες



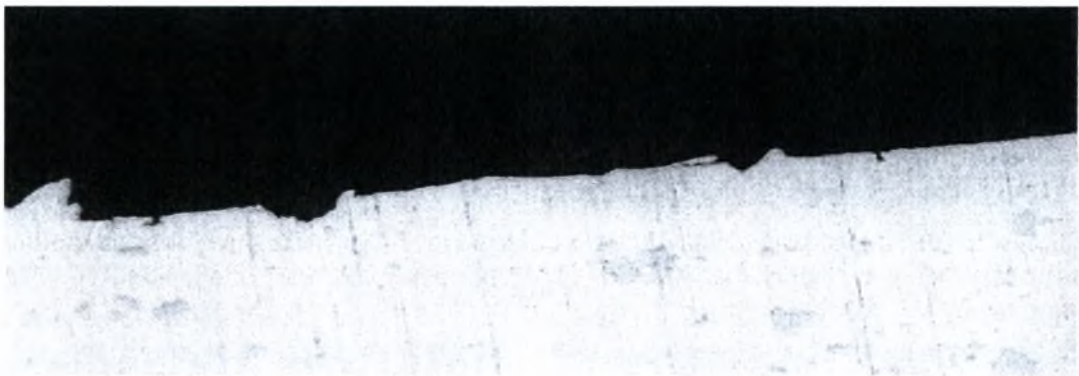
**Εικόνα 5-7ιγ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.



**Εικόνα 5-7ιδ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες



**Εικόνα 5-7ιε:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες



**Εικόνα 5-7ιστ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.

## 5.6 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στον πίνακα 5-7 παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά στοιχεία και η συχνότητα καταγραφής τους κατά την διάρκεια του πειράματος.

**Πίνακας 5-7: Μετεωρολογικά Στοιχεία και Συχνότητα Καταγραφής**

<u>Μετεωρολογικά Στοιχεία</u>	<u>Συχνότητα Καταγραφής</u>
Μ.Ο. Θερμοκρασίας	Ανά 6 ώρες
Ελάχιστη Θερμοκρασία	Ανά 6 ώρες
Μ.Ο. Ελάχιστης Θερμοκρασίας	Ανά 6 ώρες
Μέγιστη Θερμοκρασία	Ανά 6 ώρες
Μ.Ο. Μέγιστης Θερμοκρασίας	Ανά 6 ώρες
Σχετική Υγρασία	Ανά 6 ώρες
Απόλυτη Υγρασία	Ανά 6 ώρες
Μ.Ο. Σημείου Δρόσου	Ανά 6 ώρες
Ολική Ακτινοβολία (ώρες)	Ανά 24 ώρες
Συνολικό ύψος βροχής	Ανά 24 ώρες
Ημέρες βροχής>1,0 mm	Ανά 30 ημέρες
Time Of Wetness (TOW) (HRS)	Ανά 6 ώρες
Μ.Ο. Σχετικής Υγρασίας @ all day	Ανά 24 ώρες
TOW (%)	---

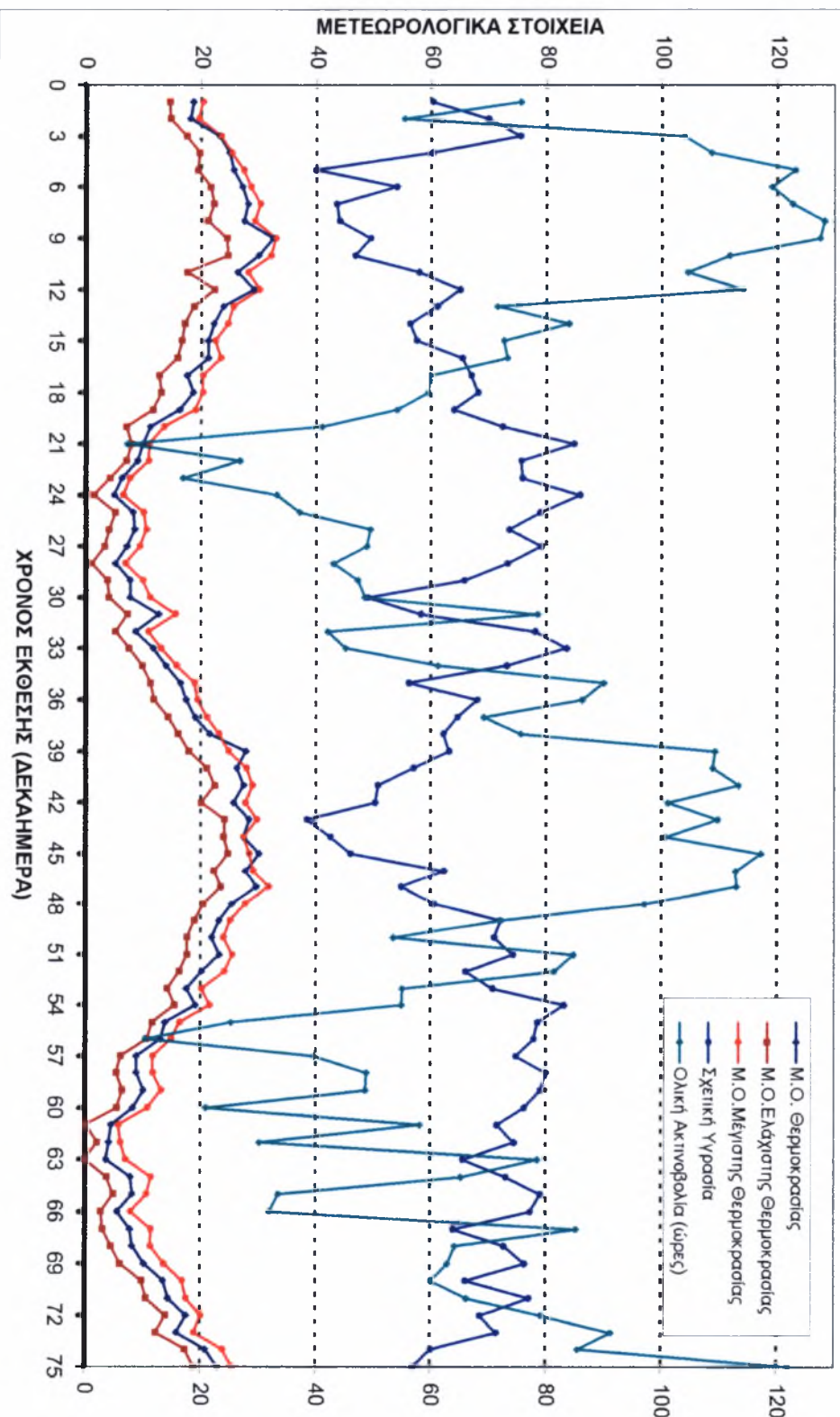
Τα μετεωρολογικά στοιχεία που καταγράφηκαν παρατίθενται γραφικά στις εικόνες 5-8α έως 5-8στ. Οι αντίστοιχες τιμές περιλαμβάνονται στο Παράρτημα “Δ”.

Η εικόνα 5-8στ δείχνει ότι η σχετική υγρασία είναι πάνω από 70% για περίπου το 48% του χρόνου. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στα περισσότερα μέταλλα θα συμβεί γρήγορα διάβρωση όταν η σχετική υγρασία ξεπεράσει κάποια κρίσιμη τιμή, συνήθως περίπου 60%. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ευνοϊκές συνθήκες για διάβρωση εμφανίζονται για περίπου 66% του εξεταζόμενου χρόνου.

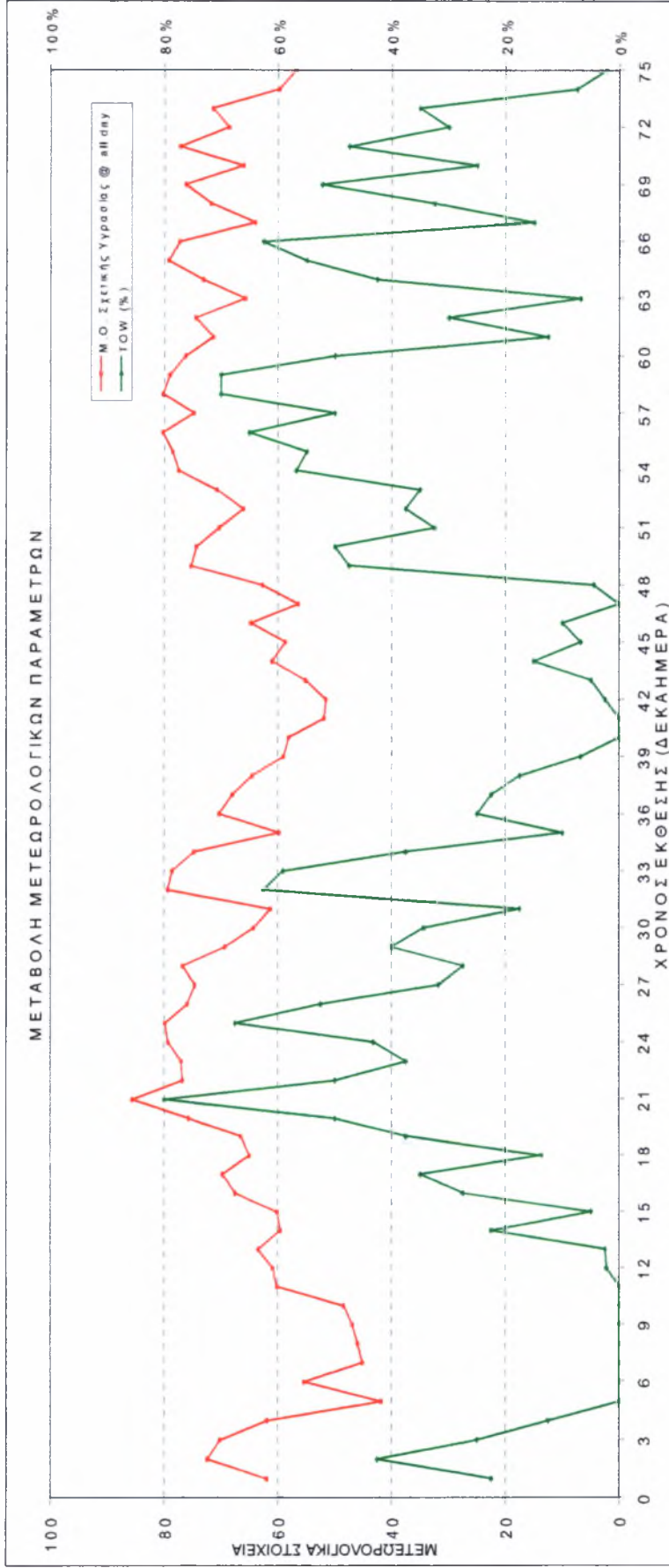
Σύμφωνα με τα μετεωρολογικά στοιχεία, οι ώρες ύγρανσης (Time of Wetness - TOW) το πρώτο έτος έκθεσης είναι 2322 ώρες και το δεύτερο έτος έκθεσης είναι 2694 ώρες, ήτοι κατά μέσο όρο 2508 ώρες/έτος.

Βάσει των προδιαγραφών ISO TC156 και ISO 9223, οι υπόψιν τιμές οδηγούν σε υπαγωγή της ατμόσφαιρας **στα ανώτατα όρια της κατηγορίας ύγρανσης T3** (250-2600 ώρες ανά έτος) και **στα κατώτατα όρια της κατηγορίας ύγρανσης T4** (2600-5200 ώρες ανά έτος). Η υπόψη κατηγοριοποίηση θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω για τον χαρακτηρισμό της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος έκθεσης.

### ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

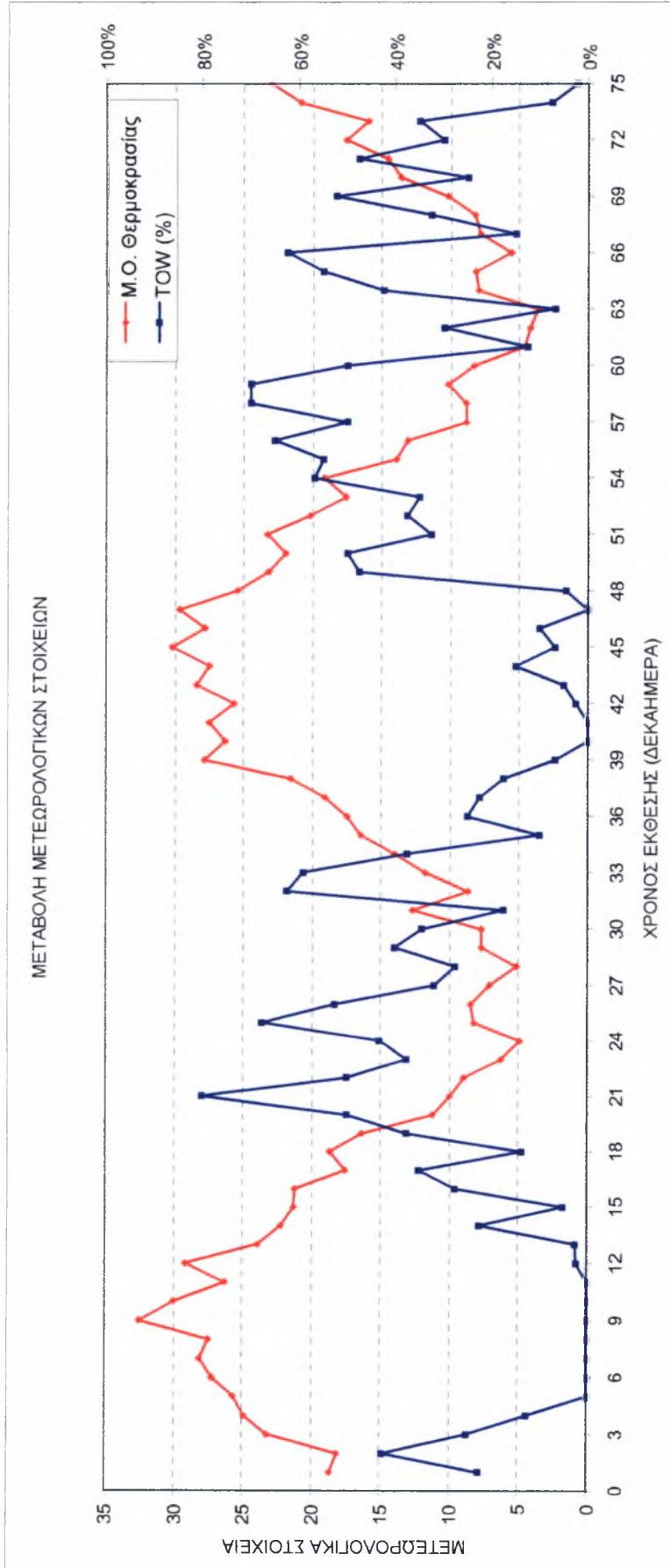


Εικόνα 5-8α: Μεταβολή Μετεωρολογικών Παραμέτρων κατά την Φυσική Έκθεση Δοκιμίων

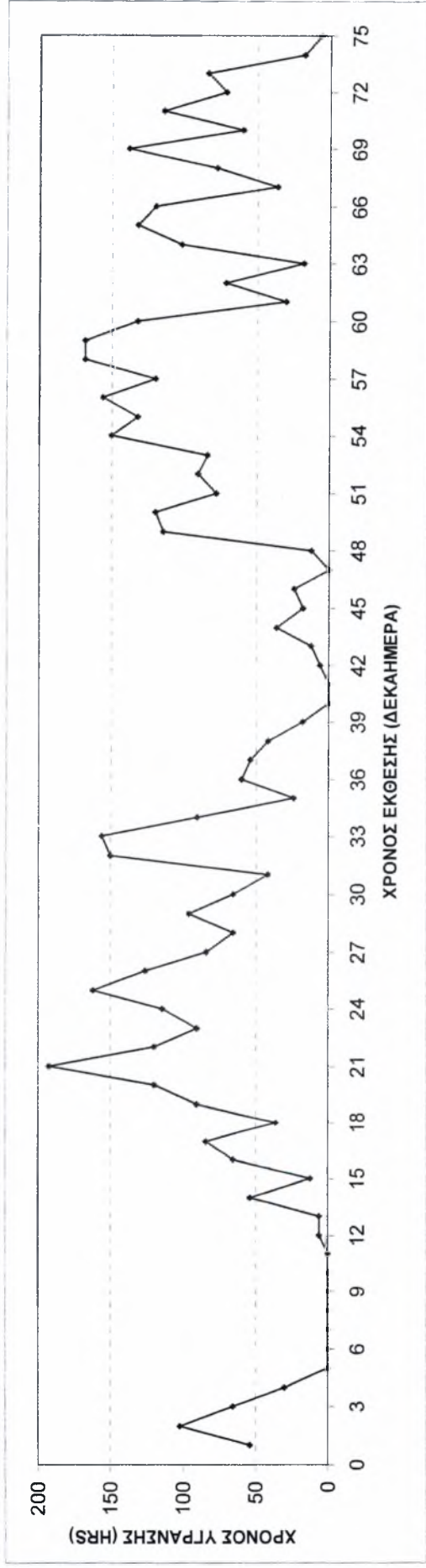


**Εικόνα 5-8β:** Μεταβολή Μετεωρολογικών Παραμέτρων κατά την Φυσική Έκθεση Δοκιμίων

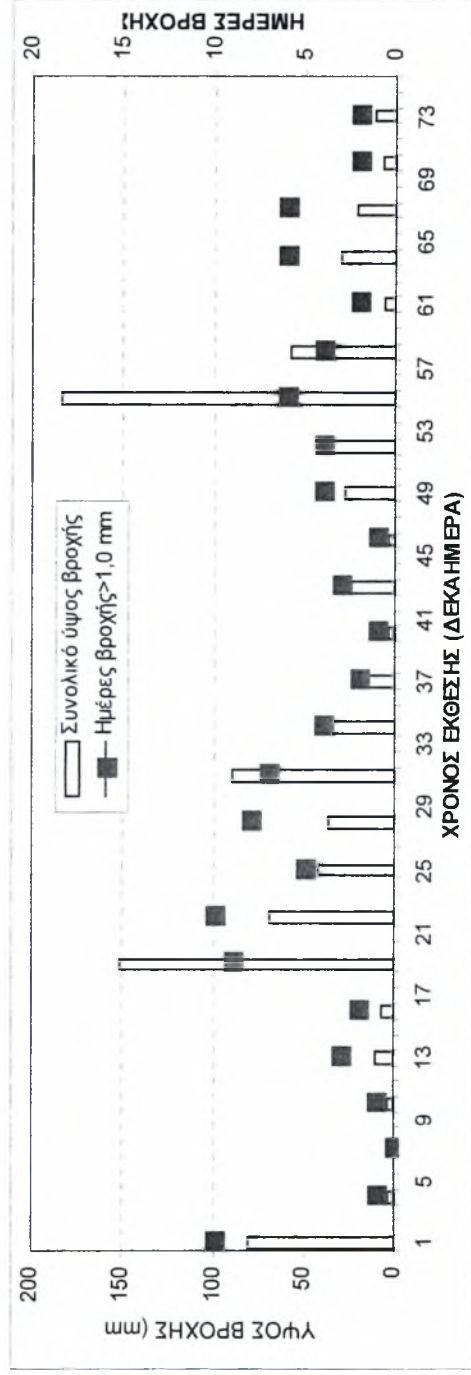




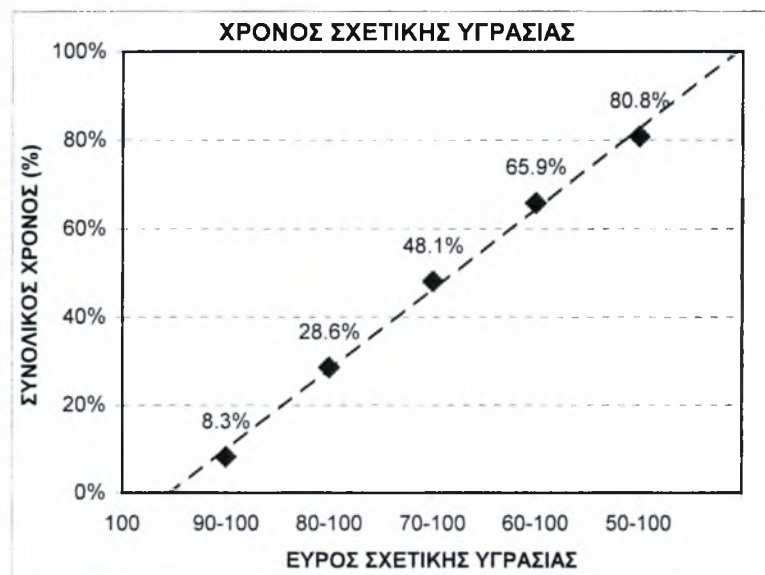
**Εικόνα 5-8γ: Μεταβολή Μετεωρολογικών Παραμέτρων κατά την Φυσική Έκθεση Δοκιμών**



Εικόνα 5-8δ: Μεταβολή Μετεωρολογικών Παραμέτρων κατά την Φυσική Έκθεση Δοκιμίων



Εικόνα 5-8ε: Μεταβολή Μετεωρολογικών Παραμέτρων κατά την Φυσική Έκθεση Δοκιμίων



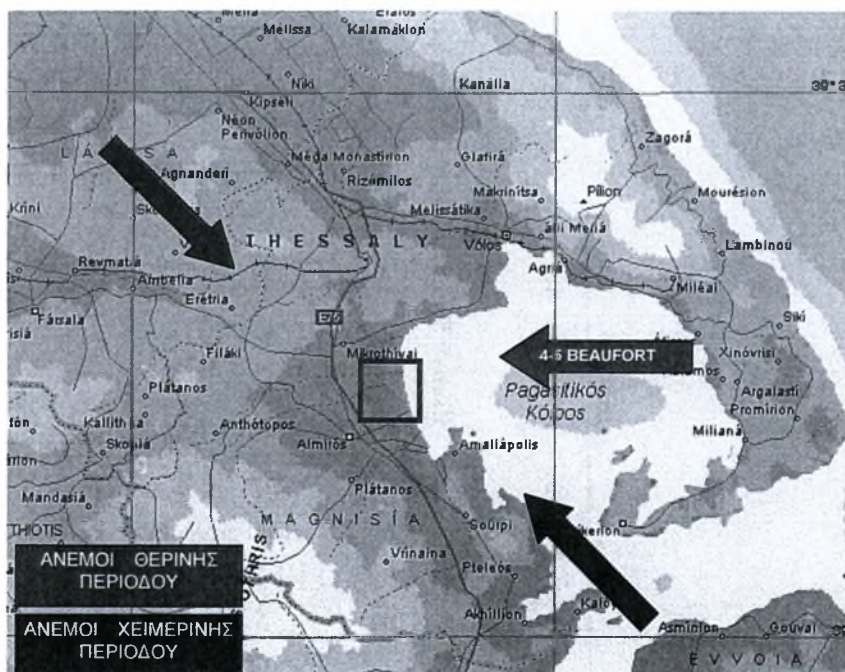
Εικόνα 5-8στ: Μεταβολή Μετεωρολογικών Παραμέτρων κατά την Φυσική Έκθεση Δοκιμών

### 5.7 ANEMOI

Σύμφωνα με στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της αεροπορικής βάσης, συνήθως το καλοκαίρι (θερινή περίοδος έτους) οι άνεμοι στην περιοχή έκθεσης είναι από ανατολικές διευθύνσεις, με ένταση 15-20 κόμβους (4-5 beaufort).

Το χειμώνα (χειμερινή περίοδος έτους) οι άνεμοι στην περιοχή έκθεσης είναι από βορειοδυτικές ή νοτιοανατολικές διευθύνσεις, με ένταση 15-20 κόμβους (4-5 beaufort). Εκτός ορισμένων περιπτώσεων που υπερβαίνει την ένταση αυτή και μπορεί να έχει νοτιοανατολικές διευθύνσεις 40-45 κόμβους (8-9 beaufort).

Τα ανωτέρω φαίνονται στην εικόνα 5-9



Εικόνα 5-9: Επικρατούντες άνεμοι στην περιοχή έκθεσης



## 5.8 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΚΘΕΣΗΣ

### 5.8.1 Συγκέντρωση Χλωρίου ( $Cl_2$ )

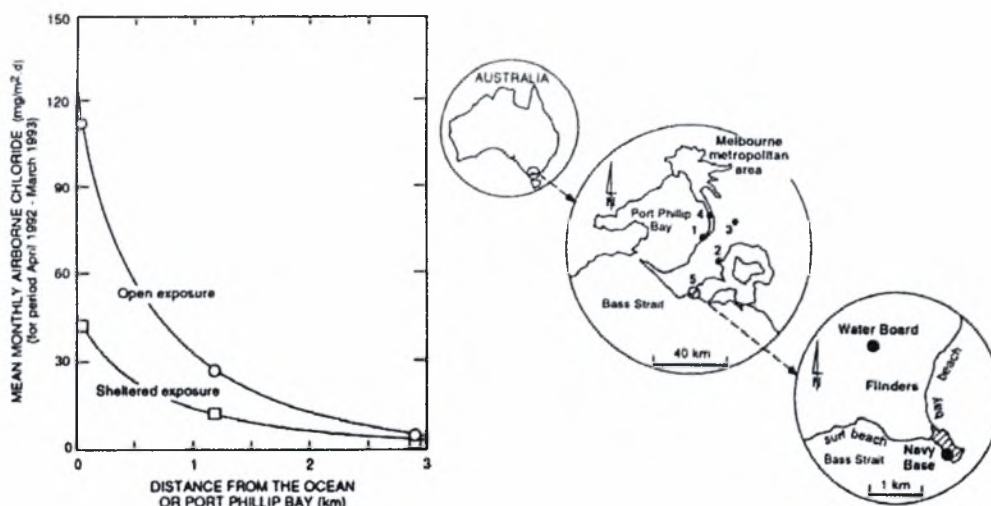
Η υπάρχουσα υποδομή δεν παρείχε δυνατότητες καταγραφής και παρακολούθησης της συγκέντρωσης του  $Cl_2$  στην ατμόσφαιρα. Για το λόγο αυτό αναζητήθηκαν πληροφορίες από την διαθέσιμη βιβλιογραφία προκειμένου να εξαχθούν αντιπροσωπευτικές για την περιοχή, μέσες τιμές συγκέντρωσης  $Cl_2$  στην ατμόσφαιρα.

Στοιχεία ελήφθησαν από τις εργασίες των Morcillo et al. [18], King και O'Brien [19], Morcillo, Simancas και Feliu [20] και Morcillo M. [21].

Από τις ανωτέρω εργασίες παρατηρείται ότι γενικώς η συγκέντρωση  $Cl_2$  στην ατμόσφαιρα έχει σημαντική διακύμανση, οι δε τιμές εξαρτώνται από παράγοντες όπως το υψόμετρο της περιοχής, απόσταση από τη θάλασσα, την τοπογραφία της περιοχής, την διεύθυνση και ταχύτητα των επικρατούντων ανέμων. Γι' αυτό, κατά τη μελέτη των εργασιών ελήφθησαν υπόψη μόνο οι περιοχές που εμφάνιζαν ομοιότητες με την περιοχή έκθεσης των δοκιμών της παρούσας εργασίας όπως οι εικονιζόμενες στις εικόνες 5-10, 5-11 σε μια προσπάθεια απόκτησης κατά το δυνατόν πιο αξιόπιστων προσεγγίσεων-εκτιμήσεων.



Εικόνα 5-10: Περιοχή Tarragona Ισπανίας [18]



Εικόνα 5-11: Περιοχή Μελβούρνη Αυστραλίας [19]

Οι παρατηρήσεις από τις παραπάνω εργασίες αναφορικά με τις συγκεντρώσεις χλωρίου στην ατμόσφαιρα παρουσιάζονται στον πίνακα 5-8 που ακολουθεί.

**Πίνακας 5-8:** Συγκεντρώσεις ιόντων Cl<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα σε παραθαλάσσιες περιοχές παρόμοιες με την περιοχή έκθεσης. Έγινε χρήση της μεθόδου wet candle. [18,19,20,21]

Εξεταζόμενη περιοχή	Χρόνος	Περιεκτικότητα ιόντων Cl <sub>2</sub> σε ατμόσφαιρα (mg/m <sup>2</sup> day)	Περιεκτικότητα ιόντων SO <sub>2</sub> σε ατμόσφαιρα (mg/m <sup>2</sup> day)
Tarragona, Spain	Αυγ 1994	27.90	
Tarragona, Spain	Σεπτ 1994	26.37	
Tarragona, Spain	Οκτ 1994	29.10	
Tarragona, Spain	Νοε 1994	10.77	
Tarragona, Spain	Δεκ 1994	7.31	
Tarragona, Spain	Ιαν 1995	12.34	
Tarragona, Spain	Φεβ 1995	8.33	
Tarragona, Spain	Μαρ 1995	114.47	
Tarragona, Spain	Απρ 1995	20.37	
Tarragona, Spain	Μαρ - Μαί 1996	53.84	
Tarragona, Spain	Ιουν - Αυγ 1996	38.47	
Tarragona, Spain	Σεπτ - Νοε 1996	63.79	
Tarragona, Spain	Δεκ 1996-Φεβ 1997	90.61	
Navy Base Port Philip Australia (Coastal)		112	
Water Board Port Philip Australia (1300m from sea)		27	
Barcelona, Spain (Marine)		27	58
Cadiz, Spain (Marine)		29	36
Cabo Negro, Spain (Marine)		150	24
Alicante, Spain (Marine 100m from sea)		31	15
MICAT project		24.34	14.73

Από την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων συνάγεται ότι κατά μέσο όρο στις εξεταζόμενες περιοχές ο ρυθμός απόθεσης ιόντων Cl<sub>2</sub> είναι περίπου 45.2 mg/m<sup>2</sup>day. Αυτή είναι η τιμή που λαμβάνεται κατά την παρούσα εργασία ως αντιπροσωπευτική τιμή για τα ιόντα Cl<sub>2</sub>, στην περιοχή έκθεσης των δοκιμίων. Σημειώνεται ότι η υπόψιν τιμή βρίσκεται σε συμφωνία με τα γενικά στοιχεία που παρατίθενται στο κεφάλαιο 3.

Σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 9223, η ατμόσφαιρα της αεροπορικής βάσης (περιοχής έκθεσης), κατηγοριοποιούμενη ως προς την περιεκτικότητα σε Cl<sub>2</sub>, κατατάσσεται στην **γενική τάξη S1** (3-60 mg/m<sup>2</sup>day).

### 5.8.2 Συγκέντρωση Θείου (SO<sub>2</sub>)

Όμοια με την συγκέντρωση Cl<sub>2</sub>, η υπάρχουσα υποδομή δεν παρείχε τη δυνατότητα καταγραφής και παρακολούθησης της συγκεντρώσεως του SO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Έτσι υιοθετήθηκε ίδια προσέγγιση με την περίπτωση του Cl<sub>2</sub>, αξιοποιώντας τις υπάρχουσες εργασίες-πηγές [18,19,20,21]. Οι τιμές που έχουν καταγραφεί φαίνονται στον πίνακα 5-8.

Από τον πίνακα 5-8 και από την επεξεργασία των στοιχείων συνάγεται ότι κατά μέσο όρο στις εξεταζόμενες περιοχές ο ρυθμός απόθεσης ιόντων SO<sub>2</sub> είναι περίπου 29.5 mg/m<sup>2</sup>day, που συμφωνεί και με τα γενικά στοιχεία που παρατίθενται στο κεφάλαιο 3.

Βάσει των ανωτέρω και σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 9223, η ατμόσφαιρα της αεροπορικής βάσης (περιοχής έκθεσης), κατηγοριοποιούμενη ως προς την περιεκτικότητα σε SO<sub>2</sub>, κατατάσσεται στην **γενική τάξη P1** (10-35 mg/m<sup>2</sup>day).

Εξάλλου όπως αναφέρθηκε από τον Dean S.W. [17], ο ρυθμός απόθεσης SO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>day) σχετίζεται με την περιεκτικότητα SO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα (μg/m<sup>3</sup>) μέσω της σχέσης:

$$(SO_2 \text{ deposition rate}) = 0.844(SO_2 \text{ air concentration})$$

Η ανωτέρω σχέση βασίζεται στο γεγονός ότι 1μg/m<sup>3</sup> είναι ισοδύναμο με 0.381 ppb(vol) στους 25°C και η μετατροπή της συγκέντρωσης σε ρυθμό απόθεσης βασίζεται την προδιαγραφή ASTM G-91 σύμφωνα με την οποία 1ppb(vol) = 2.216 mg/m<sup>2</sup>day.

Για την περίπτωση της εργασίας μας

$$(SO_2 \text{ air concentration}) = \frac{29.5 \text{ mg/m}^2 \text{ day}}{0.844} = 34.95 \text{ μg/m}^3$$

## 5.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η επιφάνεια των δοκιμίων μετά την περισυλλογή τους και την παρατήρησή τους μακροσκοπικά, δεν έδειχνε ίχνη διαβρωσης. Συνεπώς στην επιφάνεια αποδόθηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34, ο χαρακτηρισμός N. Κατά την στερεοσκοπική και μεταλλογραφική εξέταση ωστόσο διαπιστώθηκαν απαρχές σημειακής διάβωσης (pitting) όπως φαίνεται στην εικόνα 5-7 και στο Παράρτημα “ΣΤ”.

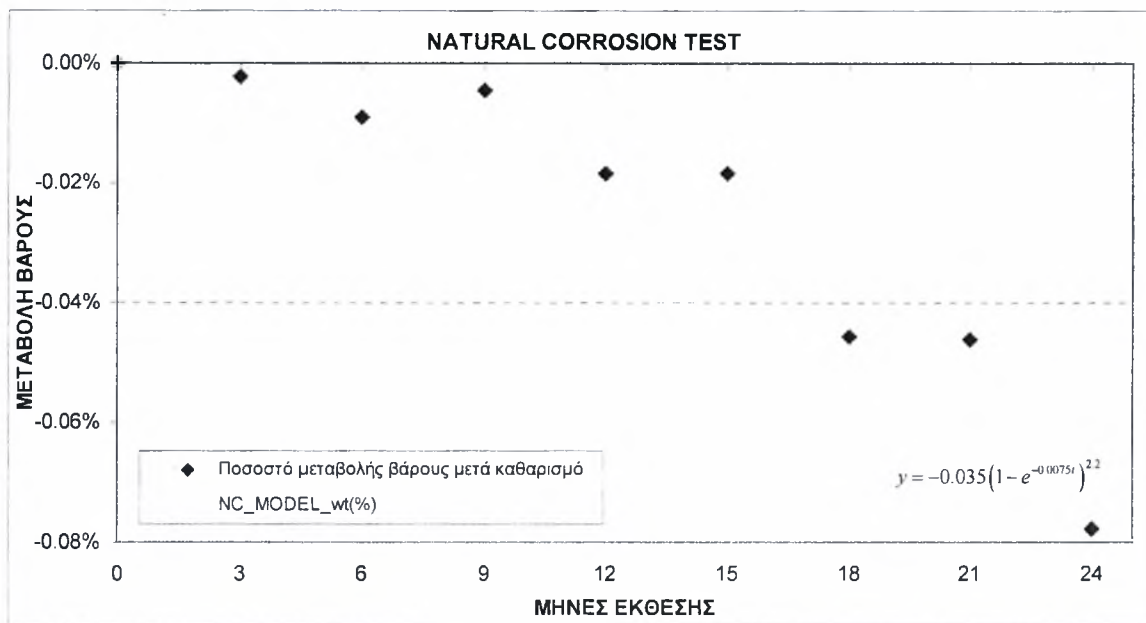
Τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την επεξεργασία των συλλεχθέντων δοκιμίων απεικονίζονται στον πίνακα 5-9 που ακολουθεί:

**Πίνακας 5-9:** Αποτελέσματα πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-Γ3. Συνολική διάρκεια πειράματος: 24 μήνες.

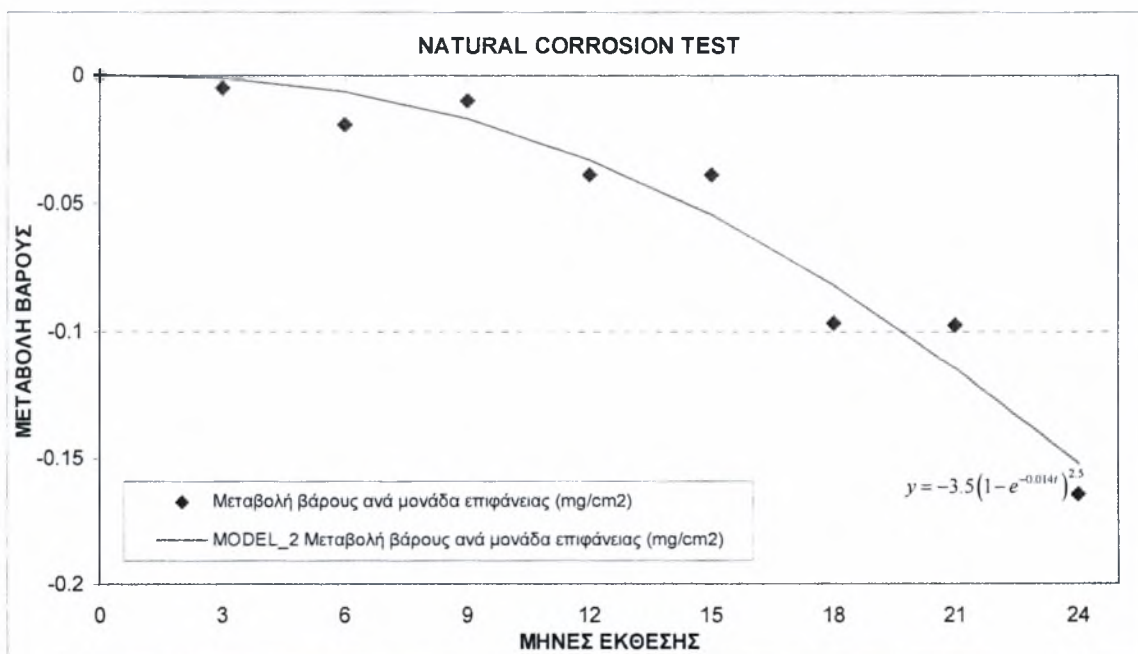
Δοκίμιο	Χρόνος έκθεσης (μήνες)	Επιφάνεια Α Δοκίμιου (cm <sup>2</sup> )	Αρχικό Βάρος Δοκίμιου W <sub>0</sub>	Τελικό Βάρος Δοκίμιου W <sub>τ.α</sub>	Μείωση βάρους ΔW (gr)	Σχετική μείωση βάρους ΔW	Μεταβολή βάρους ΔW/επιφάνεια (gr/cm <sup>2</sup> )	Κατάσταση Επιφάνειας (άνω/κάτω) (ASTM G34)	Ρυθμός Διάβρωσης (μm/y)
-	0	104.511	22.080	22.080	0.000	0	0	-	0
NC1	3	104.511	22.080	22.0795	0.0005	2.2645×10 <sup>-5</sup>	4.7842×10 <sup>-6</sup>	N/N	0.069136
NC2	6	104.168	22.004	22.002	0.002	9.0893×10 <sup>-5</sup>	1.9200×10 <sup>-5</sup>	N/N	0.138727
NC3	9	103.626	21.884	21.883	0.001	4.5695×10 <sup>-5</sup>	9.6500×10 <sup>-6</sup>	N/N	0.046484
NC4	12	102.840	21.710	21.706	0.004	1.8424×10 <sup>-4</sup>	3.8895×10 <sup>-5</sup>	N/N	0.140518
NC5	15	103.269	21.805	21.801	0.004	1.8344×10 <sup>-4</sup>	3.8733×10 <sup>-5</sup>	N/N	0.111947
NC6	18	103.626	21.884	21.874	0.010	4.5695×10 <sup>-4</sup>	9.6500×10 <sup>-5</sup>	N/N	0.232420
NC7	21	102.849	21.712	21.702	0.010	4.6057×10 <sup>-4</sup>	9.7230×10 <sup>-5</sup>	N/N	0.200722
NC8	24	103.472	21.850	21.833	0.017	7.7803×10 <sup>-4</sup>	1.6429×10 <sup>-4</sup>	N/N	0.296777

Σημειώνεται ότι δεδομένα από άλλες διαθέσιμες εργασίες (εργαστήριο NLR, Ολλανδίας) [22] παρέχουν απώλεια μάζας Al 2024-T3, μετά από 12 μήνες έκθεσης και κατόπιν καθαρισμού των δοκιμίων, 0.04 mg/cm<sup>2</sup> και κατηγοριοποίηση επιφάνειας (άνω/κάτω) σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34-90, N/N. Τα υπόψιν στοιχεία είναι σε απόλυτη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας.

Τα πειραματικά μας δεδομένα απεικονίζονται διαγραμματικά ακολούθως:



Εικόνα 5-12: Ποσοστό μεταβολής βάρους με το χρόνο έκθεσης



Εικόνα 5-13: Μεταβολή βάρους δοκιμίου ανά μονάδα επιφάνειας με το χρόνο έκθεσης

Στην εικόνα 5-12 τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

$$y = -0.035(1 - e^{-0.0075t})^{2.2}$$

το οποίο εκφράζει την ποσοστιαία μεταβολή βάρους των δοκιμίων μετά τον καθαρισμό τους σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$  έκθεσης σε μήνες.

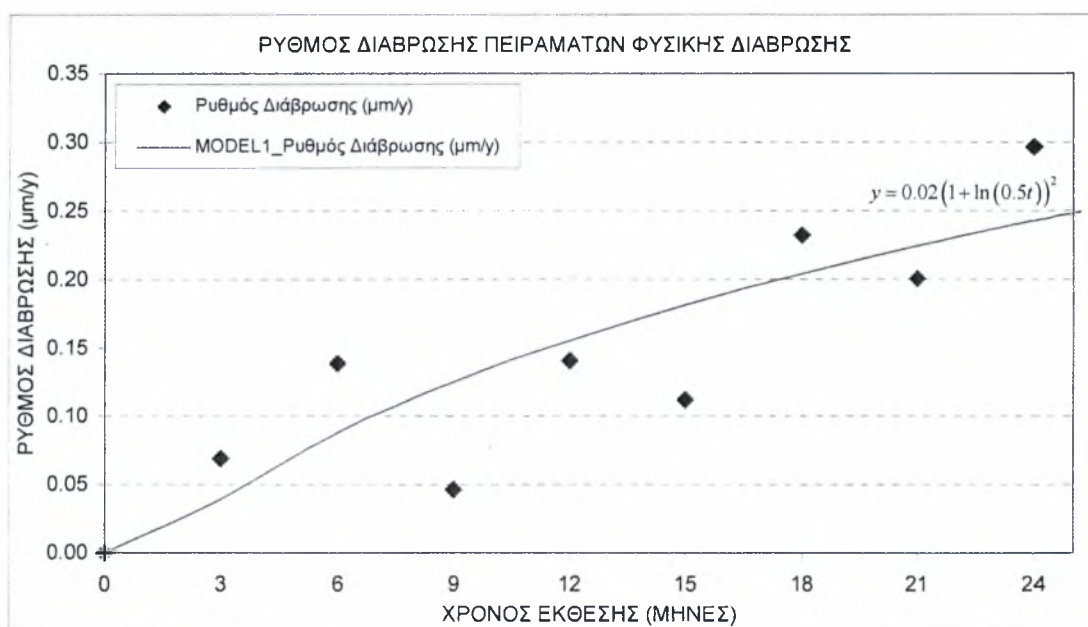
Αντίστοιχα στην εικόνα 5-13 τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

$$y = -3.5(1 - e^{-0.014t})^{2.5}$$

το οποίο εκφράζει την μεταβολή βάρους των δοκιμίων ανά μονάδα επιφάνειας σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$  έκθεσης σε μήνες. Εισάγοντας στη σχέση την πυκνότητα του Al 2024T3 ( $\rho_{Al2024T3} = 2768 \text{ mg/cm}^3$ ), ώστε να απεικονιστεί η επίδραση του υλικού, η σχέση διαμορφώνεται:

$$y = -3.5(1 - e^{-0.014t})^{2.5} = -1.265 \times 10^{-3} \times \rho_{Al2024T3} \times (1 - e^{-0.014t})^{2.5}$$

Η μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης κατά την διάρκεια των πειραμάτων φυσικής διάβρωσης παριστάνεται στην εικόνα 5-14. Τα δεδομένα περιέχονται στον πίνακα 5-9 και προέκυψαν με βάση τα καθοριζόμενα στο Παράρτημα “B”.



Εικόνα 5-14: Μεταβολή Ρυθμού Διάβρωσης με το χρόνο έκθεσης

Τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

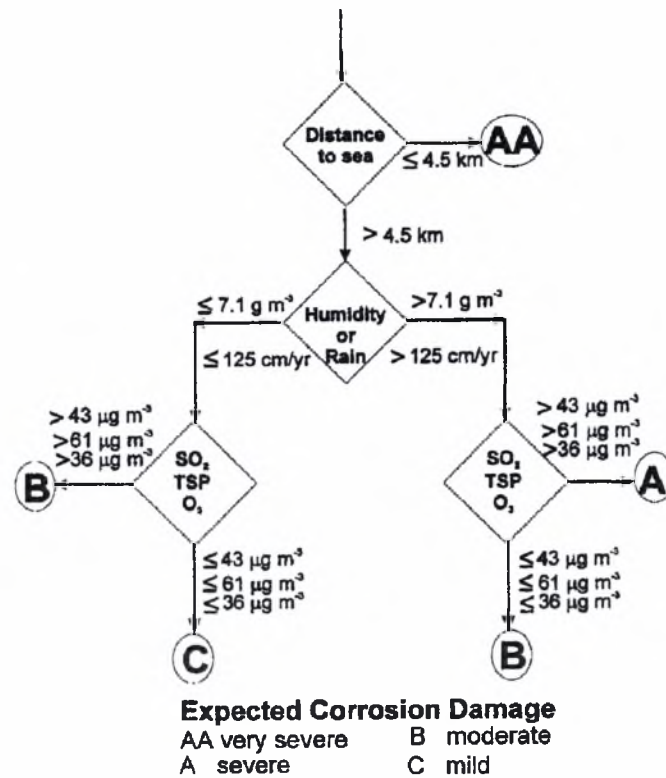
$$y = 0.02(1 + \ln(0.5t))^2$$

το οποίο εκφράζει την μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης των δοκιμίων σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$  έκθεσης τους και επίσης απεικονίζεται γραφικά στην εικόνα 5-14.

### 5.10 Αριθμητικές μέθοδοι εκτίμησης Φυσικής Διάβρωσης

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί ποικίλα μαθηματικά μοντέλα για την περιγραφή της ατμοσφαιρικής διάβρωσης λαμβάνοντας υπόψη μετεωρολογικές παραμέτρους, παραμέτρους ατμοσφαιρικών ρύπων και του χρόνου έκθεσης του υλικού. Ακολούθως θα παρουσιαστούν ορισμένα από τα μοντέλα που έχουν προταθεί για την περιγραφή της ατμοσφαιρικής διάβρωσης και έχουν προκύψει κατά κύριο λόγο κατόπιν στατιστικής μελέτης πειραματικών δεδομένων.

Ένας αλγόριθμος που εφαρμόζεται τα τελευταία 20 έτη για την πρόβλεψη της διαβρωτικότητας της ατμόσφαιρας είναι γνωστός ως αλγόριθμος PACER LIME και η λογική του απεικονίζεται στην εικόνα 5-15



Εικόνα 5-15: Ο αλγόριθμος PACER LIME για τον καθορισμό της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος συγκεκριμένης τοποθεσίας [23]

Με βάση πειράματα που διενεργήθηκαν για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της όξινης βροχής στη δεκαετία 1980, αναπτύχθηκε από τους Lipfert et als [24] η ακόλουθη συνάρτηση που περιγράφει την συνολική απώλεια μάζας Al ανά μονάδα επιφάνειας:

$$M = 0.206t^{0.987} \left[ 0.099 + 0.139f_{90}SO_2 + 0.0925Cl + 0.0164H^+ - 0.0013DUST \right]$$

όπου  $M$  η συνολική απώλεια μάζας Al ανά μονάδα επιφάνειας ( $g/m^2$ )

$t$  ο χρόνος σε έτη

$(SO_2)$  η μέση συγκέντρωση  $SO_2$  σε  $\mu g/m^3$

$(Cl)$  ο ρυθμός απόθεσης χλωριδίων σε  $mgm^{-2}day$

$(H^+)$  ο ρυθμός απόθεσης ιόντων υδρογόνου μέσω της βροχής ( $\mu Eqm^{-2}day$ )

$f_{90}$  τμήμα του χρόνου όπου η σχετική υγρασία είναι μεγαλύτερη από 90% και η θερμοκρασία άνω των  $0^\circ C$

$DUST$  ο ρυθμός απόθεσης dustfall ( $mgm^{-2}day$ )

Η λογική σύνδεσης του όρου  $f_{90}$  που εκφράζει χρόνο ύγρανσης με τον όρο  $SO_2$ , είναι ότι το διοξείδιο του θείου απαιτεί ύπαρξη φιλμ υγρασίας για να αποτεθεί στην επιφάνεια. Αντίθετα σε ξηρή επιφάνεια δεν αποτίθεται.

Ως αποτέλεσμα προγράμματος μελέτης διαβρωτικότητας που δρομολογήθηκε από Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (International Organization of Standardization (ISO)), γνωστό και ως ISO CORRAG και περιέλαβε περίπου 51 περιοχές έκθεσης σε Ευρώπη και ΗΠΑ, προέκυψε η ακόλουθη σχέση που απεικονίζει το λογαριθμικό ρυθμό διάβρωσης που παρατηρείται στο Al μετά από ένα (1) έτος έκθεσης:

$$\text{Log}(\text{rate}) = -0.739 + 3.26(\text{TOW}) + 5.02(\text{SO}_2) + 6.71(\text{Cl})$$

όπου (TOW) είναι ο παράγοντας του χρόνου ύγρωσης  
(SO<sub>2</sub>) η μέση συγκέντρωση SO<sub>2</sub> σε μg/m<sup>3</sup>  
(Cl) ο ρυθμός απόθεσης χλωριδίων σε mgm<sup>2</sup>day

Η ανάπτυξη της σχέσης βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα 32 διαφορετικών περιοχών έκθεσης και η στατιστική απόκλιση από την πράξη ήταν πολύ μικρή [23].

Επίσης είναι γενικά παραδεκτό ότι η ατμοσφαιρική διάβρωση αναπτύσσεται σύμφωνα με εκθετική συνάρτηση [17, 20, 23] που υπακούει στο γενικό νόμο:

$$C = At^n$$

όπου A και C είναι οι απώλειες λόγω διάβρωσης μετά από ένα(1) και t έτη αντίστοιχα n συντελεστής επιλεγμένος στατιστικά για εναρμόνιση με τα πειραματικά δεδομένα (συνήθως 0 < n < 1).

Σύμφωνα με τους Morcillo et als [20], για την περίπτωση του Al η παραπάνω σχέση είχε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα για τιμές n μεταξύ 0.6 – 1.0.

### 5.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις το μαθηματικό μοντέλο που προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα και εκφράζει το φαινόμενο της φυσικής διάβρωσης είναι της γενικής μορφής:

$$y = -k_1(1 - e^{-k_2 t})^{k_3}$$

όπου y είναι η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας σε (mg/cm<sup>2</sup>)

t είναι ο χρόνος σε μήνες και

k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και τις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής έκθεσης (μετεωρολογικά δεδομένα, διαβρωτικοί ρύποι κλπ).

Πράγματι από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι η φυσική διάβρωση στην περιοχή έκθεσης εκφράζεται από την σχέση:

$$y = -3.5(1 - e^{-0.014t})^{2.5}$$

Βάσει της υπόψιν σχέσης, η αναμενόμενη απώλεια μάζας μετά από δύο έτη έκθεσης είναι 0.15227 mg/cm<sup>2</sup>. Η αντίστοιχη πειραματικά μετρούμενη τιμή είναι 0.16429 mg/cm<sup>2</sup>, παρέχοντας απόκλιση περίπου 7.3%.

Η αντίστοιχη απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας που λαμβάνεται από την εφαρμογή της σχέσης του Lipfert είναι 1.764 g/m<sup>2</sup> = 0.1764 mg/cm<sup>2</sup> θεωρώντας



$t$  : 2 έτη  
 $(SO_2)$  :  $34.95 \mu g/m^3$ , όπως αναφέρθηκε προηγουμένως  
 $(Cl)$  :  $45.2 \text{ mgm}^2\text{day}$ , όπως αναφέρθηκε προηγουμένως  
 $(H^+)$  :  $0 \mu Eqm^2\text{day}$   
 $f_{90}$  :  $8.28\% = 0.00828$ , όπως προκύπτει από τα μετεωρολογικά δεδομένα  
 $DUST$  :  $0 \text{ mgm}^2\text{day}$

Όσον αφορά την κατηγοριοποίηση του περιβάλλοντος έκθεσης, λαμβάνοντας υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα, τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων και τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας (ISO TC156, ISO 9223, ISO 9224) προκύπτει ότι συγκεντρώνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικά	Τιμή	Κατηγοριοποίηση Τάξης	Κατηγορία Περιβάλλοντος	Ρυθμός Διάβρωσης ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
Ρυθμός Απόθεσης $Cl_2$ ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{day}$ )	45.2	S1	3	ST: 0.025-0.2 LT: 0.02-0.2
Ρυθμός Απόθεσης $SO_2$ ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{day}$ )	29.5	P1		
Χρόνος Ύγρανσης (hrs)	0-12 μήνες: 2322 hrs	T3		
	12-24 μήνες: 2694 hrs	T4	3-4	ST: περιοχή 0.2 LT: περιοχή 0.2
	M.O.: 2508 hrs/έτος	T3max – T4min		

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, το περιβάλλον έκθεσης ως προς την διαβρωτικότητα του (βλέπε πίνακα 3-7 κεφαλαίου 3) μπορεί να ενταχθεί στα μέγιστα όρια της κατηγορίας 3 και στα ελάχιστα όρια της κατηγορίας 4.

Η ανωτέρω κατηγοριοποίηση περιβάλλοντος θεωρείται τυπική ενός παραθαλάσσιου περιβάλλοντος στο οποίο επικρατεί ήπιο κλίμα με μέτρια προς υψηλά ποσοστά σχετικής υγρασίας.

Από την υπόψη κατηγοριοποίηση διαβρωτικότητας περιβάλλοντος προκύπτει ότι η αναμενόμενη τάξη ρυθμού διάβρωσης (βλέπε πίνακα 3-8 κεφαλαίου 3), για έκθεση κάτω των δέκα (10) ετών (ST – Short Term) είναι  $0.2 \mu\text{m}/\text{y}$ . Ο ρυθμός διάβρωσης που καταγράφεται με την ολοκλήρωση των πειραμάτων φυσικής διάβρωσης (μετά από δύο(2) έτη έκθεσης) είναι  $0.2968 \mu\text{m}/\text{y}$ , που είναι σε συμφωνία με την κατηγοριοποίηση του περιβάλλοντος και ταυτόχρονα αποτελεί επιβεβαίωση της ορθότητας των μετρήσεων, των παραδοχών και των υπολογισμών μας.

Για περαιτέρω επιβεβαίωση επιχειρήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες τιμές από την διαθέσιμη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5-10 και αποδεικνύουν την ρεαλιστικότητα των συμπερασμάτων μας.

**Πίνακας 5-10:** Συγκριτικές τιμές ρυθμού διάβρωσης

Περιοχή Έκθεσης	Ρυθμός Διάβρωσης ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	Βιβλιογραφική Αναφορά
Αεροπορική βάση Ν. Αγχιάλου Μαγνησίας, Ελλάδα	0.2968	Παρούσα Εργασία
US Naval Research Laboratory, Tropical Seacost, Cristobal Panama	<0.3	Heidersbah R.H., "Marine Corrosion" in <i>Metals Handbook</i> Vol 13, 9 <sup>th</sup> Edition, <i>Corrosion</i> , ASM 1987, Table 12, pp.915
Sandy Hook Seacost, New Jersey, USA	0.20	Hollingsworth E.H. and Hunsicker H.Y., "Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys" in <i>Metals Handbook</i> Vol 13, 9 <sup>th</sup> Edition, <i>Corrosion</i> , ASM 1987, Table 12, pp.915

## 5.12 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

### 5.12.1 EXCO TEST - ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η πειραματική αυτή μέθοδος επιταχυνόμενης διάβρωσης περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM G34-90 και περιλαμβάνει την εμβάπτιση δοκιμίων κράματος αλουμινίου σε ειδικά παρασκευασμένο διαβρωτικό διάλυμα. Το πείραμα προσομοιώνει την συνεχή έκθεση του κράματος αλουμινίου σε άκρως διαβρωτικό φυσικό περιβάλλον (εξαιρουμένης της περίπτωσης παρουσίας ασυνήθιστων και σπανίως συναντώμενων ισχυρών χημικών ουσιών). Σκοπός είναι η πρόβλεψη της διαβρωτικής συμπεριφοράς του κράματος αλουμινίου σε παραθαλάσσιο και βιομηχανικό περιβάλλον.

#### Προετοιμασία των Δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή πειραμάτων EXCO Test χρησιμοποιήθηκαν εννέα (9) δοκίμια από φύλλο Al 2024-T3 πάχους 1.6mm προδιαγραφής QQ-A-250/4, που διατέθηκαν από την εταιρεία EAB ΑΕ αφού κόπηκαν σε μορφή παραλληλογράμμου με διαστάσεις 100mm×50mm. Οι ακμές των δοκιμίων υπέστησαν κατάλληλη μηχανουργική κατεργασία λείανσης ώστε να αφαιρεθούν τυχόν ανωμαλίες των ακμών καθώς και τυχόν εναπομείνουσες τάσεις από την κοπή των δοκιμίων. Η επιφάνεια έκθεσης  $A$  του κάθε δοκιμίου προκύπτει από την σχέση:

$$A = 2 \frac{m}{\rho t} + 2t(l + w)$$

όπου  $A$  η επιφάνεια έκθεσης του δοκιμίου σε  $\text{cm}^2$

$m$  η αρχική μάζα του δοκιμίου σε g

$\rho$  η πυκνότητα του δοκιμίου σε  $\text{g/cm}^3$  δηλαδή  $2.768 \text{ g/cm}^3$  για το Al 2024-T3

$t$  το πάχος του δοκιμίου σε cm

$l$  το μήκος του δοκιμίου σε cm

$w$  το πλάτος του δοκιμίου σε cm

Διευκρινίζεται ότι η ανωτέρω σχέση παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την απλή χρήση των μετρούμενων διαστάσεων για τον καθορισμό της επιφάνειας εκάστου δοκιμίου [17].

Στη συνέχεια τα δοκίμια υπέστησαν κατάλληλη προετοιμασία σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G1-90. Έτσι, τα δοκίμια αφού καθαρίστηκαν με αιθυλική αλκοόλη και πλύθηκαν με απιονισμένο νερό προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες, εκτέθηκαν σε ρεύμα ζεστού αέρα για να στεγνώσουν.

Ακολούθως έγινε επιβεβαίωση των διαστάσεών τους και ζύγιση καθενός ξεχωριστά σε ζυγό Tare Model 300 (Denver Instrument Company DE Series) ακρίβειας 0.001g (βλέπε Παράρτημα “Α”) του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Όλες οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε ειδικό μητρώο που δημιουργήθηκε για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, η πρότυπη μορφή του οποίου παρατίθεται στην εικόνα 5-16.

<b>ΜΗΤΡΩΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ EXCO TEST</b>	
ΔΟΚΙΜΙΟ Νο :	Υλικό: ΑΙ 2024-Τ3
Τόπος Πειράματος: Παν. Θεσσαλίας Τμ. Μηχ/γων	
Διάρκεια Έκθεσης:	
Ημ/νία Έναρξης Έκθεσης:	
Ωρα:	
Ημ/νία Πέρατος Έκθεσης:	
Ωρα:	
Αρχικό Βάρος $W_0$ :	pH δ/τος σε Έναρξη:
Τελικό Βάρος $W_{τελ}$ :	pH δ/τος σε Πέρας:
Επιφάνεια Έκθεσης Δοκιμίου:	
(Όγκος δ/τος)/(Επιφάνεια Έκθεση Δοκιμίου):	
Συμβολισμός Άνω Επιφανείας Δοκιμίου:	
Χαρακτηρισμός Άνω Επιφανείας Δοκιμίου: (βάσει ASTM G34)	
Χαρακτηρισμός Άνω Επιφανείας Δοκιμίου : (βάσει ASTM G34)	
<b>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:</b>	

**Εικόνα 5-16:** Πρότυπο Μητρώο Δοκιμίου EXCO Test

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας λόγω του αυστηρά ελεγχόμενου περιβάλλοντος ως προς την θερμοκρασία και την υγρασία.

Η διάρκεια του πειράματος EXCO Test καθορίστηκε σε 96 ώρες (hrs) όπως περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM G34-90 για κράματα αλουμινίου της σειράς 2XXX [25]. Κατά το χρονικό διάστημα αυτό, προγραμματίστηκε η περιοδική παρατήρηση των εμβαπτισμένων δοκιμίων, η μέτρηση και καταγραφή της τιμής του pH του διαβρωτικού διαλύματος κάθε δοκιμίου και η περισυλλογή ενός δοκιμίου σε χρονικά διαστήματα, που καθορίζονται από την ανωτέρω προδιαγραφή, για περαιτέρω μελέτη και επεξεργασία προκειμένου να αντληθούν στοιχεία για την πορεία της διάβρωσης και τη συμπεριφορά του μετάλλου. Το χρονοδιάγραμμα που εκπονήθηκε για την παρακολούθηση της εξέλιξης του πειράματος παρατίθεται στην εικόνα 5-17.

## ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΙ 2024-T3 EXCO TEST

ID	Task Name	Duration	Start	Finish	Gantt Chart				
1	Έγχαρζη Πειραματος EXCO Test	0 hrs	Fri 1/5/98	Fri 1/5/98	◆ 1/5				
2	Εκθεση Δοκιμίου Α5	5 hrs	Fri 1/5/98	Fri 1/5/98	■				
3	Εκθεση Δοκιμίου Α8	8 hrs	Fri 1/5/98	Fri 1/5/98	■				
4	Εκθεση Δοκιμίου Α12	12 hrs	Fri 1/5/98	Fri 1/5/98	■				
5	Εκθεση Δοκιμίου Α16	16 hrs	Fri 1/5/98	Sat 2/5/98	■				
6	Εκθεση Δοκιμίου Α24	24 hrs	Fri 1/5/98	Sat 2/5/98	■				
7	Εκθεση Δοκιμίου Α36	36 hrs	Fri 1/5/98	Sat 2/5/98	■				
8	Εκθεση Δοκιμίου Α48	48 hrs	Fri 1/5/98	Sun 3/5/98	■				
9	Εκθεση Δοκιμίου Α72	72 hrs	Fri 1/5/98	Mon 4/5/98	■				
10	Εκθεση Δοκιμίου Α96	96 hrs	Fri 1/5/98	Tue 5/5/98	■				
11	Πέρασ Εκθέσεως Δοκιμίων Πειραματος EXCO Test	0 hrs	Tue 5/5/98	Tue 5/5/98	◆ 5/5				

Project: EXCO Test  
Date: Thu 7/7/05

Task		Milestone		External Tasks	
Split		Summary		External Milestone	
Progress		Project Summary		Deadline	

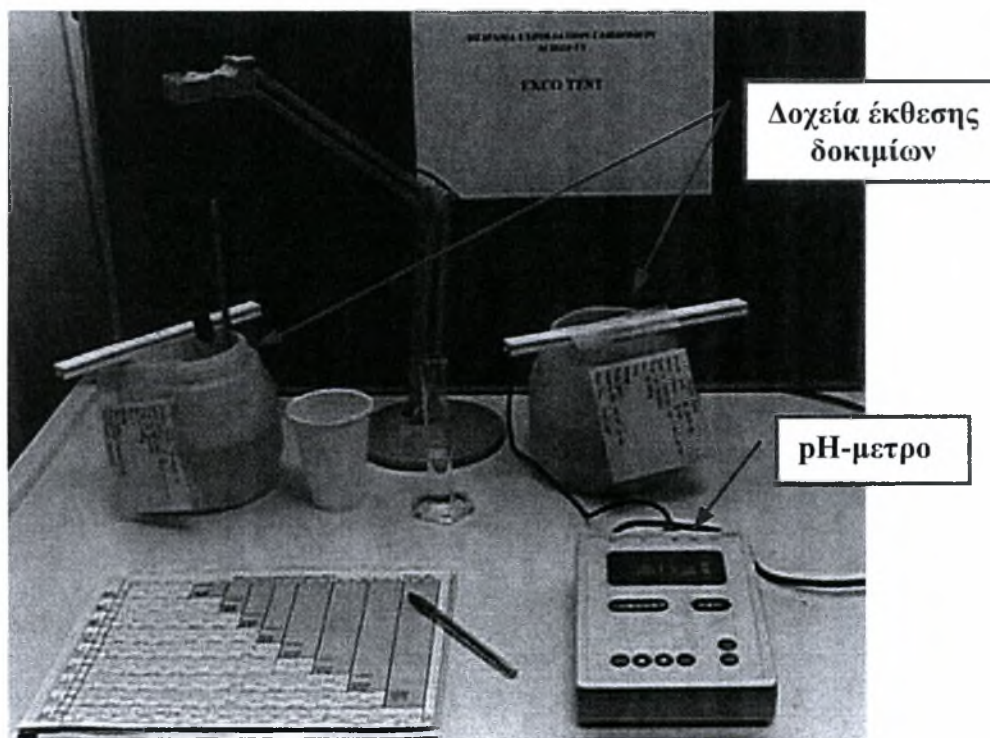
Για την έκθεση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχος προς τα δοκίμια αριθμός πλαστικών αδρανών δοχείων χωρητικότητας δύο λίτρων (2L).

Εφόσον ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του πειράματος, έγινε η παρασκευή του διαβρωτικού διαλύματος που αποτελείται από NaCl 4.0M, KNO<sub>3</sub> 0.5M και HNO<sub>3</sub> 0.1M. Για το λόγο αυτό, για κάθε δοκίμιο διαλύθηκαν 234g NaCl, 50g KNO<sub>3</sub> και 6.3mL συμπυκνωμένου HNO<sub>3</sub> (70% κ.β.) σε απιονισμένο νερό ώστε να παρασκευαστεί ποσότητα ενός λίτρου (1L) διαλύματος. Το παρασκευασθέν διάλυμα έχει οξύτητα (pH) 0.4. Η θερμοκρασία του διαλύματος καθόλη τη διάρκεια του πειράματος διατηρήθηκε σταθερή στους  $25 \pm 3^\circ\text{C}$ .

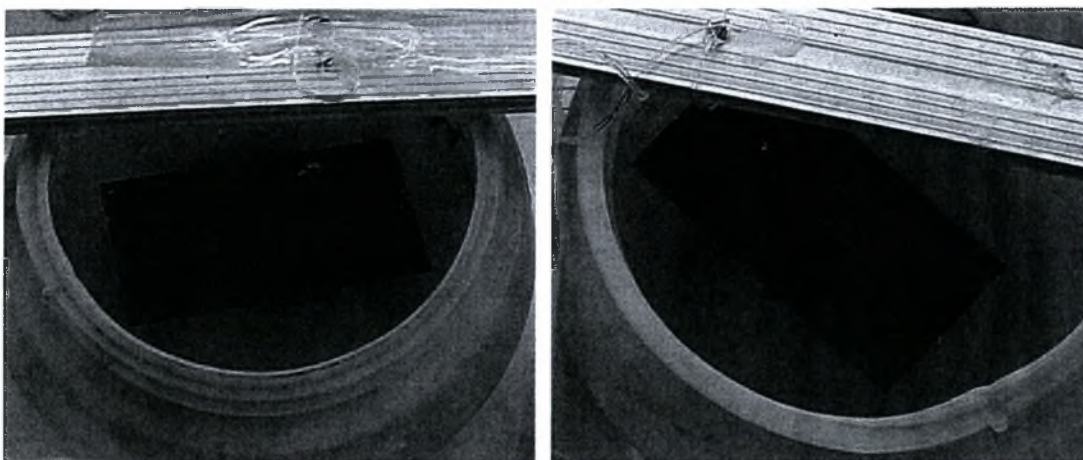
Τα δοκίμια εμβαπτίσθηκαν στο παρασκευασθέν διάλυμα αναρτημένα από πλαστική αδρανή ράβδο μέσω πλαστικού αδρανούς νήματος από την κορυφή του δοχείου, και σε οριζόντια θέση σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34-90 (παράγραφος 11.5) ώστε να ελαχιστοποιηθούν τυχόν απώλειες υλικού κατά τη διαβρωτική προσβολή της επιφάνειας. Η στάση του δοκιμίου εντός του διαβρωτικού διαλύματος προσέδωσε τη δυνατότητα διαχωρισμού και μελέτης της άνω και κάτω επιφάνειας του δοκιμίου ώστε να εντοπιστούν τυχόν διαφορές. Λεπτομέρειες φαίνονται στις φωτογραφίες των εικόνων 5-18 και 5-19.

Σημειώνεται ότι για την ποσότητα του ενός λίτρου (1L) παρασκευασθέντος διαλύματος για κάθε δοκίμιο, ελήφθη υπόψιν η καθορισθείσα από την προδιαγραφή ASTM G34-90, αναλογία όγκου διαλύματος προς συνολική επιφάνεια μετάλλου δοκιμίου,  $10 - 30\text{mL}/\text{cm}^2$ . Πράγματι, η αναλογία που τηρήθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν  $10\text{mL}/\text{cm}^2$ , που είναι σύμφωνα με την προαναφερθείσα προδιαγραφή.

Στη συνέχεια στα δοχεία τοποθετήθηκε κάλυμμα ώστε να περιοριστεί κατά το δυνατόν η εξάτμιση του υγρού. Επίσης σε κάθε δοχείο έκθεσης αναρτήθηκε ειδική καρτέλλα σήμανσης και ταυτότητας του δοκιμίου για σκοπούς αναγνώρισης και προς αποφυγή ευνόητων συναφών προβλημάτων.



**Εικόνα 5-18:** Διάταξη πειράματος επιταχυνόμενης διάβρωσης EXCO Test



**Εικόνα 5-19:** Ανάρτηση δοκιμίων σε πείραμα EXCO Test

Καθόλη τη διάρκεια της έκθεσης των δοκιμίων εφαρμόστηκε περιοδική καταγραφή της οξύτητας (pH) του διαλύματος ώστε να καθοριστεί η μεταβολή του κατά την εξέλιξη του πειράματος ως ενδεικτικό του αναπτυσσόμενου ρυθμού διάβρωσης της επιφάνειας του δοκιμίου. Στον πίνακα 5-11 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Η συλλογή των δοκιμίων έγινε αντίστοιχα μετά από 5, 8, 12, 16, 24, 36, 48, 72 και 96 ώρες έκθεσης, σύμφωνα με το εκπονηθέν χρονοδιάγραμμα της εικόνας 5-17. Το κάθε δοκίμιο αμέσως μετά την περισυλλογή του υπέστη χάραξη με το σύμβολο “\*\*” στην άνω δεξιά γωνία της άνω επιφάνειας, με εντυπωτική μεταλλική πόντα (stencil stamp). Έτσι κατέστη εφικτή η διάκριση της άνω επιφάνειας αυτού και του δόθηκε ο κωδικός “A5”, “A8”, “A12”, ..., “A96” ανάλογα με το χρόνο έκθεσής του, ώστε να είναι δυνατή η κωδικοποίηση-αναγνώρισή του ως δοκίμιο EXCO Test [11]. Ο λόγος για την χάραξη της επιφάνειας **μετά** την περισυλλογή του δοκιμίου, ήταν η αποφυγή δημιουργίας παραμενουσών τάσεων από παραμόρφωση στην επιφάνεια καθώς και η αποφυγή μεταφοράς και της παραμικρής ακαθαρσίας-ξένου σώματος στην επιφάνεια του δοκιμίου που ενδεχομένως να επηρέαζε την διάβρωση στην περιοχή. Σε συνδυασμό με τη συνοδευτική καρτέλλα διασφαλίστηκε η αποφυγή οποιασδήποτε δυσχέρειας στην αναγνώριση της ταυτότητας του δοκιμίου.

Πίνακας 5-11: Τιμές pH διαβρωτικού διαλύματος σε πείραμα EXCO Test

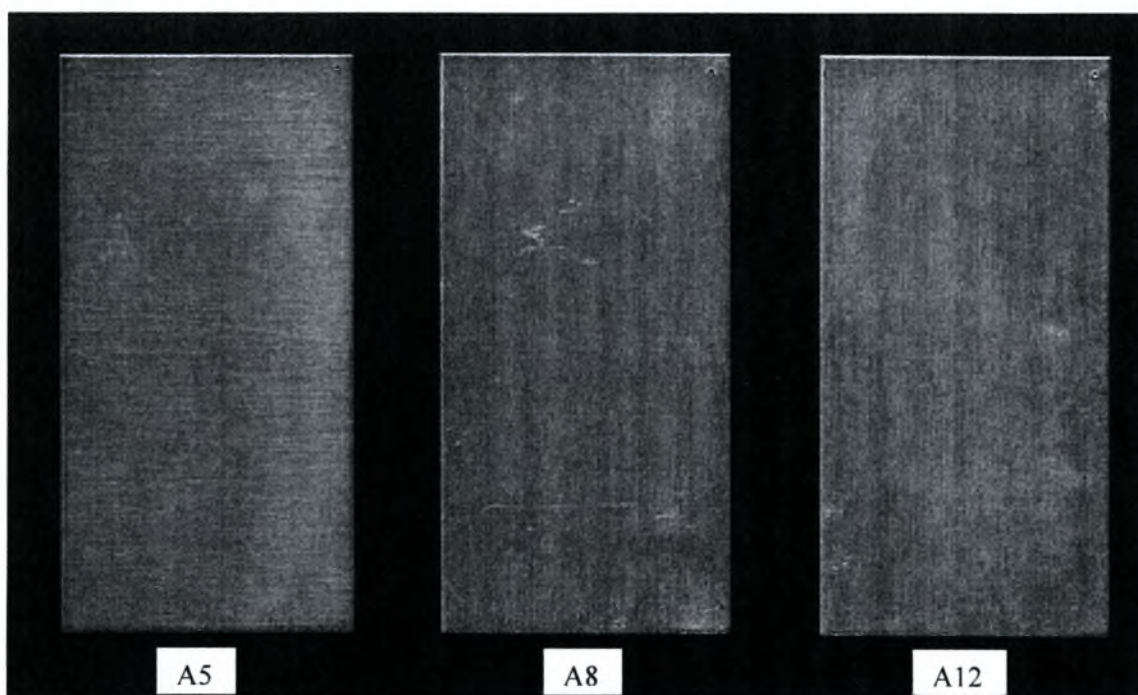
		ΩΡΕΣ ΕΚΘΕΣΗΣ																											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	20	24	28	32	36	40	44	48	56	64	72	80	88	96	
ΔΟΚΙΜΙΑ																													
A5	0.400	0.420	0.440	0.440	0.450	0.460																							
A8	0.400	0.400	0.430	0.430	0.450	0.450	0.460	0.480	0.500	0.500																			
A12	0.400	0.400	0.430	0.440	0.450	0.480	0.490	0.500	0.540	0.540	0.590	0.640																	
A16	0.400	0.410	-	0.440	0.460	0.510	0.520	0.550	0.570	0.640	0.640	0.720	0.780	0.880															
A24	0.400	0.420	0.430	-	-	-	0.510	0.520	0.530	0.570	0.650	0.650	0.750	0.840	1.030	1.260													
A36	0.400	0.430	0.440	0.480	0.510	0.520	0.560	0.600	0.610	-	0.740	0.810	0.890	0.890	1.220	1.420	1.660	1.960	2.350										
A48	0.400	0.410	0.430	-	-	-	0.500	0.510	0.520	0.560	0.620	0.620	0.710	0.800	0.950	1.160	1.370	1.630	2.010	2.810	3.110	3.300							
A72	0.400	0.410	0.430	-	-	-	0.490	0.490	0.510	0.540	0.600	0.600	0.680	0.760	0.880	1.080	1.290	1.470	1.820	2.440	3.000	3.270	3.300	3.320	3.360				
A96	0.400	0.410	-	-	-	0.560	0.570	0.640	0.680	-	-	-	1.030	-	-	1.840	-	2.980	-	-	-	-	-	-	-	-	3.620	3.630	
M.O.	0.400	0.412	0.433	0.438	0.453	0.475	0.495	0.508	0.528	0.580	0.646	0.646	0.730	0.820	0.953	1.167	1.330	1.550	1.915	2.625	3.055	3.285	3.300	3.320	3.360	3.490	3.620	3.630	

Κατόπιν, κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε διαδικασία καθαρισμού, περαιτέρω μετρήσεων και μελέτης σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στην προδιαγραφή ASTM G1-90 που συνίστανται στα ακόλουθα:

α. Οπτική επιθεώρηση ώστε να πραγματοποιηθεί προκαταρκτική αξιολόγηση της κατάστασης του κάθε δοκιμίου πριν υποστεί οποιοδήποτε καθαρισμό. Όσο η επιφάνεια ήταν ακόμη υγρή, έγινε κατηγοριοποίηση της επιφάνειας του δοκιμίου βάσει της παρατηρούμενης διάβρωσης και τις οδηγίες της προδιαγραφής ASTM G34-90 [25].

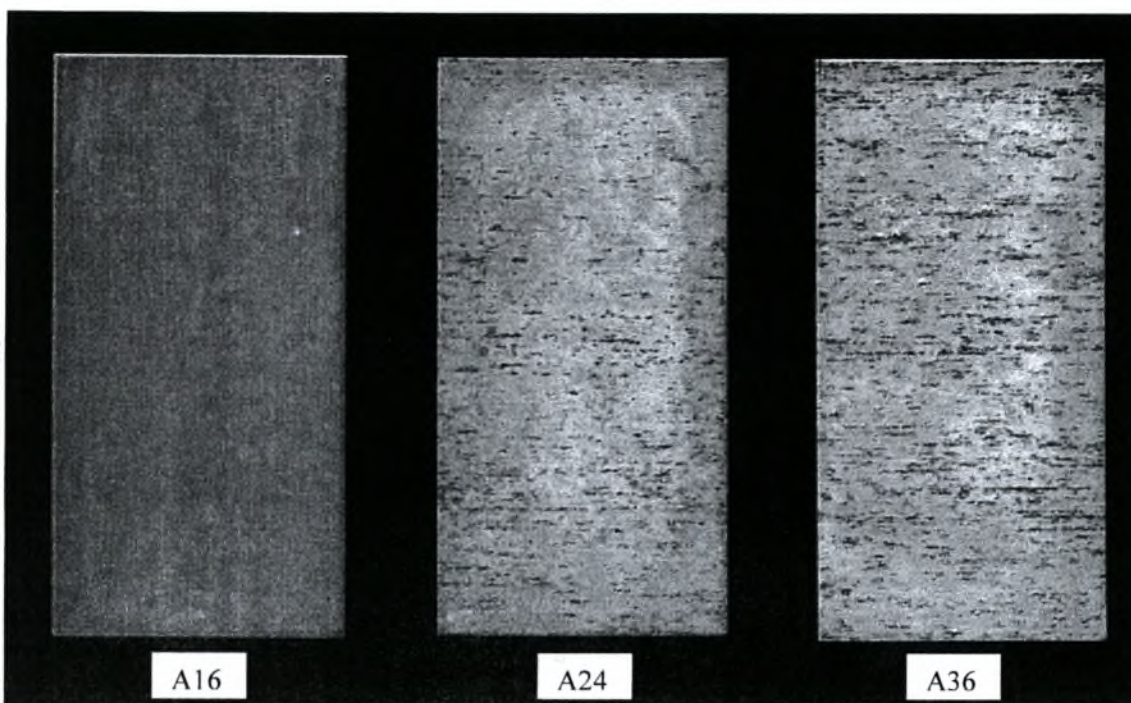
β. Καθαρισμός με εμβάπτιση σε απιονισμένο νερό. Ο σκοπός του καθαρισμού είναι η απομάκρυνση από την επιφάνεια του δοκιμίου υπολειμμάτων του διαβρωτικού διαλύματος χωρίς την απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης.

γ. Καθαρισμός με εμβάπτιση σε αραιό διάλυμα  $\text{HNO}_3$  8-10% κ.ο. στους  $20^\circ\text{C}$ - $25^\circ\text{C}$  για διάστημα 3 min και ελαφρά χρήση λεπτού, μαλακού πινέλου. Η επιλογή του μέσου καθαρισμού (διάλυμα  $\text{HNO}_3$  8-10% κ.ο.) και του χρόνου εμβάπτισης έγινε σύμφωνα με το Annex A1 της προδιαγραφής ASTM G1-90 (Procedure C.1.2). Αποτέλεσε το κύριο στάδιο καθαρισμού του δοκιμίου όπου επιδίωξη ήταν η απομάκρυνση μόνο των προϊόντων της διάβρωσης χωρίς να απομακρυνθεί μέταλλο βάσης. Ακολούθησε προσεκτική έκπλυση με απιονισμένο νερό. Κατόπιν, έγινε στέγνωμα του δοκιμίου σε ρεύμα θερμού αέρα και ζύγιση με αντίστοιχη καταγραφή της μεταβολής της μάζας. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε, σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στο Παράρτημα "B", μέχρι να απομακρυνθούν πλήρως τα προϊόντα της διάβρωσης. Τούτο επιβεβαιώθηκε οπτικά στο στερεοσκόπιο, όπου και έγινε φωτογράφιση της επιφάνειας του κάθε δοκιμίου. Κατά την τελική ζύγιση καταχωρήθηκε στο αντίστοιχο μητρώο του δοκιμίου η μάζα του μετά τον καθαρισμό από τα προϊόντα διάβρωσης.

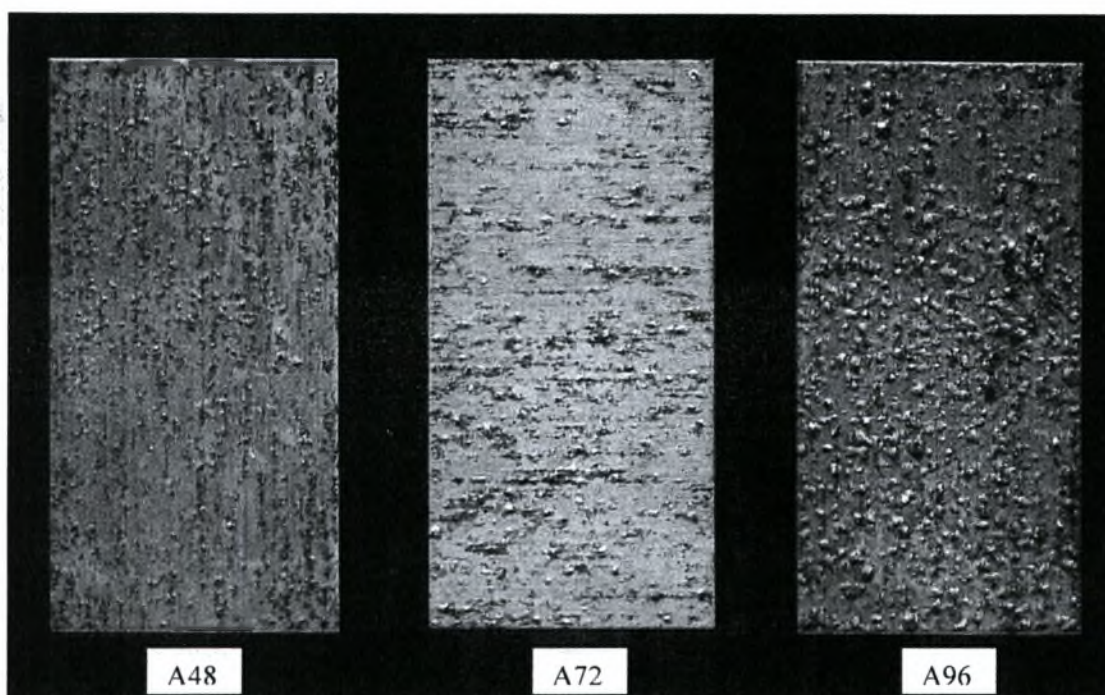


**Εικόνα 5-20α:** Δοκίμια EXCO Test A5, A8, A12 αμέσως μετά τον καθαρισμό τους





**Εικόνα 5-20β:** Δοκίμια EXCO Test A16, A24, A36 αμέσως μετά τον καθαρισμό τους



**Εικόνα 5-20γ:** Δοκίμια EXCO Test A48, A72, A96 αμέσως μετά τον καθαρισμό τους

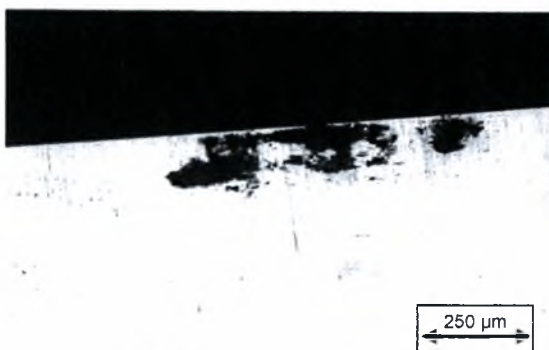
Λεπτομέρειες της στερεοσκοπίας των δοκιμίων δίδονται στο Παράρτημα “Ζ”.

Μετά την στερεοσκοπική εξέταση του κάθε δοκιμίου, εξετάστηκε μεταλλογραφικά τομή της διαβρωμένης επιφάνειας προκειμένου να εκτιμηθεί η μορφή και το βάθος της διαβρωτικής προσβολής, η έκτασή της και οι επιπτώσεις στη δομή του κράματος. Για το σκοπό αυτό, έγινε κοπή τμημάτων του δοκιμίου με ειδική συσκευή κοπής ακριβείας τύπου Minitom Struers και εγκιβωτισμός με χρήση ειδικής συσκευής εγκιβωτισμού στο κενό τύπου Eronac Struers.

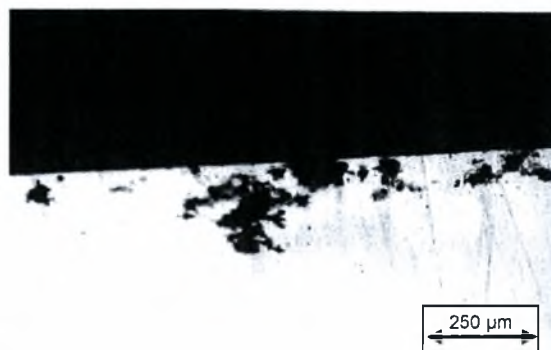
Τα εγκιβωτισμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε προσεκτική λείανση, στίλβωση και προσβολή με χημικό αντιδραστήριο Keller's (95ml απεσταγμένου H<sub>2</sub>O, 2.5ml HNO<sub>3</sub>, 1.0ml HF και 1.5ml HCl).

Το κάθε δοκίμιο προσβλήθηκε από το αντιδραστήριο για χρόνο περίπου 14 sec, και στην συνέχεια ξεπλύθηκε με απεσταγμένο H<sub>2</sub>O θερμοκρασίας 40-50°C. Τελικά εμβαπτίστηκε για χρόνο 2-3 sec σε HNO<sub>3</sub> (65%), πλύθηκε ξανά με άφθονο απεσταγμένο H<sub>2</sub>O και στεγνώθηκε με θερμό αέρα.

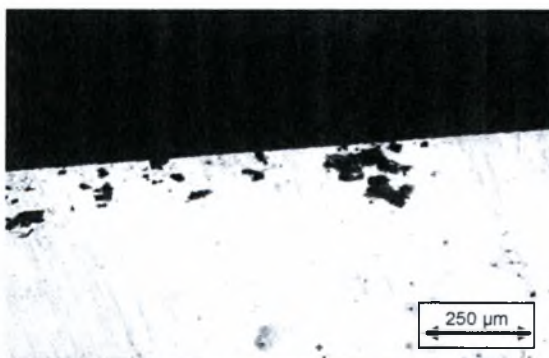
Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η αποκάλυψη της μεταλλογραφίας του υλικού ώστε αυτή να καταστεί ορατή στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Έγινε καταγραφή και φωτογράφιση των παρατηρήσεων προκειμένου να αξιοποιηθούν στην περαιτέρω ανάλυση και σχολιασμό. Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες παρουσιάζονται στις εικόνες 5-21α έως 5-21ι ακολούθως.



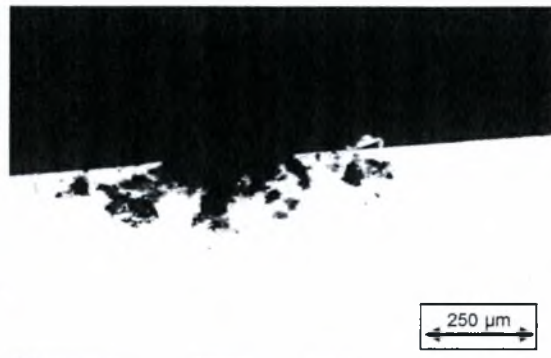
**Εικόνα 5-21α:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A5 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



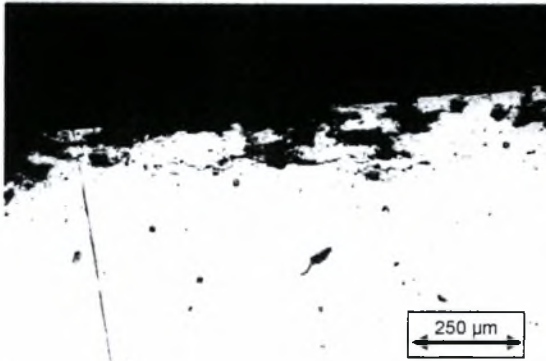
**Εικόνα 5-21β:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



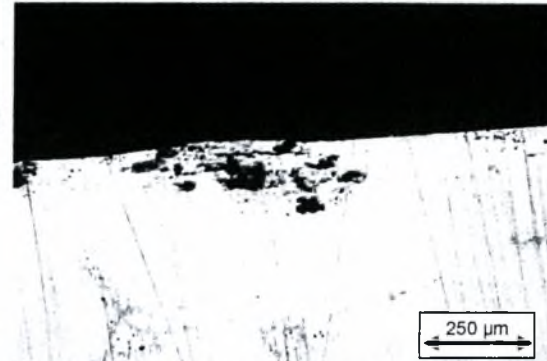
**Εικόνα 5-21γ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



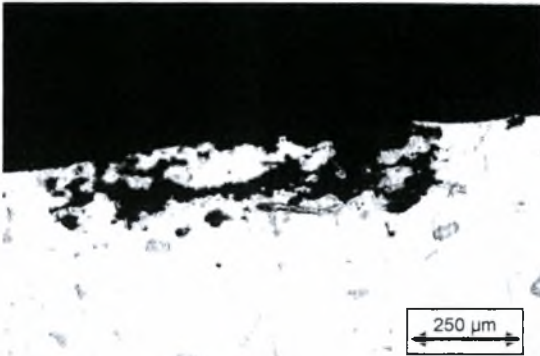
**Εικόνα 5-21δ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



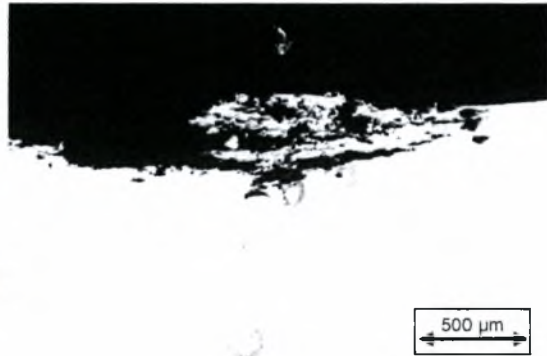
**Εικόνα 5-21ε:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



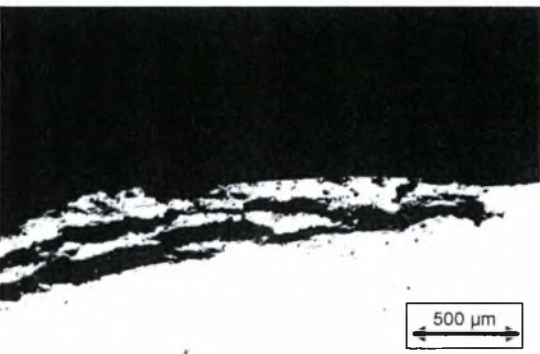
**Εικόνα 5-21στ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



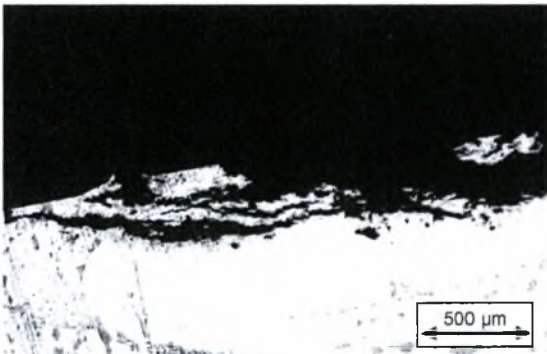
**Εικόνα 5-21ζ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A48 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.



**Εικόνα 5-21η:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα 5-21θ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα 5-21ι:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.

Περισσότερες λεπτομέρειες της μεταλλογραφικής εξέτασης και των παρατηρήσεων του κάθε δοκιμίου δίδονται στο Παράρτημα “Z”.

### 5.12.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η επιφάνεια των δοκιμίων μετά την περισυλλογή τους, χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34-90. Ο ακριβής χαρακτηρισμός των επιφανειών κάθε δοκιμίου φαίνεται στον πίνακα 5-12. Από τις πρώτες ώρες έκθεσης παρατηρήθηκε pitting corrosion που σταδιακά εξελίχθηκε σε περικρυσταλλική διάβρωση και τελικά σε έντονη διάβρωση αποφλοίωσης (exfoliation).

Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονται στον πίνακα 5-12 που ακολουθεί:

**Πίνακας 5-12:** Αποτελέσματα πειράματος EXCO Test AI 2024-Γ3. Συνολική διάρκεια πειράματος: 96 ώρες.

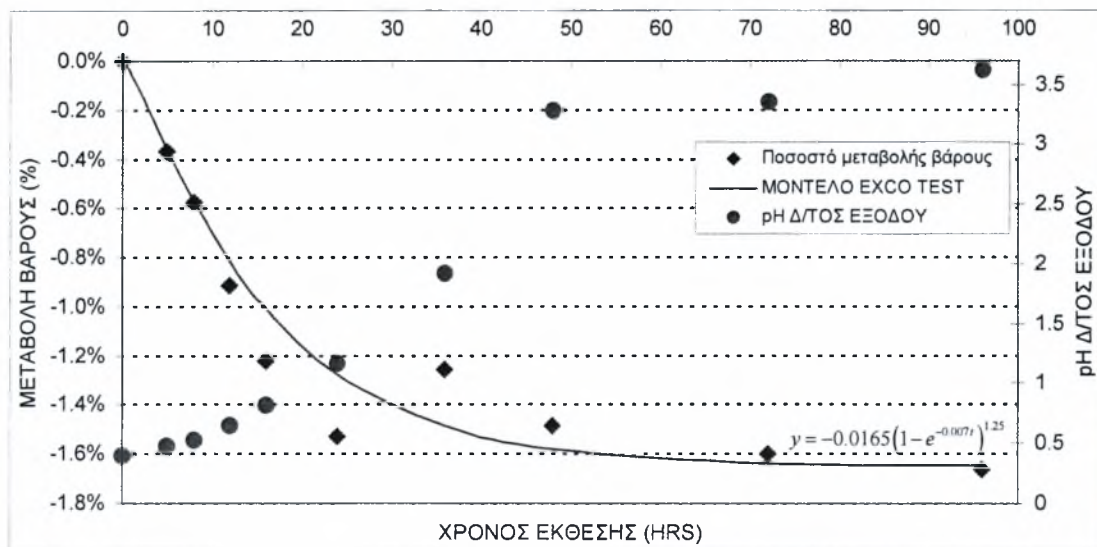
Δοκίμιο	Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Επιφάνεια Δοκίμιου (cm <sup>2</sup> )	Τιμή pH	Αύξηση pH (%)	Αρχικό Βάρος Δοκίμιου W <sub>0</sub>	Τελικό Βάρος Δοκίμιου W <sub>τελ</sub>	Μείωση Βάρους ΔW (gr)	Σχετική Μείωση Βάρους ΔW	Μεταβολή Βάρους ΔΜ/επιφάνεια (gr/cm <sup>2</sup> )	Κατηγοριοποίηση επιφάνειας (άνω/κάτω) (ASTM G34)	Ρυθμός Διάβρωσης (μm/y)
-	0	103.703	0.400	0	21.901	21.901	0	0	0	---	0
A5	5	103.703	0.475	18.75	21.901	21.821	0.080	0.00365	0.000771437	N/N	4882.79
A8	8	103.599	0.528	32.08	21.878	21.752	0.126	0.00576	0.001216231	N/P	4811.32
A12	12	103.653	0.646	61.50	21.890	21.690	0.200	0.00914	0.001929516	P/P	5088.68
A16	16	103.648	0.820	105.00	21.889	21.622	0.267	0.01220	0.002576015	P/P	5095.26
A24	24	103.843	1.167	191.67	21.932	21.597	0.335	0.01527	0.003226035	P/P	4253.98
A36	36	104.227	1.915	378.75	22.017	21.740	0.277	0.01258	0.002657674	EΔ/EΑ	2336.35
A48	48	103.667	3.285	721.25	21.893	21.568	0.325	0.01485	0.003135053	EΔ/EΑ	2067.01
A72	72	103.359	3.360	740.00	21.825	21.476	0.349	0.01560	0.003376567	EB/EB	1484.16
A96	96	102.967	3.630	807.50	21.738	21.377	0.361	0.01661	0.003505993	EB/EB	1155.79

Σημειώνεται ότι άλλες εργασίες παρέχουν αντίστοιχα στοιχεία κατηγοριοποίησης επιφάνειας σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34-90 που φαίνονται στον πίνακα 5-13 που ακολουθεί.

Πίνακας 5-13: Κατηγοριοποίηση επιφάνειας πειραμάτων EXCO TEST άλλων εργασιών.				
Εργαστήριο/Χώρα	Χρόνος έκθεσης	Υλικό	Κατηγοριοποίηση επιφάνειας	Προέλευση Στοιχείων - Βιβλιογραφική Αναφορά
Aerospatiale, Γαλλία	96hrs	Al 2024 T3	P/EA	Barbaux Y., "Proprietes des Alliages Al-Li" in <i>AGARD CP-444</i> , "New Light Alloys", NATO, pp. 8-1 - 8-18
	96hrs	Al 2024 T351	EB	
	96hrs	Al 2024 T3xx	ED	
NLR, Ολλανδία	4hrs	Al 2024 T3	N	Smith C.J.E., Gray J.A., Schra L., Boogers J.A.M., Braun R., Buhl H., Vaessen G., "Corrosion and Stress Corrosion of Aluminium -Lithium Alloys" in <i>AGARD CP-444</i> , "New Light Alloys", NATO, pp. 7-11, Table 7.
	8hrs	Al 2024 T3	N	
	24hrs	Al 2024 T3	N/E	
	48hrs	Al 2024 T3	E	
DFVLR, Γερμανία	24hrs	Al 2024 T3	N/P	Smith C.J.E., Gray J.A., Schra L., Boogers J.A.M., Braun R., Buhl H., Vaessen G., "Corrosion and Stress Corrosion of Aluminium -Lithium Alloys" in <i>AGARD CP-444</i> , "New Light Alloys", NATO, pp. 7-11, Table 8.
	48hrs	Al 2024 T3	P	
	72hrs	Al 2024 T3	P	
	96hrs	Al 2024 T3	P/EA	
Fokker, Ολλανδία	24hrs	Al 2024 T3	N	Smith C.J.E., Gray J.A., Schra L., Boogers J.A.M., Braun R., Buhl H., Vaessen G., "Corrosion and Stress Corrosion of Aluminium -Lithium Alloys" in <i>AGARD CP-444</i> , "New Light Alloys", NATO, pp. 7-12, Table 12.
	48hrs	Al 2024 T3	N	
	72hrs	Al 2024 T3	P	
	96hrs	Al 2024 T3	P	
NLR, Ολλανδία	3hrs	Al 2024 T351	E/EA	Smith C.J.E., Gray J.A., Schra L., Boogers J.A.M., Braun R., Buhl H., Vaessen G., "Corrosion and Stress Corrosion of Aluminium -Lithium Alloys" in <i>AGARD CP-444</i> , "New Light Alloys", NATO, pp. 7-13, Table 14.
	6hrs	Al 2024 T351	EA	
	24hrs	Al 2024 T351	EA	
	48hrs	Al 2024 T351	EA	
	96hrs	Al 2024-T351	EB/EC	

Από την σύγκριση των παραπάνω πινάκων προκύπτει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις μας όσον αφορά την κατάσταση της επιφάνειας των δοκιμίων είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών.

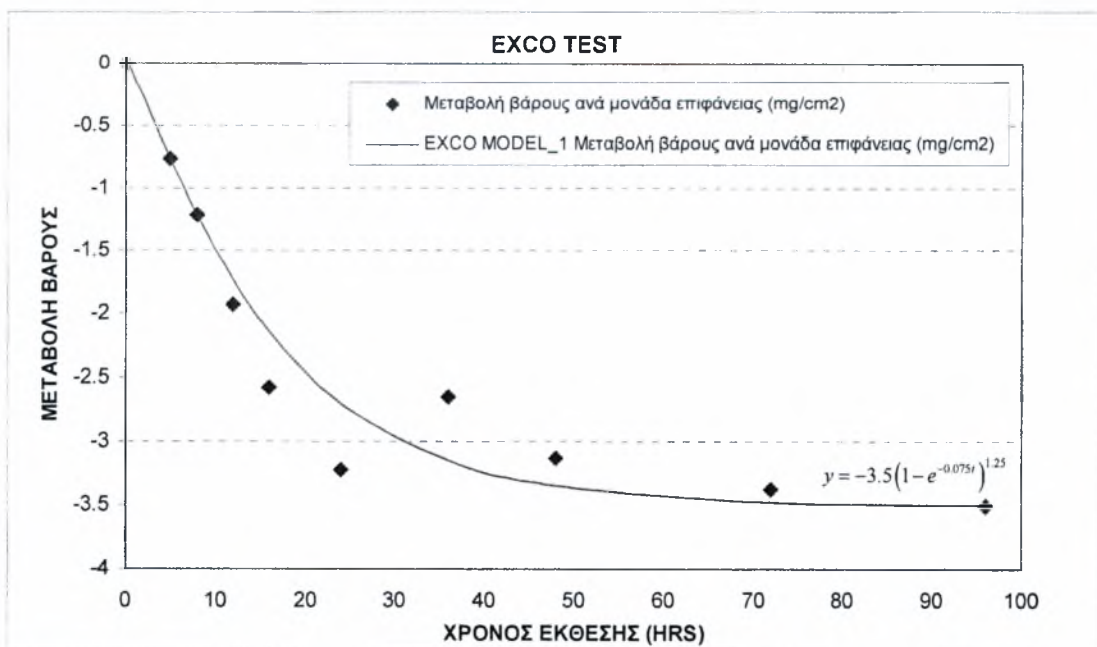
Στην εικόνα 5-22 απεικονίζεται το ποσοστό μεταβολής βάρους και η μεταβολή του pH του διαλύματος EXCO Test κατά την διάρκεια του πειράματος, όπως προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα.



**Εικόνα 5-22:** Μεταβολή βάρους δοκιμίων και μεταβολή pH του δ/τος με το χρόνο έκθεσης

Είναι χαρακτηριστικό ότι ο ρυθμός μεταβολής βάρους που εκφράζει και τον ρυθμό διάβρωσης είναι αρχικά υψηλός, σταδιακά όμως περιορίζεται και τελικά καθίσταται μικρός, σε προχωρημένα στάδια διάβρωσης. Ομοίως το pH του δ/τος ξεκινά από την προκαθορισμένη τιμή 0.4 και καταλήγει σε τιμές περίπου 3.2-3.4.

Στην εικόνα 5-23 απεικονίζεται η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας κατά την διάρκεια του πειράματος. Φαίνεται ο υψηλός αρχικός ρυθμός διάβρωσης, ο οποίος σταδιακά φθίνει και γίνεται πολύ μικρός σε προχωρημένα στάδια διάβρωσης.



**Εικόνα 5-23:** Μεταβολή βάρους δοκιμίου ανά μονάδα επιφάνειας με το χρόνο έκθεσης

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις το μαθηματικό μοντέλο που προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα και εκφράζει το φαινόμενο της διάβρωσης EXCO Test είναι της γενικής μορφής:

$$y = -k_1(1 - e^{-k_2 t})^{k_3}$$

όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας σε ( $mg/cm^2$ )

$t$  είναι ο χρόνος σε μήνες και

$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την γεωμετρία του.

Πράγματι από την εικόνα 5-22 προκύπτει ότι τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

$$y = -0.0165(1 - e^{-0.007t})^{1.25}$$

το οποίο εκφράζει την ποσοστιαία μεταβολή βάρους των δοκιμίων στο πείραμα EXCO Test μετά τον καθαρισμό τους σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$  έκθεσης σε ώρες.

Αντίστοιχα από την εικόνα 5-23 προκύπτει ότι τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

$$y = -3.5(1 - e^{-0.075t})^{1.25}$$

το οποίο εκφράζει την μεταβολή βάρους των δοκιμίων ανά μονάδα επιφάνειας στο πείραμα EXCO Test σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$  έκθεσης σε ώρες. Εισάγοντας στη σχέση την πυκνότητα του Al 2024T3 ( $\rho_{Al2024T3} = 2768 mg/cm^3$ ), ώστε να απεικονιστεί η επίδραση του υλικού, η σχέση διαμορφώνεται:

$$y = -3.5(1 - e^{-0.075t})^{1.25} = -1.265 \times 10^{-3} \times \rho_{Al2024T3} \times (1 - e^{-0.075t})^{1.25}$$

Βάσει της τελευταίας σχέσης, η αναμενόμενη απώλεια μάζας για τα διαστήματα έκθεσης φαίνονται στον πίνακα 5-14 μαζί με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές και τις αποκλίσεις που σημειώνονται.

**Πίνακας 5-14:** Σύγκριση Μοντέλου και Πειραματικών Δεδομένων

Ωρες έκθεσης	0	5	8	12	16	24	36	48	72	96
Μοντέλο	0	0,818	1,294	1,823	2,236	2,792	3,208	3,381	3,480	3,497
Πείραμα	0	0,771	1,216	1,930	2,576	3,226	2,657	3,135	3,376	3,506
Απόκλιση (%)	0	5,75	6,03	5,84	15,20	15,53	17,17	7,27	2,98	-0,26

Οι παραπάνω αποκλίσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μαθηματικό μοντέλο απεικονίζει σε ικανοποιητικό βαθμό το φυσικό φαινόμενο και συνεπώς θεωρείται αρκετά αξιόπιστο.

Είναι αξιοσημείωτο τέλος, ότι σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34-90 δοκίμια των οποίων η επιφάνεια μετά από 48hrs έκθεσης κατηγοριοποιήθηκαν ως EA ή P, δεν ανέπτυξαν παρά μόνο αρχικά στάδια διάβρωσης αποφλοίωσης (exfoliation) μετά από έξι (6) έως εννέα (9) έτη φυσικής έκθεσης σε παραθαλάσσια ατμόσφαιρα. Αντίστοιχα δοκίμια που επέδειξαν επιφάνεια κατηγορίας ED στις περισσότερες περιπτώσεις ανέπτυξαν σοβαρή διάβρωση αποφλοίωσης (exfoliation) εντός ενός (1) έτους φυσικής έκθεσης σε παραθαλάσσια ατμόσφαιρα.[25].

### 5.12.3 MODIFIED EXCO TEST - ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε η πειραματική μέθοδος επιταχυνόμενης διάβρωσης σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34 (EXCO Test) χρησιμοποιείται ευρύτατα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς κραμάτων της σειράς 2XXX και 7XXX σε διάβρωση και ειδικότερα σε διάβρωση αποφλοΐωσης μετά από μακροχρόνια έκθεση σε παραθαλάσσιο ή παρόμοιας έντασης διαβρωτικότητας περιβάλλον.

Έχει αναφερθεί από τους S. Lee και B.W. Liffka [26] και από τον R.Braun [27] ότι η πράξη και η εμπειρία απέδειξαν ότι η πειραματική μέθοδος EXCO Test δεν προβλέπει με ακρίβεια την αντίσταση σε διάβρωση των κραμάτων Al 2024 και 2090. Για την αντιμετώπιση της κατάστασης αυτής εκπονήθηκε μια σειρά πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με φυσικά διαβρωμένα δοκίμια, προκειμένου να υποδειχθεί μια πειραματική μέθοδο επιταχυνόμενης διάβρωσης που να παρέχει περισσότερο αξιόπιστα και ρεαλιστικά συμπεράσματα. Με βάση την εργασία των Lee και Liffka [26], η διαβρωτική συμπεριφορά φυσικά διαβρωμένου κράματος Al 2024-T3 εκτεθειμένου για δύο(2) έτη σε παραθαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να προσομοιωθεί αρκετά αξιόπιστα με μια τροποποιημένη πειραματική μέθοδο EXCO Test που ονομάζεται Modified EXCO Test.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται κατά κύριο λόγο στην προδιαγραφή ASTM G34 (EXCO Test) με τη διαφορά ότι τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαφορετικής σύστασης διαβρωτικό διάλυμα και σε διαφορετική θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, προτάθηκε ένα διάλυμα που αποτελείται από 600mg/L αλουμίνιο, 4.0M(142g/L) χλώριο και 0.6M(37.2g/L) νιτρικό άλας με οξύτητα (pH) 3.2 σε θερμοκρασία 52°C.

Αν και η μέθοδος δεν αποτελεί προδιαγραφή για διεξαγωγή πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης, έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης εξέτασης [27]. Αποφασίστηκε επομένως η εφαρμογή μιας σειράς πειραμάτων προκειμένου να υπάρξουν συγκρίσιμα αποτελέσματα με τις υπόλοιπες μεθόδους αλλά και με τα φυσικά διαβρωμένα δοκίμια κατ' αναλογία με την εργασία των S. Lee και B.W. Liffka [26].

#### Προετοιμασία των Δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή πειραμάτων Modified EXCO Test χρησιμοποιήθηκαν δέκα (10) δοκίμια από φύλλο Al 2024-T3 πάχους 1.6mm προδιαγραφής QQ-A-250/4, που διατέθηκαν από την εταιρεία EAB AE αφού κόπηκαν σε μορφή παραλληλογράμμου με διαστάσεις 100mm×50mm. Οι ακμές των δοκιμίων υπέστησαν κατάλληλη μηχανουργική κατεργασία λείανσης ώστε να αφαιρεθούν τυχόν ανωμαλίες των ακμών καθώς και τυχόν εναπομείνουσες τάσεις από την κοπή των δοκιμίων.

Στη συνέχεια τα δοκίμια υπέστησαν κατάλληλη προετοιμασία σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G1-90. Έτσι τα δοκίμια αφού καθαρίστηκαν με αιθυλική αλκοόλη και πλύθηκαν με απιονισμένο νερό προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες, εκτέθηκαν σε ρεύμα ζεστού αέρα για να στεγνώσουν.

Ακολούθως έγινε επιβεβαίωση των διαστάσεών τους και ζύγιση καθενός ξεχωριστά σε ζυγό ακριβείας Tare Model 300 (Denver Instrument Company DE Series) ακριβείας 0.001g (βλέπε Παράρτημα Α) του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Όλες οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε ειδικό μητρώο που δημιουργήθηκε για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, κατά τρόπο ανάλογο του EXCO Test. Πρότυπο μητρώο παρατίθεται στην εικόνα 5-24.



<b>ΜΗΤΡΩΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MODIFIED EXCO TEST</b>	
ΔΟΚΙΜΙΟ Νο :	Υλικό: ΑΙ 2024-Τ3
Τόπος Πειράματος: Παν. Θεσσαλίας Τμ. Μηχ/γων	
Διάρκεια Έκθεσης :	
Ημ/νία Έναρξης Έκθεσης:	Ωρα:
Ημ/νία Πέρατος Έκθεσης:	Ωρα:
Αρχικό Βάρος $W_0$ :	pH δ/τος σε Έναρξη:
Τελικό Βάρος $W_{ελ}$ :	pH δ/τος σε Πέρας:
Επιφάνεια Έκθεσης Δοκιμίου:	
(Όγκος δ/τος)/(Επιφάνεια Έκθεση Δοκιμίου) :	
Συμβολισμός Άνω Επιφανείας Δοκιμίου :	
Χαρακτηρισμός Άνω Επιφανείας Δοκιμίου :	
(βάσει ASTM G34)	
Χαρακτηρισμός Κάτω Επιφανείας Δοκιμίου :	
(βάσει ASTM G34)	
<b>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:</b>	

**Εικόνα 5-24:** Πρότυπο Μητρώο Δοκιμίου Πειράματος Modified Exco Test

Το σύνολο των δοκιμών υπέσκει χάραξη με χρήση ειδικού εργαλείου εγχάραξης (vibroreen) ώστε αφενός να είναι δυνατή η κωδικοποίηση-αναγνώρισή τους, αφετέρου δε να είναι εφικτή η διάκριση της άνω επιφάνειας αυτών. Συγκεκριμένα σε κάθε ένα δοκίμιο εγχάραχθηκε στην άνω δεξιά γωνία της άνω επιφάνειας ως κωδικός αναγνώρισης το σύμβολο “M1”, “M2”, “M3”.....“M10” ανάλογα με την προγραμματισμένη σειρά συλλογής του κατά τη διεξαγωγή του πειράματος διάβρωσης [11]. Σε συνδυασμό με τη συνοδευτική καρτέλλα-μητρώο κάθε δοκιμίου διασφαλίστηκε η αποφυγή οποιασδήποτε δυσχέρειας στην αναγνώριση της ταυτότητας του δοκιμίου.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας λόγω του αυστηρά ελεγχόμενου περιβάλλοντος ως προς την θερμοκρασία και την υγρασία.

Η διάρκεια του πειράματος Modified EXCO Test καθορίστηκε σε 96 ώρες για λόγους σύγκρισης με τα αποτελέσματα του EXCO Test (σύμφωνα με προδιαγραφή ASTM G34), καθ’ υπέρβαση των αναφερομένων στην εργασία των S. Lee και B.W. Lifka [26] ότι για κράματα αλουμινίου της σειράς 2XXX (2024, 2090), η χρονική διάρκεια των 48 ωρών (hrs) θεωρείται αρκετή για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Κατά το χρονικό διάστημα αυτό, προγραμματίστηκε η περιοδική παρατήρηση των εμβαπτισμένων δοκιμίων, η μέτρηση και καταγραφή της τιμής του pH του διαβρωτικού διαλύματος κάθε δοκιμίου και η περισυλλογή ενός δοκιμίου σε χρονικά διαστήματα, που καθορίστηκαν κατ’ αναλογία προς την προδιαγραφή ASTM G34, για περαιτέρω μελέτη και επεξεργασία προκειμένου να αντληθούν στοιχεία για την πορεία της διάβρωσης και τη συμπεριφορά του μετάλλου. Το χρονοδιάγραμμα που εκπονήθηκε για την παρακολούθηση της εξέλιξης του πειράματος παρατίθεται στην εικόνα 5-25.

# ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΛΟΓΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΙ 2024-T3 MODIFIED EXCO TEST

ID	Task Name	Duration	Date				
			Fri 29 May	Sat 30 May	Sun 31 May	Mon 1 Jun	Tue 2 Jun
1	Εντοξη Πειράματος Modified EXCO Test	0 hrs	◆ 29/5				
2	Έκθεση Δοκιμίου M1	2 hrs	■				
3	Έκθεση Δοκιμίου M2	5 hrs	■				
4	Έκθεση Δοκιμίου M3	8 hrs	■				
5	Έκθεση Δοκιμίου M4	12 hrs	■				
6	Έκθεση Δοκιμίου M5	16 hrs	■				
7	Έκθεση Δοκιμίου M6	24 hrs	■				
8	Έκθεση Δοκιμίου M7	36 hrs	■				
9	Έκθεση Δοκιμίου M8	48 hrs	■				
10	Έκθεση Δοκιμίου M9	72 hrs	■				
11	Έκθεση Δοκιμίου M10	96 hrs	■				
12	Τέρας Έκθεσης Δοκιμίων Πειράματος Modified EXCO Te	0 hrs	◆ 2/6				

**Project: MODIFIED EXCO Test**  
Date: Thu 7/7/05

Task

Split

Progress

Milestone

Summary

External Tasks

External Milestone

Deadline

Για την έκθεση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχος προς τα δοκίμια αριθμός πλαστικών αδρανών δοχείων χωρητικότητας δύο(2) L τα οποία τοποθετήθηκαν σε ειδική συσκευή-δεξαμενή (βλέπε Παράρτημα “Α”) ρυθμιζόμενη ως προς την διατήρηση της θερμοκρασίας του διαβρωτικού διαλύματος σε προεπιλεγμένα επιθυμητά επίπεδα.

Εφόσον ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του πειράματος, έγινε η παρασκευή του διαβρωτικού διαλύματος ώστε να περιέχει σύμφωνα με την εργασία των S. Lee και B.W. Lifka [26]  $600\text{mg/L}$  αλουμίνιο,  $4.0\text{M}$  ( $142\text{g/L}$ ) χλώριο και  $0.6\text{M}$  ( $37.2\text{g/L}$ ) νιτρικό άλας με οξύτητα (pH) 3.2 σε θερμοκρασία  $25^\circ\text{C}$ . Για το λόγο αυτό, για κάθε δοκίμιο διαλύθηκαν  $2.96\text{g/L}$   $\text{AlCl}_3$ ,  $230\text{g/L}$   $\text{NaCl}$  και  $60.7\text{g/L}$   $\text{KNO}_3$  σε απιονισμένο νερό θερμοκρασίας  $52^\circ\text{C}$ , ώστε να παρασκευαστεί ποσότητα 0.75 L διαλύματος ανά δοκίμιο. Η θερμοκρασία του διαλύματος καθόλη τη διάρκεια του πειράματος διατηρήθηκε, μέσω της προαναφερόμενης ειδικής συσκευής-δεξαμενής, σταθερή στους  $52 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν στο παρασκευασθέν διάλυμα αναρτημένα από πλαστική αδρανή ράβδο μέσω πλαστικού αδρανούς νήματος από την κορυφή του δοχείου, και σε οριζόντια θέση ώστε να ελαχιστοποιηθούν τυχόν απώλειες υλικού κατά τη διαβρωτική προσβολή της επιφάνειας. Η στάση του δοκιμίου προσέδωσε τη δυνατότητα διαχωρισμού και μελέτης της άνω και κάτω επιφάνειας του δοκιμίου ώστε να εντοπιστούν τυχόν διαφορές.

Σημειώνεται ότι η παρασκευή ποσότητας 0.75 L διαλύματος για κάθε δοκίμιο, αποσκοπεί στη διατήρηση της αναφερόμενης στην εργασία των S. Lee και B.W. Lifka [26], αναλογίας όγκου διαλύματος προς συνολική επιφάνεια μετάλλου δοκιμίου,  $15\text{mL}/\text{cm}^2$ .

Στη συνέχεια στα δοχεία τοποθετήθηκε κάλυμμα ώστε να περιοριστεί κατά το δυνατόν η εξάτμιση του υγρού.

Παράλληλα σε κάθε δοχείο έκθεσης αναρτήθηκε ειδική καρτέλλα σήμανσης και ταυτότητας του δοκιμίου για σκοπούς αναγνώρισης και προς αποφυγή ευνόητων συναφών προβλημάτων.

Καθόλη τη διάρκεια της έκθεσης των δοκιμών εφαρμόστηκε περιοδική καταγραφή του pH του διαλύματος ώστε να καθοριστεί η μεταβολή του κατά την εξέλιξη του πειράματος ως ενδεικτικό του αναπτυσσόμενου ρυθμού διάβρωσης της επιφάνειας του δοκιμίου. Στον πίνακα 5-15 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

**Πίνακας 5-15:** Τιμές pH διαβρωτικού διαλύματος στο πέφραμα Modified EXCO Test AI 2024-T3 σε θερμοκρασία 52°C

ΔΟΚΙΜΙΑ	ΩΡΕΣ ΕΚΘΕΣΗΣ																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	20	24	28	32	36	44	48	68	72	96	
M1	2,440	2,380	2,380																					
M2	2,440	-	2,280	2,300	2,320	2,380																		
M3	2,440	2,240	2,260	2,340	2,270	2,320	2,340	2,370	2,400															
M4	2,440	-	-	-	-	-	-	-	2,360	2,340	2,340													
M5	2,440	-	2,280	2,330	2,330	2,360	-	-	-	-	-	2,300	2,290											
M6	2,440	-	2,270	2,320	2,330	2,360	-	-	-	-	-	2,300	2,290	2,240	2,240									
M7	2,440	2,260	2,290	2,320	2,250	2,320	2,330	2,340	2,440	2,380	-	-	-	-	2,450	2,430	2,440	2,390						
M8	2,440	-	2,270	2,300	2,350	2,380	-	-	-	-	-	2,330	2,300	2,270	2,300	2,320	-	-	2,360	2,410				
M9	2,440	2,360	2,350	2,360	-	2,400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,480	2,440		
M10	2,440	2,370	2,350	2,350	-	2,430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,480	2,480		
M.O.	2,440	2,322	2,303	2,328	2,308	2,369	2,335	2,355	2,400	2,360	2,340	2,310	2,293	2,255	2,330	2,375	2,440	2,390	2,360	2,410	2,480	2,460	2,530	2,530

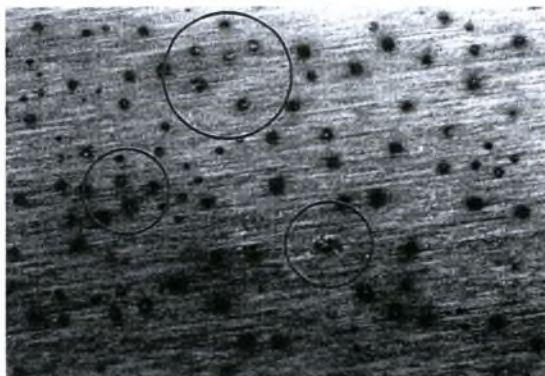
Η συλλογή των δοκιμίων έγινε μετά από 2, 5, 8, 12, 16, 24, 36, 48, 72 και 96 ώρες έκθεσης σύμφωνα με το εκπονηθέν χρονοδιάγραμμα του σχήματος 5-25.

Κατόπιν, κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε διαδικασία καθαρισμού, περαιτέρω μετρήσεων και μελέτης σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στην προδιαγραφή ASTM G1-90 που συνίσταται στα ακόλουθα:

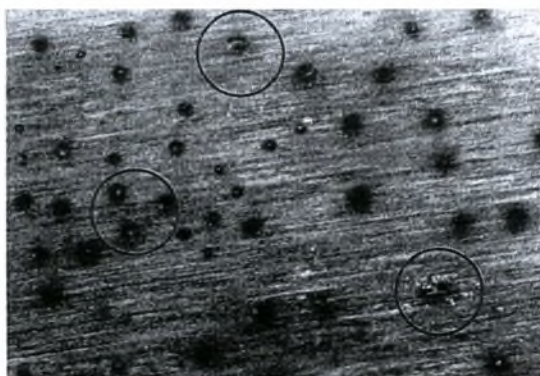
α. Οπτική επιθεώρηση ώστε να πραγματοποιηθεί προκαταρκτική αξιολόγηση της κατάστασης του κάθε δοκιμίου πριν υποστεί οποιοδήποτε καθαρισμό. Στα πλαίσια αυτά και όσο η επιφάνεια ήταν ακόμη υγρή, έγινε κατηγοριοποίηση της επιφάνειας του δοκιμίου με βάση την παρατηρούμενη διάβρωση και τις οδηγίες της προδιαγραφής ASTM G34 (N, P, EA – ED) [25] για λόγους σύγκρισης με τα υπόλοιπα πειράματα επιταχυνόμενης και φυσικής διάβρωσης.

β. Καθαρισμός με εμβάπτιση σε απιονισμένο νερό. Ο σκοπός του αρχικού αυτού σταδίου καθαρισμού ήταν η απομάκρυνση από την επιφάνεια του δοκιμίου υπολειμμάτων του διαβρωτικού διαλύματος χωρίς την απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης.

γ. Καθαρισμός με εμβάπτιση σε αραιό διάλυμα  $\text{HNO}_3$  8-10% κ.ο. στους  $20^\circ\text{C}$ - $25^\circ\text{C}$  για διάστημα 3 min και ελαφρά χρήση λεπτού, μαλακού πινέλου. Η επιλογή του μέσου καθαρισμού (διάλυμα  $\text{HNO}_3$  8-10% κ.ο.) και του χρόνου εμβάπτισης έγινε σύμφωνα με το Annex A1 της προδιαγραφής ASTM G1-90 (Procedure C.1.2). Αποτέλεσε το κύριο στάδιο καθαρισμού του δοκιμίου όπου επιδίωξη ήταν η απομάκρυνση μόνο των προϊόντων της διάβρωσης χωρίς να απομακρυνθεί μέταλλο βάσης. Ακολούθησε προσεκτική έκπλυση με απιονισμένο νερό. Κατόπιν, έγινε στέγνωμα του δοκιμίου σε ρεύμα θερμού αέρα και ζύγιση με αντίστοιχη καταγραφή της μεταβολής της μάζας. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε, σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στο Παράρτημα “B”, μέχρι να απομακρυνθούν πλήρως τα προϊόντα της διάβρωσης. Τούτο επιβεβαιώθηκε οπτικά στο στερεοσκόπιο, όπου και έγινε φωτογράφιση της επιφάνειας του κάθε δοκιμίου. Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες της στερεοσκοπικής εξέτασης των δοκιμίων φαίνονται στις εικόνες 5-26α έως 5-26ιθ. Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στο Παράρτημα “H”. Κατά την τελική ζύγιση καταχωρήθηκε η μάζα του δοκιμίου μετά τον καθαρισμό από τα προϊόντα διάβρωσης.



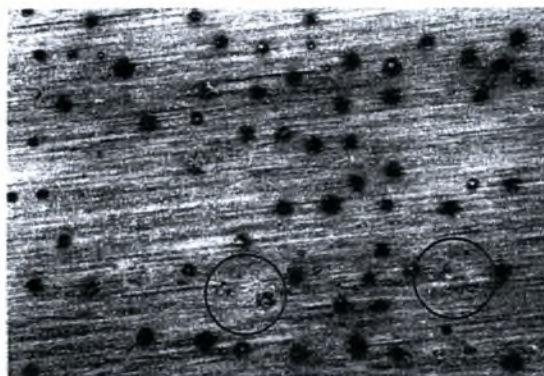
**Εικόνα 5-26α:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες. Αρχή σημειακής διάβρωσης (pitting).



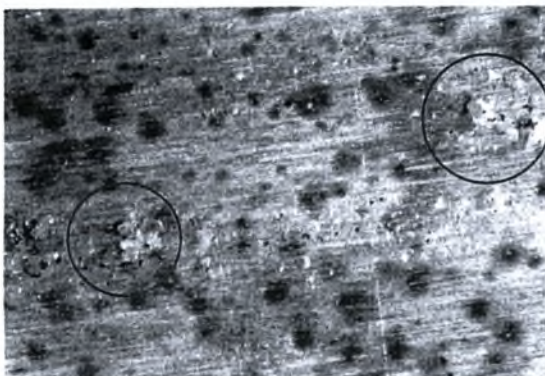
**Εικόνα 5-26β:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες. Αρχή σημειακής διάβρωσης (pitting).



**Εικόνα 5-26γ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες. Σημειακή διάβρωση και αρχή exfoliation.



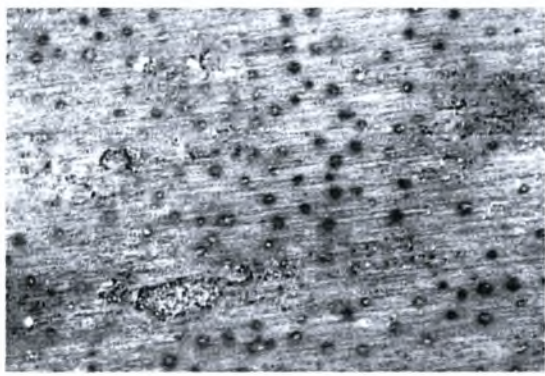
**Εικόνα 5-26δ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες. Σημειακή διάβρωση και αρχή exfoliation.



**Εικόνα 5-26ε:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες. Σημειακή διάβρωση και exfoliation.



**Εικόνα 5-26στ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες. Διάβρωση αποφλοιώσης (exfoliation).



**Εικόνα 5-26ζ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες. Διάβρωση αποφλοιώσης (exfoliation).



**Εικόνα 5-26η:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες. Διάβρωση αποφλοιώσης (exfoliation).



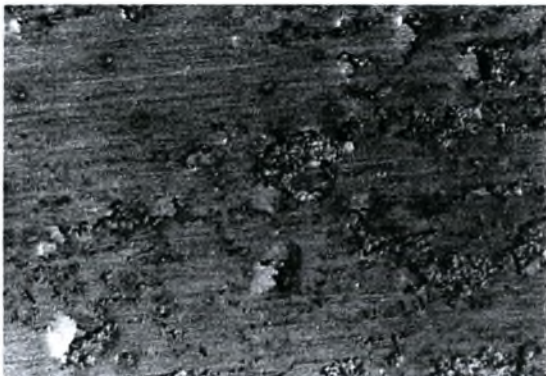
**Εικόνα 5-260:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα 5-26ι:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες. Διάβρωση αποφλοιώσης (exfoliation) και γέννηση pit.



**Εικόνα 5-26ια:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα 5-26ιβ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα 5-26ιγ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες. Exfoliation.



**Εικόνα 5-26ιδ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες. Exfoliation.



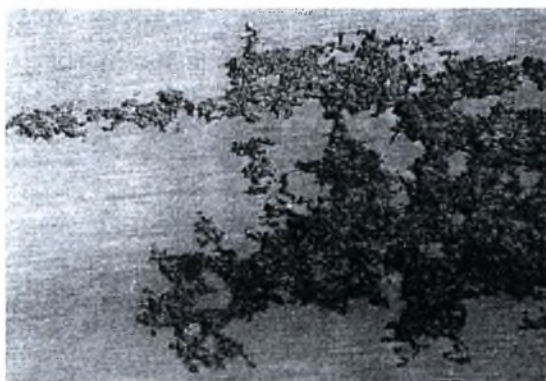
**Εικόνα 5-26ιε:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα 5-26ιστ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα 5-26ιζ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα 5-26ιη:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα 5-26ιθ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.

Μετά την στερεοσκοπική εξέταση του δοκιμίου, εξετάστηκε μεταλλογραφικά τομή της διαβρωμένης επιφάνειας προκειμένου να εκτιμηθεί η μορφή και το βάθος της διαβρωτικής προσβολής, η έκτασή της και οι επιπτώσεις στη δομή του κράματος. Για το σκοπό αυτό έγινε κοπή τμημάτων του διαβρωμένου δοκιμίου με ειδική συσκευή κοπής ακριβείας τύπου Minitom Struers και εγκιβωτισμός με χρήση ειδικής συσκευής εγκιβωτισμού στο κενό τύπου Eponac Struers.



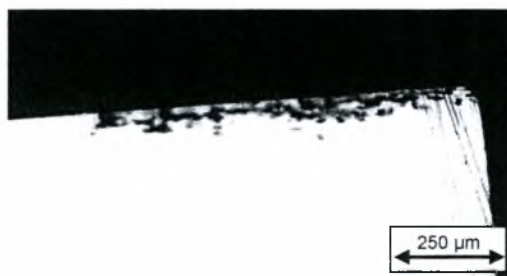
Τα εγκιβωτισμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε προσεκτική λείανση, στίλβωση και προσβολή με χημικό αντιδραστήριο Keller's (95ml απεσταγμένου H<sub>2</sub>O, 2.5ml HNO<sub>3</sub>, 1.0ml HF και 1.5ml HCl).

Το κάθε δοκίμιο προσβάλλεται από το αντιδραστήριο για χρόνο περίπου 14 sec, και στην συνέχεια ξεπλένεται με απεσταγμένο H<sub>2</sub>O θερμοκρασίας 40-50°C. Τελικά εμβαπτίζεται για χρόνο 2-3 sec σε HNO<sub>3</sub> (65%), πλένεται ξανά με άφθονο απεσταγμένο H<sub>2</sub>O και στεγνώνεται με θερμό αέρα.

Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η αποκάλυψη της μεταλλογραφίας του υλικού ώστε αυτή να καταστεί ορατή στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Έγινε καταγραφή και φωτογράφιση των παρατηρήσεων προκειμένου να αξιοποιηθούν στην περαιτέρω ανάλυση και σχολιασμό. Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες φαίνονται στις εικόνες 5-27α έως 5-27ια. Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στο Παράρτημα "Η".



**Εικόνα 5-27α:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες.



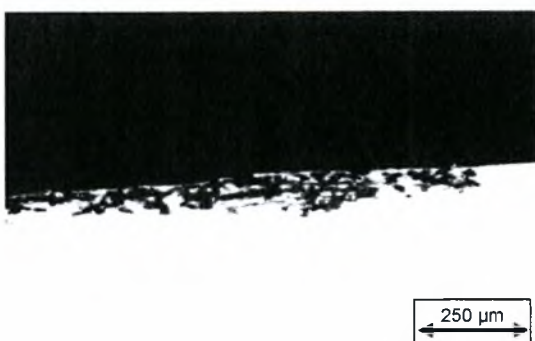
**Εικόνα 5-27β:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



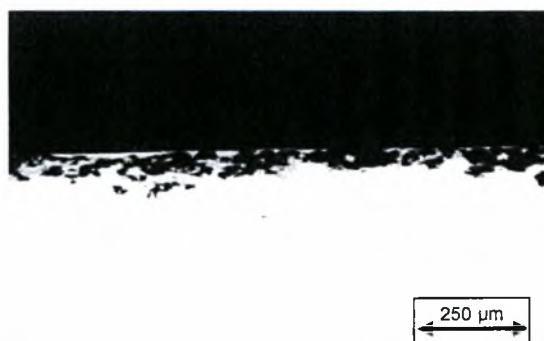
**Εικόνα 5-27γ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα 5-27δ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα 5-27ε:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα 5-27στ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



250 μm

**Εικόνα 5-27ζ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



250 μm

**Εικόνα 5-27η:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



250 μm

**Εικόνα 5-27θ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.



250 μm

**Εικόνα 5-27ια:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



250 μm

**Εικόνα 5-27ιβ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.

#### 5.12.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονται στον πίνακα 5-16 που ακολουθεί:

**Πίνακας 5-16:** Αποτελέσματα πειράματος Modified EXCO TEST A1 2024-T3. Συνολική διάρκεια πειράματος: 96 ώρες

Δοκίμιο	Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Επιφάνεια A Δοκίμιου (cm <sup>2</sup> )	Τιμή pH (52°C)	Μεταβολή pH (%)	Αρχικό Βάρος Δοκίμιου W <sub>0</sub>	Τελικό Βάρος Δοκίμιου W <sub>τελ</sub>	Μείωση βάρους ΔW (gr)	Σχετική μείωση βάρους ΔW	Μεταβολή βάρους ΔM/επιφάνεια (gr/cm <sup>2</sup> )	Κατηγοριοποίηση επιφανειών (Άνοθ/Κάτω) [ASTM G34]	Ρυθμός Διάβρωσης (μm/y)
-	0	102.890	2.440	0	21.721	21.721	0	0	0	N/N	0
M1	2	102.890	2.303	5.61	21.721	21.708	0.013	5.9850×10 <sup>-4</sup>	1.2635×10 <sup>-4</sup>	P/P	78.7398
M2	5	104.335	2.369	2.91	22.041	22.016	0.025	1.1343×10 <sup>-3</sup>	2.3961×10 <sup>-4</sup>	P/P	59.7301
M3	8	105.504	2.400	1.64	22.300	22.261	0.039	1.7489×10 <sup>-3</sup>	3.6965×10 <sup>-4</sup>	P/P	57.5913
M4	12	104.452	2.340	4.10	22.067	22.008	0.059	2.6737×10 <sup>-3</sup>	5.6485×10 <sup>-4</sup>	EA/EA	58.6686
M5	16	104.389	2.293	6.02	22.053	21.973	0.080	3.6276×10 <sup>-3</sup>	7.6636×10 <sup>-4</sup>	EA/EA	59.6991
M6	24	104.863	2.330	4.51	22.158	22.055	0.103	4.6484×10 <sup>-3</sup>	9.8223×10 <sup>-4</sup>	EA/EA	51.0101
M7	36	104.181	2.390	2.05	22.007	21.841	0.166	7.5431×10 <sup>-3</sup>	1.5934×10 <sup>-3</sup>	EA/EA	55.1656
M8	48	103.034	2.410	1.23	21.753	21.497	0.256	0.01176849	2.4846×10 <sup>-3</sup>	EB/EB	64.5164
M9	72	105.215	2.460	-0.82	22.236	21.840	0.396	0.01780896	3.7637×10 <sup>-3</sup>	EB/EB	65.1533
M10	96	103.341	2.530	-3.69	21.821	21.259	0.562	0.02575501	5.4383×10 <sup>-3</sup>	EB/EB	70.6064

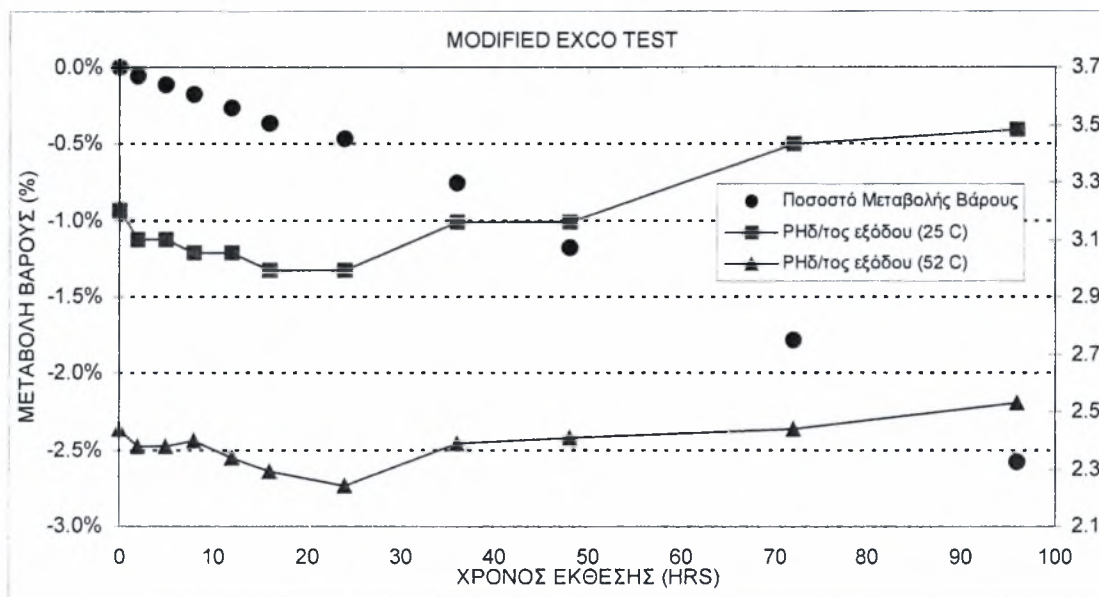
Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις το μαθηματικό μοντέλο που προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα και εκφράζει την ποσοστιαία μεταβολή βάρους των δοκιμίων στο πείραμα της διάβρωσης Modified EXCO Test είναι της γενικής μορφής:

$$y = -k_1 \ln(1 + k_2 t^{k_3})$$

όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους επί τοις εκατό

$t$  είναι ο χρόνος σε ώρες και

$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την γεωμετρία του.



Εικόνα 5-28: Μεταβολή βάρους δοκιμίων και μεταβολή pH του δ/τος με το χρόνο έκθεσης

Από την εικόνα 5-28 προκύπτει ότι τα πειραματικά δεδομένα ποσοστιαίας μεταβολής βάρους δοκιμίων προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

$$y = -0.03 \ln(1 + 0.0015t^{1.5})$$

Αντίστοιχα το μαθηματικό μοντέλο που προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα και εκφράζει την μεταβολή βάρους των δοκιμίων ανά μονάδα επιφάνειας στο πείραμα της διάβρωσης Modified EXCO Test είναι της γενικής μορφής:

$$y = -k_1 (1 - e^{-k_2 t})^{k_3}$$

όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας σε ( $mg/cm^2$ )

$t$  είναι ο χρόνος σε ώρες και

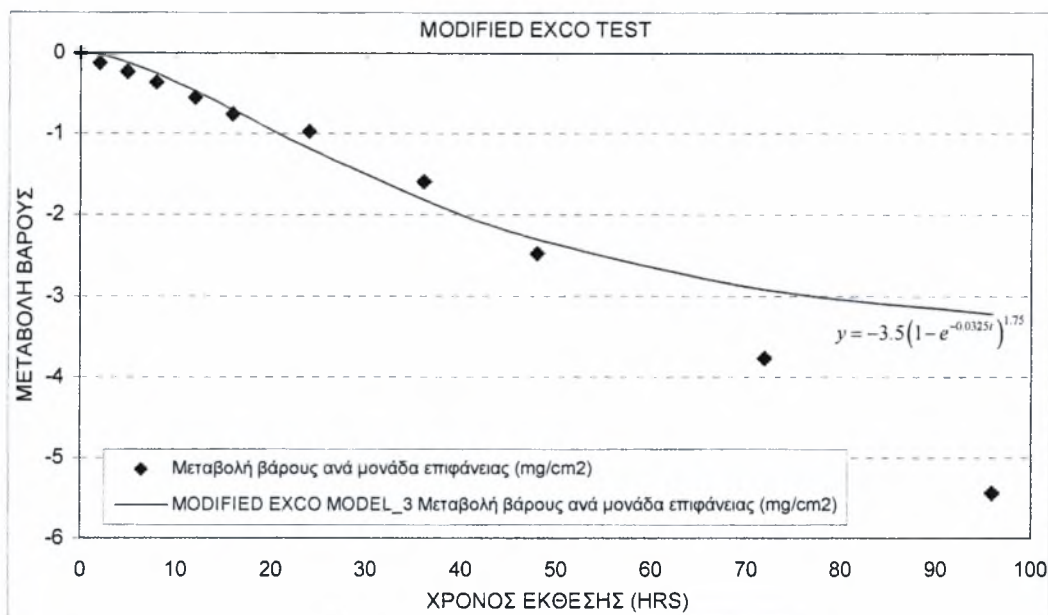
$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την γεωμετρία του.

Από την εικόνα 5-29 προκύπτει ότι τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

$$y = -3.5(1 - e^{-0.0325t})^{1.75}$$

το οποίο εκφράζει την μεταβολή βάρους των δοκιμίων ανά μονάδα επιφάνειας στο πείραμα Modified EXCO Test σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$  έκθεσης σε ώρες. Εισάγοντας στη σχέση την πυκνότητα του Al 2024T3 ( $\rho_{Al2024T3} = 2768 \text{ mg/cm}^3$ ), ώστε να απεικονιστεί η επίδραση του υλικού, η σχέση διαμορφώνεται:

$$y = -3.5(1 - e^{-0.0325t})^{1.75} = -1.265 \times 10^{-3} \times \rho_{Al2024T3} \times (1 - e^{-0.0325t})^{1.75}$$



**Εικόνα 5-29:** Μεταβολή βάρους δοκιμίων ανά μονάδα επιφάνειας με το χρόνο έκθεσης

Βάσει της τελευταίας σχέσης η αναμενόμενη απώλεια μάζας σε  $mg/cm^2$  για τα διαστήματα έκθεσης φαίνονται στον πίνακα 5-17 μαζί με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές και τις αποκλίσεις που σημειώνονται.

**Πίνακας 5-17:** Σύγκριση Μοντέλου και Πειραματικών Δεδομένων

Ώρες έκθεσης	0	2	5	8	12	16	24	36	48	72	96
Μοντέλο	0	0,0277	0,1265	0,2652	0,4842	0,7211	1,1967	1,8266	2,3162	2,9315	3,2340
Πείραμα	0	0,1263	0,2396	0,3696	0,5648	0,7663	0,9822	1,5933	2,4846	3,7637	5,4383
Απόκλιση (%)	0	78,1	47,2	28,3	14,3	5,9	-21,8	-14,6	6,8	22,1	40,5

Η σημαντική απόκλιση σε χρόνο άνω των 48 ωρών έγκειται στο ότι το πείραμα επεκτάθηκε μέχρι τις 96 ώρες αν και σύμφωνα με τους S. Lee και B.W. Lifka [26] η χρονική διάρκεια των 48 ωρών (hrs) είναι αρκετή και αντιπροσωπευτική για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

### 5.12.5 ALTERNATE IMMERSION TEST - ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η πειραματική αυτή μέθοδος επιταχυνόμενης διάβρωσης βασίστηκε στην προδιαγραφή ASTM G44 και περιλαμβάνει την εναλλασσόμενη εμβάπτιση δοκιμίων κράματος Al σε ειδικά παρασκευασμένο διάλυμα 3.5% NaCl. Το πείραμα προσομοιώνει την έκθεση του κράματος Al σε παραθαλάσσιο περιβάλλον στο οποίο τα αντικείμενα διαβρέχονται περιοδικά από το ισχυρά διαβρωτικό θαλάσσιο νερό ενώ το υπόλοιπο χρονικό διάστημα είναι εκτεθειμένα στον αέρα όπου τα διαβρωτικά υγρά εξατμίζονται. Η μέθοδος αποσκοπεί στην πρόβλεψη της διαβρωτικής συμπεριφοράς του κράματος Al στο εν λόγω ή σε παρόμοιας διαβρωτικότητας περιβάλλον.

#### Προετοιμασία των Δοκιμίων

Για την διεξαγωγή πειραμάτων Alternate Immersion χρησιμοποιήθηκαν εννέα (9) δοκίμια από φύλλο Al 2024-T3 πάχους 1.6mm προδιαγραφής QQ-A-250/4, που διατέθηκαν από την εταιρεία EAB ΑΕ αφού κόπηκαν σε μορφή παραλληλογράμμου με διαστάσεις 100mm×50mm. Οι ακμές των δοκιμίων υπέστησαν κατάλληλη μηχανουργική κατεργασία λείανσης ώστε να αφαιρεθούν τυχόν ανωμαλίες των ακμών καθώς και τυχόν εναπομείνουσες τάσεις από την κοπή των δοκιμίων.

Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κατάλληλη προετοιμασία σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G1-90. Ετσι, τα δοκίμια αφού καθαρίστηκαν με αιθυλική αλκοόλη και πλύθηκαν με απιονισμένο νερό προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες, εκτέθηκαν σε ρεύμα ζεστού αέρα για να στεγνώσουν.

Ακολούθως έγινε επιβεβαίωση των διαστάσεών τους και ζύγιση καθενός ξεχωριστά σε ζυγό ακριβείας Tare Model 300 (Denver Instrument Company DE Series), με ακρίβεια 0.001g του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Όλες οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε ειδικό μητρώο που δημιουργήθηκε για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, πρότυπη μορφή του οποίου παρατίθεται στην εικόνα 5-30.

ΜΗΤΡΩΟ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ALTERNATE IMMERSION TEST	
ΔΟΚΙΜΙΟ Νο :	Υλικό: Al 2024-T3
Τόπος Πειράματος: Παν. Θεσσαλίας Τμ. Μηχ/γων	
Διάρκεια Έκθεσης :	
Χρόνος Εμβάπτισης: 10 min/hr	
Ημ/νία Έναρξης Έκθεσης :	Ωρα:
Ημ/νία Πέρατος Έκθεσης :	Ωρα:
Αρχικό Βάρος $W_0$ :	pH δ/τος σε Έναρξη :
Τελικό Βάρος $W_{τελ}$ :	pH δ/τος σε Πέρασ :
Επιφάνεια Έκθεσης Δοκιμίου:	
(Όγκος δ/τος)/(Επιφάνεια Έκθεση Δοκιμίου) :	
Συμβολισμός Άνω Επιφανείας Δοκιμίου :	
Χαρακτηρισμός Άνω Επιφανείας Δοκιμίου :	
(βάσει ASTM G34)	
Χαρακτηρισμός Κάτω Επιφανείας Δοκιμίου :	
(βάσει ASTM G34)	
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:	

Εικόνα 5-30: Πρότυπο Μητρώο Δοκιμίου Πειράματος Alternate Immersion Test




Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας λόγω του αυστηρά ελεγχόμενου περιβάλλοντος ως προς την θερμοκρασία και την υγρασία καθώς και της διάθεσης του απαραίτητου εξοπλισμού.




Η διάρκεια του πειράματος Alternate Immersion καθορίστηκε σε 90 ημέρες (days) όπως περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM G44 για κράματα αλουμινίου [28]. Κατά το χρονικό διάστημα αυτό, προγραμματίστηκε η περιοδική παρατήρηση των δοκιμίων και η περισυλλογή ενός δοκιμίου σε τακτικά χρονικά διαστήματα, για περαιτέρω μελέτη και επεξεργασία προκειμένου να αντληθούν στοιχεία για την πορεία της διάβρωσης και τη συμπεριφορά του μετάλλου. Το χρονοδιάγραμμα που εκπονήθηκε για την παρακολούθηση της εξέλιξης του πειράματος παρατίθεται στην εικόνα 5-31.




ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΛΟΓΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΙ 2024-T3 ALTERNATE IMMERSION TEST

ID	Task Name	Juratioi	Start	Finish	Jun '98	22 Jun '98	29 Jun '98	6 Jul '98	13 Jul '98	20					
					W	F	S	T	T	S	M	W	F	S	T
1	Ευαρίξη Πειράματος Alternate Immersion Test	0 days	Fri 19/6/98	Fri 19/6/98	◆ 19/6										
2	Έκθεση Δοκιμίου Δ1	2 days	Fri 19/6/98	Sat 20/6/98											
3	Έκθεση Δοκιμίου Δ2	5 days	Fri 19/6/98	Sun 21/6/98											
4	Έκθεση Δοκιμίου Δ3	10 days	Fri 19/6/98	Mon 22/6/98											
5	Έκθεση Δοκιμίου Δ4	15 days	Fri 19/6/98	Wed 24/6/98											
6	Έκθεση Δοκιμίου Δ5	30 days	Fri 19/6/98	Mon 29/6/98											
7	Έκθεση Δοκιμίου Δ6	45 days	Fri 19/6/98	Sat 4/7/98											
8	Έκθεση Δοκιμίου Δ7	60 days	Fri 19/6/98	Thu 9/7/98											
9	Έκθεση Δοκιμίου Δ8	75 days	Fri 19/6/98	Tue 14/7/98											
10	Έκθεση Δοκιμίου Δ9	90 days	Fri 19/6/98	Sun 19/7/98											
11	Πέρασ Έκθεσης Δοκιμίων Πειράματος Alternate Immersion Test	0 days	Sun 19/7/98	Sun 19/7/98											◆ 19/7

Project: Alternate Immersion Test  
Date: Thu 7/7/05

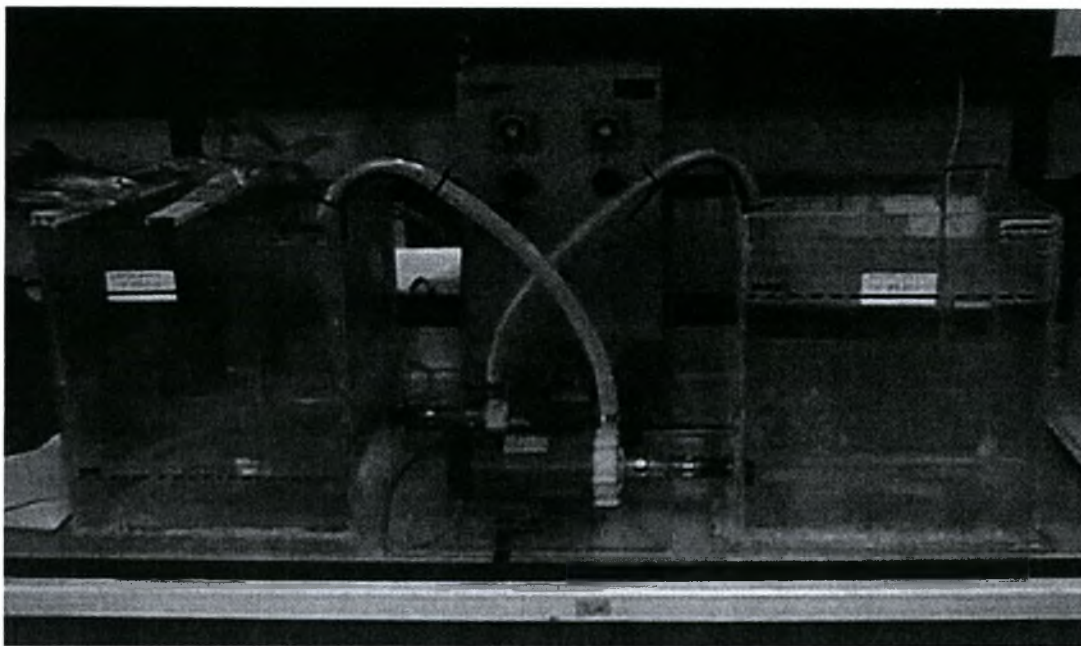
Task:  Milestone:  External Tasks: 

Split:  Summary:  External Milestone: 

Progress:  Project Summary:  Deadline: 



Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ιδιοσυσκευή αποτελούμενη από δύο (2) αδρανή δοχεία από plexiglass χωρητικότητας άνω των τριανταδύο λίτρων (32L) έκαστο, δύο ειδικές αντλίες μεταφοράς υγρών, ενεργοποιούμενες από κατάλληλο χρονοδιακόπτη, σύστημα αισθητήρων στάθμης διαλύματος και κατάλληλο σύστημα σωληνώσεων μεταφοράς-διακίνησης του διαλύματος μεταξύ των δοχείων. Η ιδιοσυσκευή απεικονίζεται στην εικόνα 5-32. Λεπτομέρειές της παρατίθενται στο Παράρτημα “Α” της παρούσης εργασίας.



**Εικόνα 5-32:** Ιδιοσυσκευή Διεξαγωγής Πειραμάτων Alternate Immersion Test

Εφόσον ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του πειράματος, έγινε η παρασκευή ενός διαβρωτικού διαλύματος NaCl 3.5% κ.β.. Για το λόγο αυτό, διαλύθηκαν 1071g NaCl, σε απιονισμένο νερό ώστε να παρασκευαστεί ποσότητα 30600 mL διαλύματος. Η οξύτητα (pH) του παρασκευασθέντος διαλύματος ρυθμίστηκε με κατάλληλη προσθήκη μικρών ποσοτήτων HCl και NaOH ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή pH 6.87 που είναι σύμφωνη με τα καθοριζόμενα στην ASTM G44.

Η θερμοκρασία του διαλύματος αφού εξισώθηκε με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου του εργαστηρίου, η οποία ρυθμίστηκε στους  $27 \pm 1^\circ\text{C}$ , διατηρήθηκε καθόλη τη διάρκεια του πειράματος σταθερή [28].

Ομοίως η υγρασία του περιβάλλοντος χώρου του εργαστηρίου, ρυθμίστηκε σε  $45 \pm 10\%$  και καθόλη τη διάρκεια του πειράματος διατηρήθηκε σταθερή [28].

Επίσης, δεδομένου ότι κυκλοφορία του αέρα επηρεάζει σημαντικά τόσο το ρυθμό εξάτμισης του διαλύματος όσο και το ρυθμό που τα εκτεθιμένα δοκίμια στεγνώνουν, λήφθηκε μέριμνα ώστε η κυκλοφορία του αέρα στο χώρο του πειράματος να είναι ήπια. Παράλληλα αποφεύχθηκε το στέγνωμα των δοκιμίων με ρεύμα θερμού αέρα προκειμένου να διατηρηθεί σταθερός ο ρυθμός στεγνώματος καθόλη την επιφάνεια των δοκιμίων, καθώς και οι συνθήκες κυκλοφορίας αέρα, σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στην προδιαγραφή ASTM G44.

Για την επίτευξη της περιοδικής διαβροχής των δοκιμίων έγινε ρύθμιση της ιδιοσυσκευής ώστε να επιτυγχάνεται ένας πλήρης κύκλος διαβροχής κάθε μία ώρα. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G44, η ρύθμιση των αντλιών έγινε ώστε τα υπό έκθεση δοκίμια να διαβρέχονται πλήρως από το διαβρωτικό

διάλυμα 3.5% NaCl κ.β. για χρονικό διάστημα 10min/hr, ενώ κατά το υπόλοιπο διάστημα 50min/hr να είναι εκτεθειμένα στην αυστηρά ελεγχόμενη ατμόσφαιρα του εργαστηρίου όπου στεγνώνουν. Ο παραπάνω κύκλος επαναλαμβάνεται αδιάκοπα όλο το 24ωρο καθόλη τη διάρκεια του πειράματος.

Σημειώνεται ότι η μεταφορική ικανότητα των αντλιών είναι κατάλληλη ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά του διαβρωτικού διαλύματος από το ένα δοχείο στο άλλο σε χρόνο μικρότερο των δύο (2) min. Συνεπώς υπερκαλύπτεται η προδιαγραφή ASTM G44, που ορίζει ότι ο ρυθμός εμβάπτισης/αποκάλυψης των δοκιμίων θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν γρηγορότερος, καθορίζοντας ως μέγιστο αποδεκτό χρόνο κάλυψης/αποκάλυψης των δοκιμίων από τη στιγμή που το πρώτο τμήμα τους διαβραχεί/αποκαλυφθεί από το διαβρωτικό διάλυμα, τα δύο (2) min.

Τα δοκίμια εμβαπτίσθηκαν στο παρασκευασθέν διάλυμα αναρτημένα από πλαστικές αδρανείς ράβδους μέσω πλαστικού αδρανούς νήματος από την κορυφή του δοχείου, και σε κατακόρυφη θέση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την ποσότητα των 32L παρασκευασθέντος διαλύματος για κάθε δοκίμιο, τηρήθηκε η προτεινόμενη από την προδιαγραφή ASTM G44, αναλογία όγκου διαλύματος προς συνολική επιφάνεια μετάλλου δοκιμίου,  $32\text{mL}/\text{cm}^2$ .

Λόγω της σχετικά μακράς διάρκειας του πειράματος, κατέστη απαραίτητη η ανανέωση του διαβρωτικού διαλύματος. Πράγματι, η ανανέωση του διαλύματος καθορίστηκε κάθε δεκαπέντε (15) ημέρες μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος. Επιπρόσθετα όπου κρινόταν απαραίτητο γινόταν συμπλήρωση του διαλύματος με απιονισμένο νερό (pH=7.2) προκειμένου να αναπληρωθούν οι απώλειες λόγω εξάτμισης του υγρού, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G44. Για το σκοπό αυτό, σημειώθηκε επί των δοχείων η αρχική στάθμη του διαλύματος κατά την έναρξη του πειράματος, η οποία λήφθηκε μέριμνα ώστε να διατηρηθεί αμετάβλητη.

Παράλληλα από κάθε δοκίμιο αναρτήθηκε ειδική καρτέλλα σήμανσης και ταυτότητας του δοκιμίου για σκοπούς αναγνώρισης και προς αποφυγή ευνόητων συναφών προβλημάτων.

Λόγω της ανανέωσης του διαλύματος ανά δεκαπενθήμερο, η περιοδική καταγραφή της οξύτητας (pH) του διαλύματος ώστε να καθοριστεί η μεταβολή του κατά την εξέλιξη του πειράματος ως ενδεικτικό του αναπτυσσόμενου ρυθμού διάβρωσης της επιφάνειας του δοκιμίου θεωρήθηκε περιττή και δεν τηρήθηκε παρά μόνο για το πρώτο δεκαπενθήμερο.

Η περισυλλογή του κάθε δοκιμίου έγινε αντίστοιχα μετά από 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75 και 90 ημέρες έκθεσης σύμφωνα με το εκπονηθέν χρονοδιάγραμμα της εικόνας 5-31. Το κάθε δοκίμιο αμέσως μετά την περισυλλογή του υπέστη χάραξη με το σύμβολο “Δ1”, “Δ2”, “Δ3”, ..., “Δ9” στην άνω δεξιά γωνία μιας εκ των επιφανειών έκθεσης με χρήση εντυπωτικής μεταλλικής πόντας (stencil stamp) ανάλογα με το χρόνο έκθεσής του, ώστε να είναι δυνατή η κωδικοποίηση-αναγνώρισή του ως δοκίμιο Alternate Immersion Test [11]. Ο λόγος για τον οποίο αποφασίσθηκε η χάραξη της επιφάνειας αμέσως μετά την περισυλλογή του δοκιμίου και όχι πριν, ήταν η αποφυγή δημιουργίας παραμενουσών τάσεων από παραμόρφωση στην επιφάνεια καθώς και η αποφυγή της μεταφοράς και της παραμικρής ακαθαρσίας-ξένου σώματος στην επιφάνεια του δοκιμίου που ενδεχομένως να επηρέαζε την διάβρωση στην περιοχή. Σε συνδυασμό με τη συνοδευτική καρτέλλα διασφαλίστηκε η αποφυγή οποιασδήποτε δυσχέρειας στην αναγνώριση της ταυτότητας του δοκιμίου.

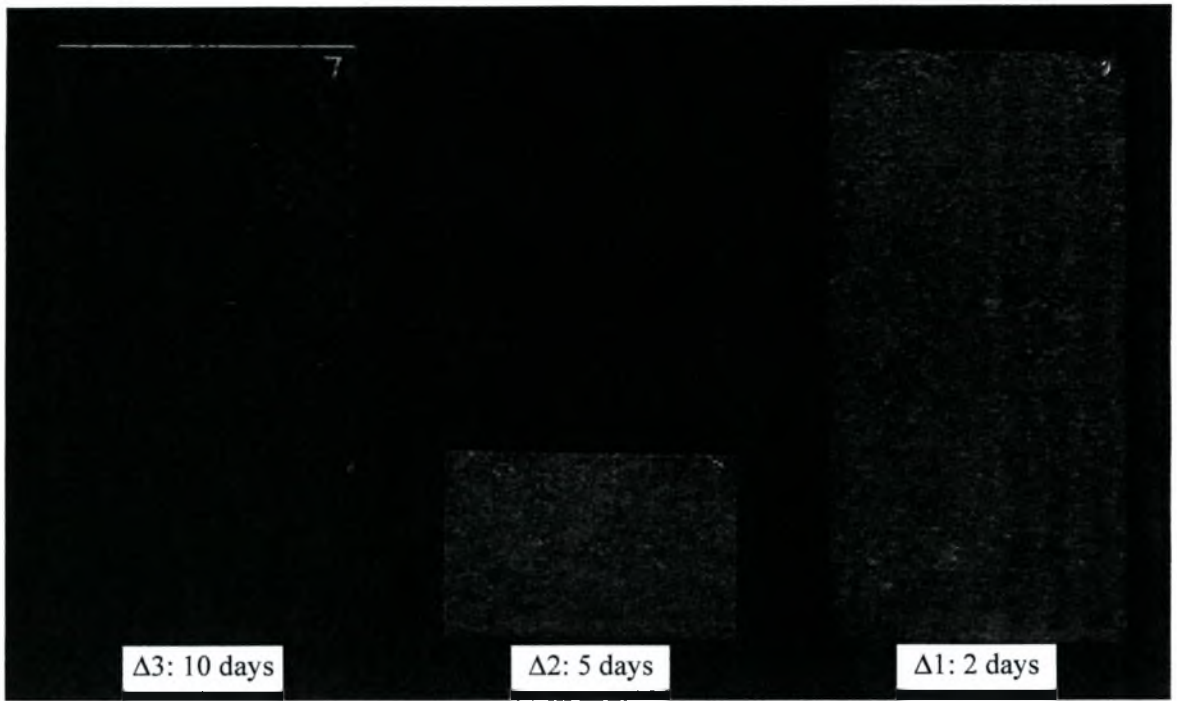
Κατόπιν, κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε διαδικασία καθαρισμού, περαιτέρω μετρήσεων και μελέτης σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στην προδιαγραφή ASTM G1-90 που συνίστανται στα ακόλουθα:

α. Οπτική επιθεώρηση ώστε να πραγματοποιηθεί προκαταρκτική αξιολόγηση της κατάστασης του κάθε δοκιμίου πριν υποστεί οποιοδήποτε καθαρισμό. Στα πλαίσια αυτά και όσο η επιφάνεια ήταν ακόμη υγρή, έγινε κατηγοριοποίηση της επιφάνειας του δοκιμίου με βάση την παρατηρούμενη διάβρωση και τις οδηγίες της προδιαγραφής ASTM G34 (N, P, EA – ED) [25] για λόγους σύγκρισης με τα υπόλοιπα πειράματα επιταχυνόμενης και φυσικής διάβρωσης.

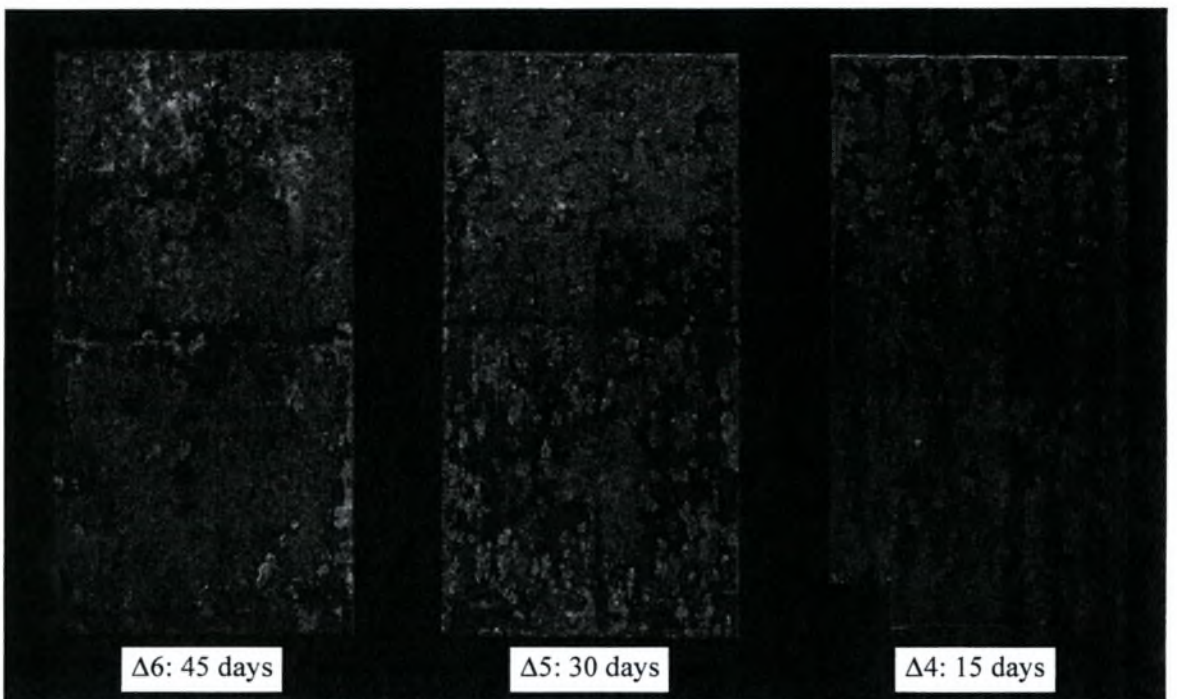
β. Καθαρισμός με εμβάπτιση σε απιονισμένο νερό. Ο σκοπός του αρχικού αυτού σταδίου καθαρισμού ήταν η απομάκρυνση από την επιφάνεια του δοκιμίου υπολειμμάτων του διαβρωτικού διαλύματος χωρίς την απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης.

γ. Καθαρισμός με εμβάπτιση σε αραιό διάλυμα  $\text{HNO}_3$  8-10% κ.ο. στους  $20^\circ\text{C}$ - $25^\circ\text{C}$  για χρόνο 3 min και ελαφρά χρήση λεπτού, μαλακού πινέλου. Η επιλογή του μέσου καθαρισμού (διάλυμα  $\text{HNO}_3$  8-10% κ.ο.) και του χρόνου εμβάπτισης έγινε σύμφωνα με το Annex A1 της προδιαγραφής ASTM G1-90 (Procedure C.1.2). Αποτέλεσε το κύριο στάδιο καθαρισμού του δοκιμίου όπου επιδίωξη ήταν η απομάκρυνση μόνο των προϊόντων της διάβρωσης χωρίς να απομακρυνθεί μέταλλο βάσης. Ακολούθησε προσεκτική έκπλυση με απιονισμένο νερό. Κατόπιν, έγινε στέγνωμα του δοκιμίου σε ρεύμα θερμού αέρα και ζύγιση με αντίστοιχη καταγραφή της μεταβολής της μάζας. Οι μετρούμενες τιμές φαίνονται στον πίνακα 5-18. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε, σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στο Παράρτημα “B”, μέχρι να απομακρυνθούν πλήρως τα προϊόντα της διάβρωσης. Τούτο επιβεβαιώθηκε οπτικά στο στερεοσκόπιο, όπου και έγινε φωτογράφιση της επιφάνειας του κάθε δοκιμίου. Κατά την τελική ζύγιση καταχωρήθηκε η μάζα του δοκιμίου μετά τον καθαρισμό από τα προϊόντα διάβρωσης.

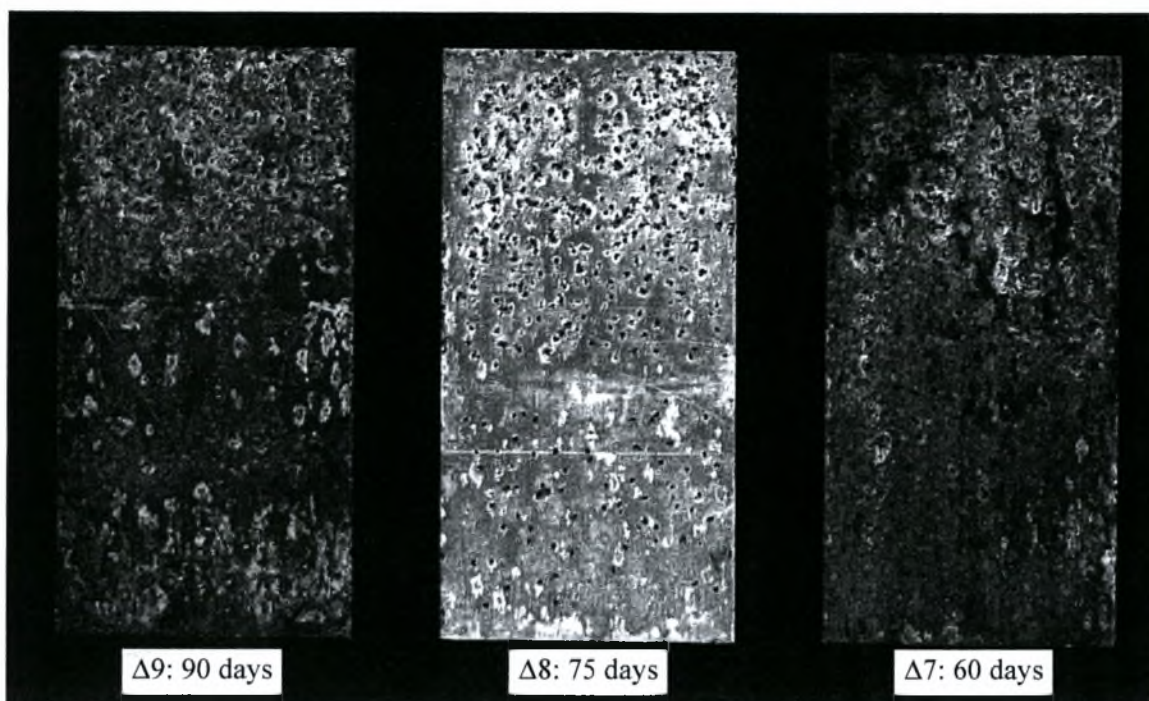
Συγκριτική εικόνα της κατάστασης της επιφάνειας των δοκιμίων φαίνεται στην εικόνα 5-33. Λεπτομέρειες της στερεοσκοπικής εξέτασης του κάθε δοκιμίου δίδονται στο Παράρτημα “Θ”.



Δοκίμια Δ1 – Δ2 – Δ3 Πειράματος Alternate Immersion Test



Δοκίμια Δ4 – Δ5 – Δ6 Πειράματος Alternate Immersion Test



Δοκίμια Δ7 – Δ8 – Δ9 Πειράματος Alternate Immersion Test  
**Εικόνα 5-33:** Κατάσταση επιφάνειας δοκιμίων Alternate Immersion Test

Μετά την στερεοσκοπική εξέταση του δοκιμίου, εξετάστηκε μεταλλογραφικά τομή της διαβρωμένης επιφάνειας προκειμένου να εκτιμηθεί η μορφή και το βάθος της διαβρωτικής προσβολής, η έκτασή της και οι επιπτώσεις στη δομή του κράματος. Για το σκοπό αυτό έγινε κοπή τμημάτων του διαβρωμένου δοκιμίου με ειδική συσκευή κοπής ακριβείας, τύπου Minitom Struers και εγκιβωτισμός με χρήση ειδικής συσκευής εγκιβωτισμού στο κενό, τύπου Erovac Struers.

Τα εγκιβωτισμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε προσεκτική λείανση, στίλβωση και προσβολή με χημικό αντιδραστήριο Keller's (95ml απεσταγμένου  $H_2O$ , 2.5ml  $HNO_3$ , 1.0ml HF και 1.5ml HCl).

Το κάθε δοκίμιο προσβάλλεται από το αντιδραστήριο για χρόνο περίπου 14 sec, και στην συνέχεια ξεπλένεται με απεσταγμένο  $H_2O$  θερμοκρασίας 40-50°C. Τελικά εμβαπτίζεται για χρόνο 2-3 sec σε  $HNO_3$  (65%), πλένεται ξανά με άφθονο απεσταγμένο  $H_2O$  και στεγνώνεται με θερμό αέρα.

Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η αποκάλυψη της μεταλλογραφίας του υλικού ώστε αυτή να καταστεί ορατή στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Έγινε καταγραφή και φωτογράφιση των παρατηρήσεων προκειμένου να αξιοποιηθούν στην περαιτέρω ανάλυση και σχολιασμό.

Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες φαίνονται ακολούθως στις εικόνες 5-34α έως 5-34ιστ. Περισσότερες λεπτομέρειες της μεταλλογραφικής εξέτασης και των παρατηρήσεων του κάθε δοκιμίου δίδονται στο Παράρτημα "Θ".



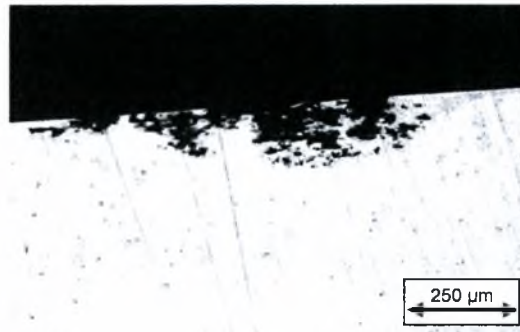
250 μm

**Εικόνα 5-34α:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.



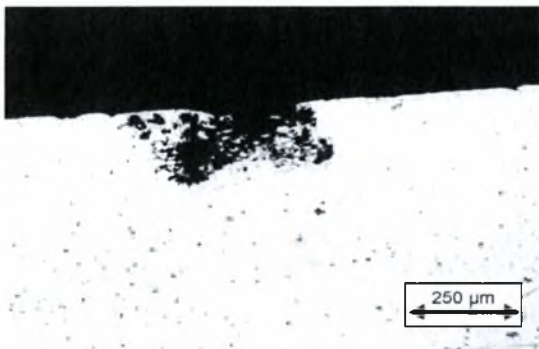
125 μm

**Εικόνα 5-34β:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.



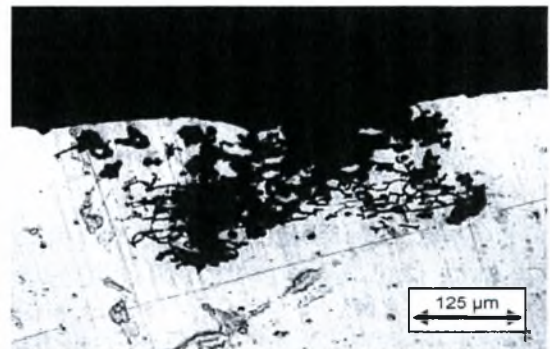
250 μm

**Εικόνα 5-34γ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ2 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ημέρες.



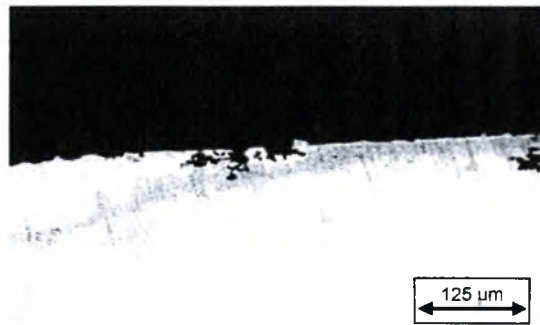
250 μm

**Εικόνα 5-34δ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.



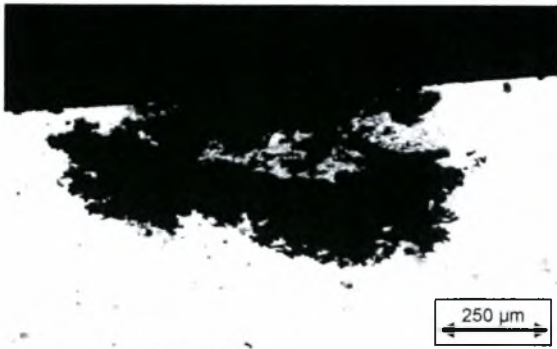
125 μm

**Εικόνα 5-34ε:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.

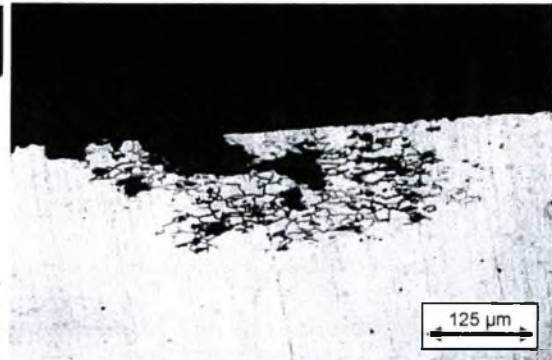


125 μm

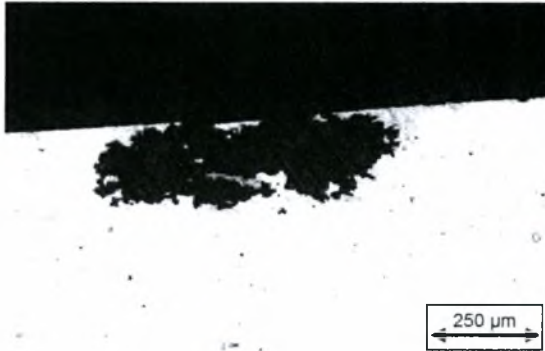
**Εικόνα 5-34στ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



**Εικόνα 5-34ζ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



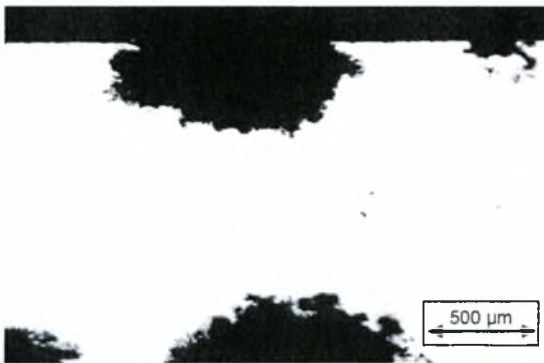
**Εικόνα 5-34η:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες. Περικρυσταλλική διάβρωση.



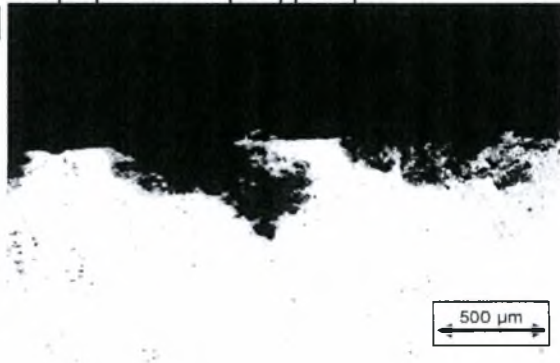
**Εικόνα 5-34θ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



**Εικόνα 5-34ι:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες. Περικρυσταλλική διάβρωση.



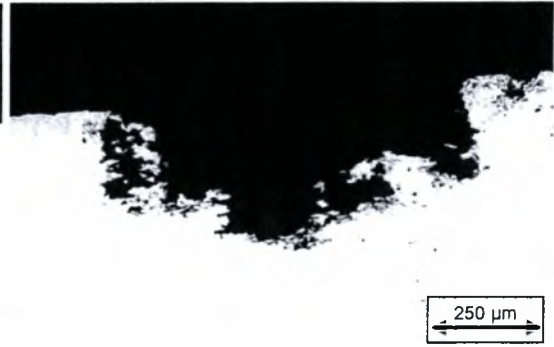
**Εικόνα 5-34ια:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες.



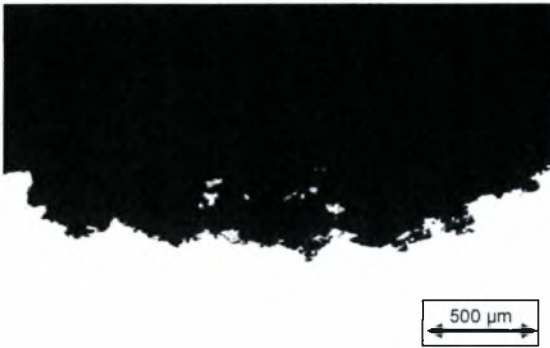
**Εικόνα 5-34ιβ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες.



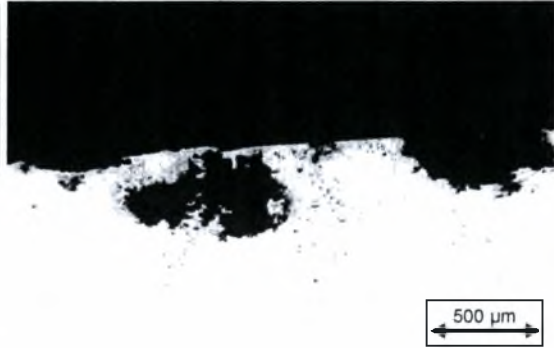
**Εικόνα 5-34γ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα 5-34δ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα 5-34ε:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



**Εικόνα 5-34β:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.

#### 5.12.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονται στον πίνακα 5-18 που ακολουθεί:



**Πίνακας 5-18:** Αποτελέσματα πειράματος Αλτερνατ Αlternate Immersion Test Αl 2024-Τ3. Συνολική διάρκεια πειράματος: 90 ημέρες

Δοκίμιο	Χρόνος εμβάπτισης (ημέρες)	Επιφάνεια Α Δοκίμιου (cm <sup>2</sup> )	Τιμή pH	Μεταβολή pH (%)	Αρχικό Βάρος Δοκίμιου W <sub>0</sub>	Τελικό Βάρος Δοκίμιου W <sub>τελ</sub>	Μείωση βάρους ΔW (gr)	Σχετική μείωση βάρους ΔW	Μεταβολή βάρους ΔΜ/επιφάνεια (gr/cm <sup>2</sup> )	Κατηγοριοποίηση επιφάνειας (ASTM G34)	Ρυθμός Διάβρωσης (μm/y)
-	0	106.060	6.88	0	21.423	21.423	0	0	0	----	0
Δ1	2	106.060	8.14	18.31	22.423	22.413	0.010	4.4597×10 <sup>-4</sup>	9.4286×10 <sup>-5</sup>		2.4483
Δ2	5	104.520	8.40	22.09	22.082	22.052	0.030	1.3586×10 <sup>-3</sup>	2.8703×10 <sup>-4</sup>		2.9812
Δ3	10	103.405	8.61	25.14	21.835	21.818	0.017	7.7857×10 <sup>-4</sup>	1.6440×10 <sup>-4</sup>		0.8538
Δ4	15	103.621	8.47	23.11	21.883	21.809	0.074	3.3816×10 <sup>-3</sup>	7.1414×10 <sup>-4</sup>		2.4725
Δ5	30	103.265	-	-	21.804	21.518	0.286	0.013117	2.7696×10 <sup>-3</sup>		4.7944
Δ6	45	103.409	-	-	21.836	21.440	0.396	0.018135	3.8295×10 <sup>-3</sup>		4.4194
Δ7	60	103.680	-	-	21.896	21.308	0.588	0.026854	5.6713×10 <sup>-3</sup>		4.9088
Δ8	75	103.757	-	-	21.913	21.201	0.712	0.032492	6.8622×10 <sup>-3</sup>		4.7516
Δ9	90	103.382	-	-	21.830	21.207	0.623	0.028539	6.0262×10 <sup>-3</sup>		3.4773

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις το μαθηματικό μοντέλο που προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα και εκφράζει την ποσοστιαία μεταβολή βάρους των δοκιμίων στο πείραμα Alternate Immersion Test είναι της γενικής μορφής:

$$y = -k_1 (1 - e^{-k_2 t})^{k_3}$$

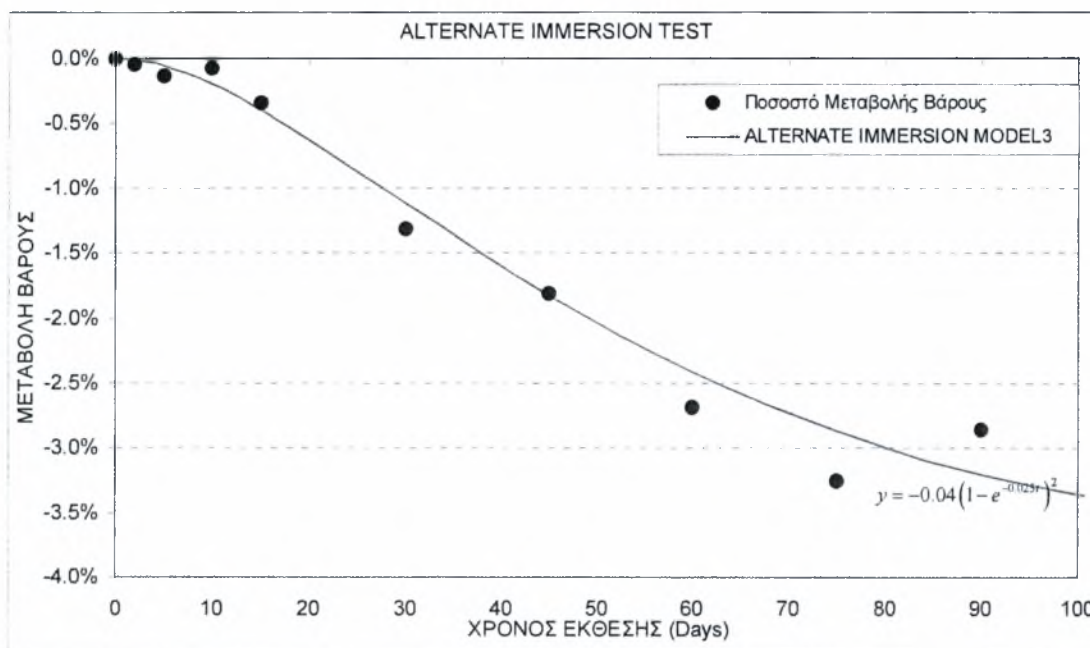
όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους επί τοις εκατό

$t$  είναι ο χρόνος σε ημέρες και

$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την γεωμετρία του.

Από την εικόνα 5-35 προκύπτει ότι τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

$$y = -0.04 (1 - e^{-0.025t})^2$$



Εικόνα 5-35: Μεταβολή βάρους δοκιμίων και μεταβολή pH του δ/τος με το χρόνο έκθεσης

Αντίστοιχα το μαθηματικό μοντέλο που προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα και εκφράζει την μεταβολή βάρους των δοκιμίων ανά μονάδα επιφάνειας στο πείραμα Alternate Immersion Test είναι της γενικής μορφής:

$$y = -k_1 (1 - e^{-k_2 t})^{k_3}$$

όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας σε ( $mg/cm^2$ )

$t$  είναι ο χρόνος σε ημέρες και

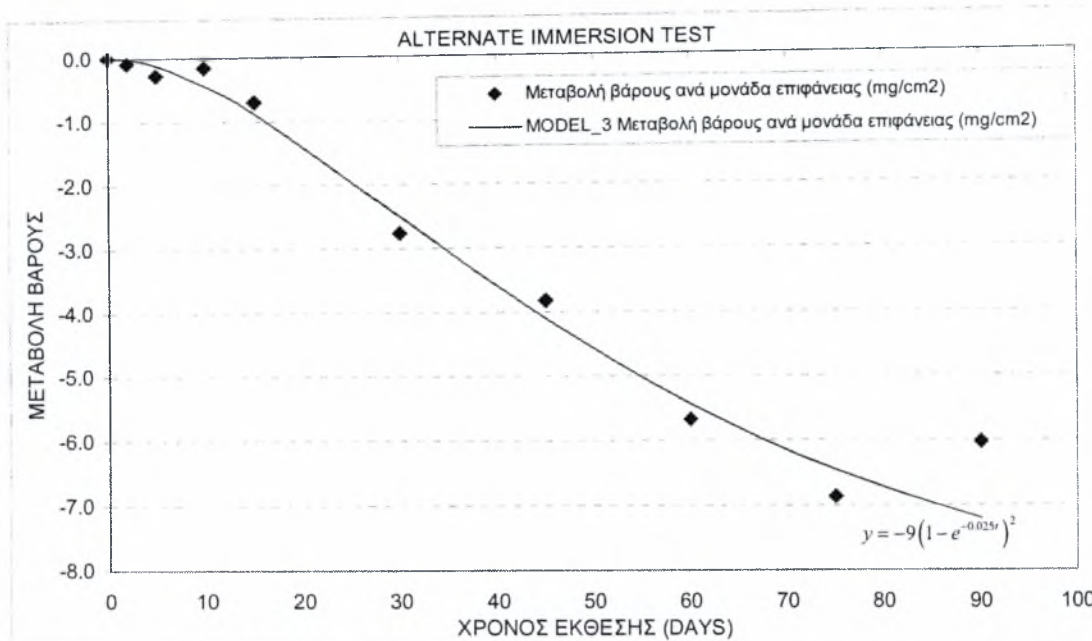
$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την γεωμετρία του.

Από την εικόνα 5-36 προκύπτει ότι τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται από το μαθηματικό μοντέλο:

$$y = -9(1 - e^{-0.025t})^2, \text{ όπου } t \text{ είναι ο χρόνος έκθεσης σε ημέρες}$$

το οποίο εκφράζει την μεταβολή βάρους των δοκιμίων ανά μονάδα επιφάνειας στο πείραμα Alternate Immersion Test σε συνάρτηση με το χρόνο  $t$  έκθεσης. Εισάγοντας στη σχέση την πυκνότητα του Al 2024-T3 ( $\rho_{Al2024T3} = 2768 \text{ mg/cm}^3$ ), ώστε να απεικονιστεί η επίδραση του υλικού, η σχέση διαμορφώνεται:

$$y = -9(1 - e^{-0.025t})^2 = -3.252 \times 10^{-3} \times \rho_{Al^{2024}T3} \times (1 - e^{-0.025t})^2$$



Εικόνα 5-36: Μεταβολή βάρους δοκιμών ανά μονάδα επιφάνειας με το χρόνο έκθεσης

Βάσει της τελευταίας σχέσης η αναμενόμενη απώλεια μάζας σε  $\text{mg}/\text{cm}^2$  για τα διαστήματα έκθεσης φαίνονται στον πίνακα 5-19 μαζί με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές και τις αποκλίσεις που σημειώνονται.

Πίνακας 5-19: Σύγκριση Μοντέλου και Πειραματικών Δεδομένων

Ημέρες έκθεσης	0	2	5	10	15	30	45	60	75	90
Μοντέλο	0	0,0214	0,1243	0,4404	0,8801	2,5056	4,1048	5,4317	6,4513	7,2028
Πείραμα	0	0,0943	0,2870	0,1644	0,7141	2,7696	3,8295	5,6713	6,8622	6,0262
Απόκλιση (%)	0	-77,3	-56,7	167,8	23,2	-9,5	7,2	-4,2	-6,0	19,5

Παρατηρείται ότι αν και το μοντέλο δεν παρέχει ικανοποιητική προσέγγιση στα αρχικά στάδια εξέλιξης του φαινομένου (πρώτες 10 ημέρες έκθεσης), εντούτοις κατόπιν παρέχει ικανοποιητική προσέγγιση και αξιοπιστία αποτελεσμάτων.

Είναι αξιοσημείωτο ότι αποτελέσματα άλλων εργασιών [29] παρέχουν τιμές μεταξύ  $0.875\text{mg}/\text{cm}^2$  και  $1\text{mg}/\text{cm}^2$  σε τρεις(3) εβδομάδες εμβάπτισης, οι οποίες είναι σε γενική συμφωνία με τα αποτελέσματα του μοντέλου εξέλιξης του φαινομένου.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ - REFERENCES

1. "Quantification of the Structural Impact of Lap Joint Corrosion Damage", D.T. Peeler and R.C. Kinzie, AFRL/MLSA, Presentation in 2000 USAF Aircraft Structural Integrity Program Conference, 7 Dec 2000.
2. Abbott W.H and Kinzie R., "Corrosion Monitoring in Military Environments, Recent Developments" Presentation in 2000 USAF Aircraft Structural Integrity Program Conference.
3. Kinzie R., "Anticipating Damage in the Fleet: Development of a Robust Environmental Severity Index", USAF Corrosion Prevention and Control Office.
4. "Aircraft Weapons Systems Cleaning and Corrosion Control", NAVAIR 01-1A-509, T.O. 1-1-691, TM 1-1500-344-23, Appendix E, Section I, Table E-1, Pages E-4 to E-8, Naval Air Systems Command, US Dept of Defense, 1 May 2001.
5. MIL-HDBK-5H "Metallic Materials & Elements for Aerospace Vehicle Structures, 1-12-1998, pp.3-67, Table 3.2.3.0(a).
6. 1997 ASM International, "*Alloy Digest*", Revised Aug 1973.
7. Sprowls D.O., "Corrosion Testing and Evaluation – Simulated Service Testing" in *Metals Handbook*, Volume 13, 9th Edition, *Corrosion*, ASM 1987, pp.205-207.
8. Dean S.W. Jr., "Atmospheric Tests" in *Corrosion Tests and Standards by Robert Baboian*, chapter 11, pp.120-123.
9. Money K.L., "Corrosion Testing in the Atmosphere", *Metals Handbook Ninth Edition, Vol.13, Corrosion*, ASM International, Metals Park, OH, 1987, pp.204-206
10. Dean S.W. Jr., "Planning Instrumentation and Evaluation of Atmospheric Corrosion Tests and A Review of ASTM Testing" in *Atmospheric Corrosion*, W.H. Ailor, Ed. John Wiley and Sons, New York 1982, pp.195-216
11. Kucera V.H., Haagenrud S., Atteraas L. And Gullman J., "Corrosion of Steel and Zinc in Scandinavia with Respect to Classification of the Corrosivity of Atmospheres" in *Degradation of Metals in the Atmosphere, ASTM STP 965*, S.W. Dean and T.S. Lee, Eds. ASTM, Philadelphia, 1988, pp.264-281.
12. Standard ASTM G50 και "Atmospheric Tests" S.W. Dean Jr., in *Corrosion Tests and Standards by Robert Baboian*, chapter 11, pp.123.
13. Standard ASTM G33, "Practice for Recording Data from Atmospheric Corrosion Tests for Metallic-Coated Steel Specimens".
14. Dean S.W., "ISO CORRAG Collaborative Atmospheric Exposure Program: A Preliminary Report", *Degradation of Metals in the Atmosphere, ASTM STP 965*, S.W. Dean and T.S. Lee, Eds. ASTM, Philadelphia, 1988, pp.385-431.

- 
15. Standard ASTM G 112 "Standard Guide for Conducting Exfoliation Corrosion Tests in Aluminum Alloys", November 1992.
  16. "Aerosol transport modeling as an aid to understanding atmospheric corrosivity patterns", Klassen R.D. and Roberge P.R. in *Materials and Design*, Vol 20, pp.159-168, 1999.
  17. Dean S.W., "Analyses of Four Years of Exposure Data from the USA Contribution to ISO CORRAG Program" in *Atmospheric Corrosion* by Kirk W.W. and Lawson H.H. Eds, ASTM STP 1239, pp 59-64.
  18. Morcillo M., Chico B., Mariaca L., Otero E. "Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site", *Corrosion Science*, Vol 42, 2000, pp.91-104.
  19. King G.A. and O' Brien D.J., "The influence of marine environments on metals and fabricated coated metal products, freely exposed and partially sheltered" in *Atmospheric Corrosion* by W.W.Kirk and H.H.Lewis, ASTM STP 1239, pp.167-192
  20. Morcillo M., Simancas J. and Feliu S., "Long-Term Atmospheric Corrosion in Spain: Results after 13-16 years of exposure and comparison with worldwide data" in *Atmospheric Corrosion* by W.W.Kirk and H.H.Lewis, ASTM STP 1239, pp.195-214.
  21. Morcillo M., "Atmospheric Corrosion in Ibero-America: The MICAT Project" in *Atmospheric Corrosion* by W.W.Kirk and H.H.Lewis, ASTM STP 1239, pp.257-275.
  22. Smith C.J.E., Gray J.A., Schra L., Boogers J.A.M., Braun R., Buhl H., Vaessen G., "Corrosion and Stress Corrosion of Aluminium-Lithium Alloys" in *AGARD CP-444, "New Light Alloys"*, NATO, pp. 7-11, Table 6.
  23. Roberge P.R., Klassen R.D., Haberecht P.W., "Atmospheric corrosivity modeling – a review" in *Materials and Design* 23(2002) pp321-330.
  24. Lipfelt F.W., Benarie M., Daum M.L, Pennington N.J. in *The Electrochemical Society Journal*, 1986 pp.108-154.
  25. Standard ASTM G34-90 "Standard test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test)", June 1990.
  26. Lee S. and Lifka B.W., "Modification of the EXCO Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 7XXX, 2XXX and Aluminum-Lithium Alloys", *New Methods for Corrosion Testing of Aluminium Alloys*, ASTM STP 1134, V.S. Agarwala and G.M.Ugiansky, Eds. ASTM, Philadelphia, 1992, pp.1-19.

- 
27. Braun R., "Exfoliation Corrosion Testing of Aluminium Alloys", *British Corrosion Journal*, 1995, Vol.30, No.3, pp.203-208.
  28. Standard ASTM G44-94 "Standard Practice for Evaluating Stress Corrosion Cracking Resistance of Metals and Alloys by Alternate Immersion in 3.5% Sodium Chloride Solution", April 1994.
  29. Smith C.J.E. "Current Requirements for the Design and Maintenance Against Corrosion of UK Military Aircraft" in *AGARD LS-141 "Management of Corrosion"*, pp 6-10, Fig. 2, 1985.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας από τις αναλύσεις και προσεγγίσεις που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια προκύπτουν τελικά τα ακόλουθα αποτελέσματα-συμπεράσματα για τα πειράματα που διεξήχθησαν:

Το Natural Corrosion Test ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο

$$y = -3.5(1 - e^{-0.014t})^{2.5}$$

όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας σε ( $mg/cm^2$ )

$t$  είναι ο χρόνος σε μήνες και

$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και τις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής έκθεσης (μετεωρολογικά δεδομένα, διαβρωτικοί ρύποι κλπ).

Το EXCO Test ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο

$$y = -3.5(1 - e^{-0.075t})^{1.25}$$

όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας σε ( $mg/cm^2$ )

$t$  είναι ο χρόνος σε ώρες και

$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την γεωμετρία του.

Το Modified EXCO Test ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο

$$y = -3.5(1 - e^{-0.0325t})^{1.75}$$

όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας σε ( $mg/cm^2$ )

$t$  είναι ο χρόνος σε ώρες και

$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την γεωμετρία του.

Το Alternate Immersion Test ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο

$$y = -9(1 - e^{-0.025t})^2$$

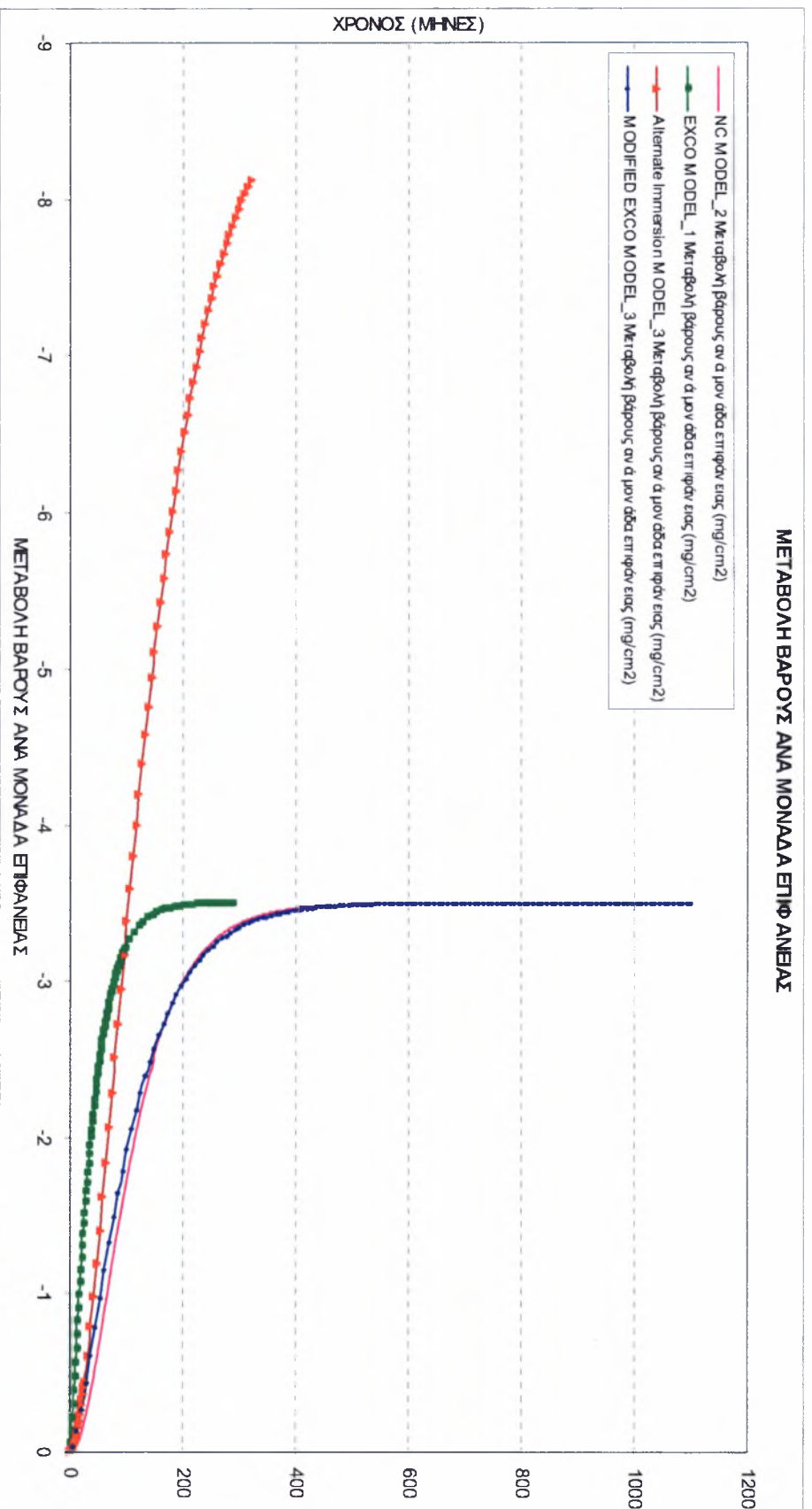
όπου  $y$  είναι η μεταβολή βάρους ανά μονάδα επιφάνειας σε ( $mg/cm^2$ )

$t$  είναι ο χρόνος σε ημέρες και

$k_1, k_2, k_3$  είναι αριθμητικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την γεωμετρία του.

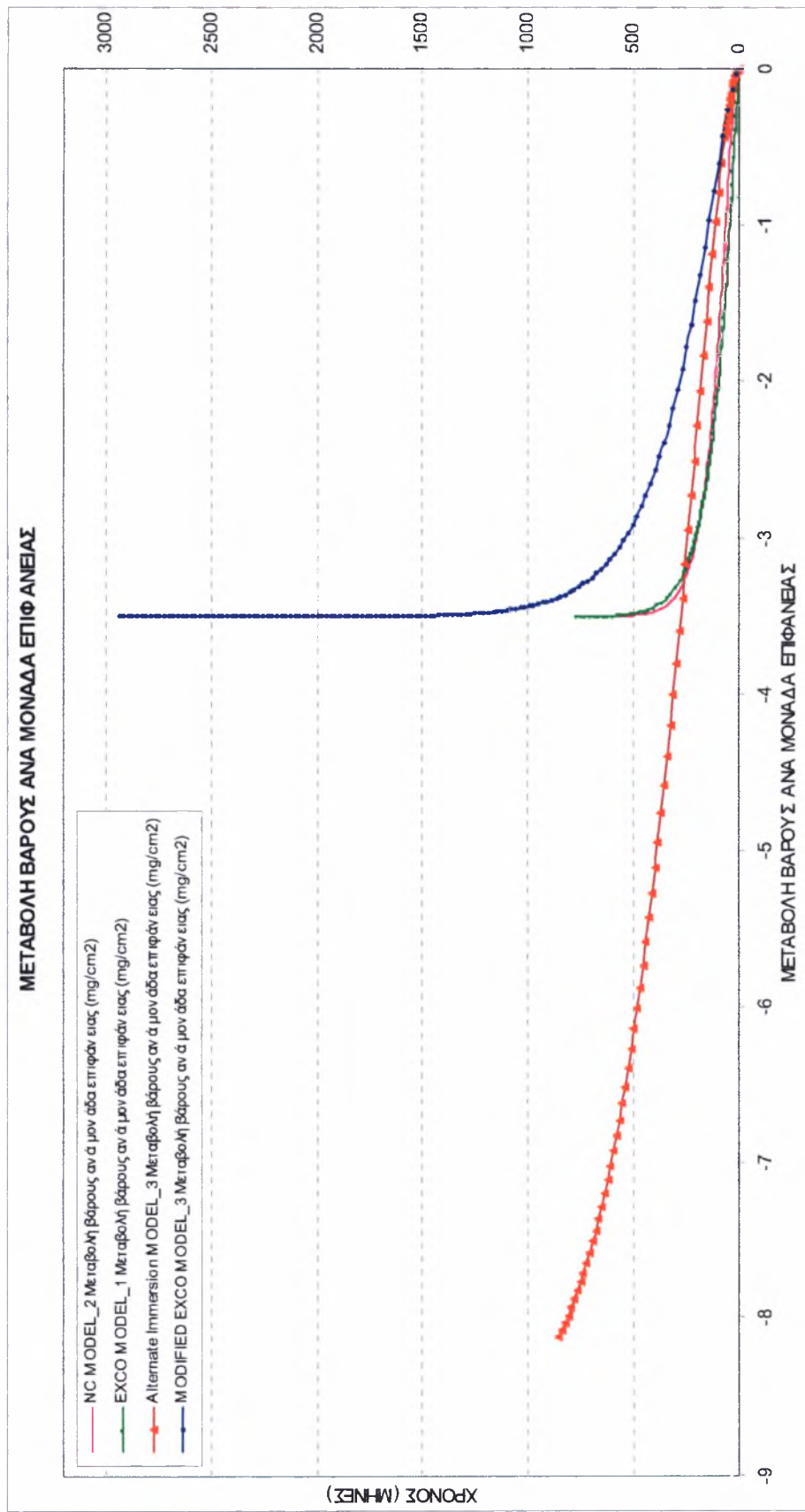
Επειδή η έννοια των πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης βασίζεται στην συμπίεση της κλίμακας του χρόνου και των συνθηκών στην οποία εξελίσσεται το φαινόμενο της διάβρωσης υπό φυσιολογικές καταστάσεις, η «αποσυμπίεση» του χρόνου στην κατάλληλη κλίμακα είναι δυνατόν να προσδώσει ικανοποιητική προσέγγιση των αποτελεσμάτων και του μοντέλου της φυσικής διάβρωσης. Πράγματι με βάση τη μέθοδο “Try and Error” επιχειρήθηκε η «αποσυμπίεση» του χρόνου για κάθε ένα από τα μοντέλα των πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης που διεξήχθησαν και σύγκρισή του με το αντίστοιχο μοντέλο φυσικής διάβρωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα γραφήματα των εικόνων 6-1 και 6-2.

### ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΒΑΡΟΥΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



**Εικόνα 6-1:** Σύμπτωση Μοντέλου Φυσικής Διάβρωσης και Μοντέλου Modified EXCO Test. Καμίακα Χρόνου: 48 ώρες έκθεσης Modified EXCO Test – 132 μήνες φυσικής έκθεσης.





**Εικόνα 6-2:** Σύμπτωση Μοντέλου Φυσικής Διάβρωσης και Μοντέλου EXCO Test. Κλίμακα Χρόνου: 96 ώρες έκθεσης EXCO Test – 564 μήνες φυσικής έκθεσης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι καλύτερη προσέγγιση επιτεύχθηκε με τα μοντέλα:

**Μοντέλο Φυσικής Διάβρωσης - Μοντέλο Modified EXCO Test**

και

**Μοντέλο Φυσικής Διάβρωσης - Μοντέλο EXCO Test**

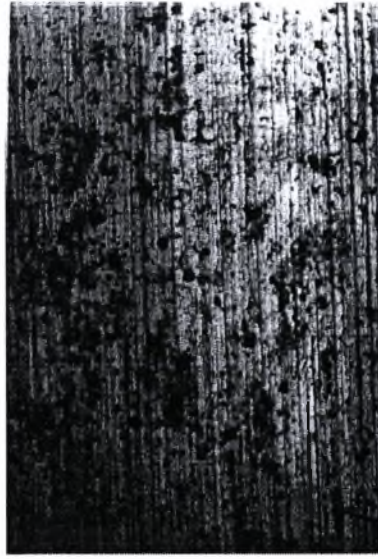
καθιστώντας τα βασικούς υποψήφιους για το τελικό αποτέλεσμα.

Αντίθετα για το μοντέλο Alternate Immersion Test, δεν επετεύχθει προσέγγιση με το μοντέλο φυσικής διάβρωσης και απορρίφθηκε. Τούτο ήταν αναμενόμενο, δεδομένης της διαφορετικής τάξης μεγέθους απώλειας μάζας ανά μονάδα επιφάνειας που καταγράφηκε κατά την εξέλιξη του πειράματος.

Ως κριτήριο τελικής επιλογής του πλέον αντιπροσωπευτικού μοντέλου από τα δύο βασικά υποψήφια, αποτέλεσε η αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων των μεταλλογραφικών και μεταλλογραφικών αναλύσεων των φυσικά διαβρωμένων δοκιμίων με τα αντίστοιχα δοκίμια των πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης. Με βάση το κριτήριο αυτό προέκυψε ότι το τελικό μοντέλο είναι το μοντέλο:

**Μοντέλο Φυσικής Διάβρωσης - Μοντέλο Modified EXCO Test**

Ενδεικτικά παρατίθενται φωτογραφίες από την στερεοσκοπία και την μεταλλογραφία των δοκιμίων (εικόνες 6-3 και 6-4), όπου είναι εμφανής η ομοιότητα μεταξύ των δοκιμίων φυσικής διάβρωσης (π.χ. NC6, NC7) με τα δοκίμια του πειράματος Modified EXCO Test (M2), ενώ δεν υπάρχει οπτική ομοιότητα με τα δοκίμια του πειράματος EXCO Test (A5, A8, A12).



**Εικόνα 6-3α:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.



**Εικόνα 6-3β:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.



**Εικόνα 6-3γ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.



**Εικόνα 6-3δ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.



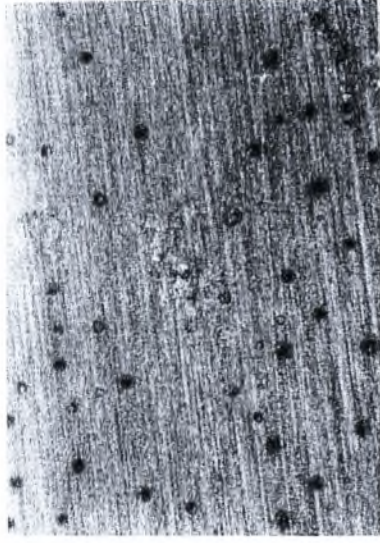
**Εικόνα 6-3ε:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.



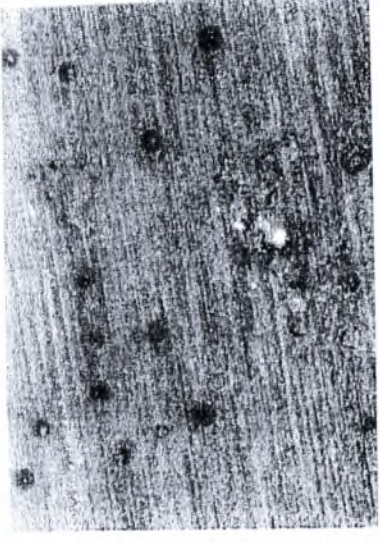
**Εικόνα 6-3στ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.



**Εικόνα 6-3ζ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 περιβάλλοντος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα 6-3η:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 περιβάλλοντος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



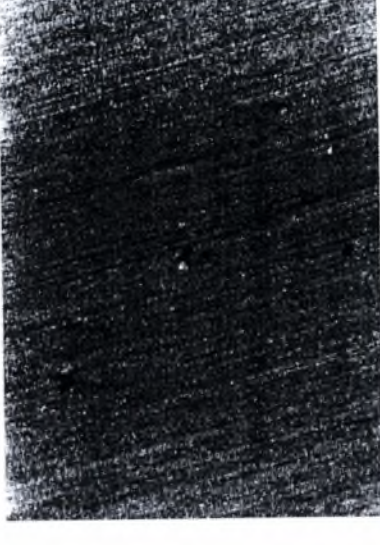
**Εικόνα 6-3θ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 περιβάλλοντος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα 6-3ι:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A5 περιβάλλοντος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα 6-3ια:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A5 περιβάλλοντος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα 6-3ιβ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A5 περιβάλλοντος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα 6-31γ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα 6-31δ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα 6-31ε:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα 6-31στ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα 6-31ζ:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα 6-31η:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα 6-4α:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC6 φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.



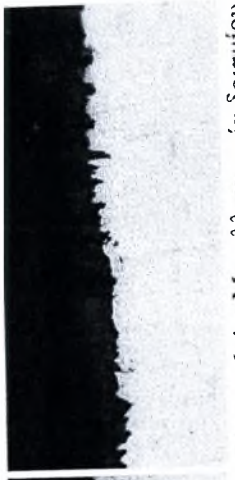
**Εικόνα 6-4β:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.



**Εικόνα 6-4γ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα 6-4δ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα 6-4ε:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα 6-4στ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα 6-4ζ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A5 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα 6-4η:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα 6-4θ:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα 6-4ι:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα 6-4ια:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

Σύμφωνα με το υπόψη μοντέλο, το αποτέλεσμα του πειράματος Modified EXCO Test διάρκειας έκθεσης 48 ωρών, προσεγγίζει ικανοποιητικά το αποτέλεσμα 132 μηνών ή αλλιώς 11 ετών φυσικής έκθεσης φύλλων AI 2024-T3 στο τυπικό περιβάλλον αεροπορικής βάσης της Ελλάδας με παρόμοιες φυσικά περιβαλλοντικές παραμέτρους. Ομοίως μπορούμε να έχουμε μια έγκαιρη εκτίμηση της αναμενόμενης διάβρωσης εντός ορισμένου χρόνου ή του χρόνου που θα προκαλέσει συγκεκριμένη διάβρωση σε μια κατασκευή από φύλλα του υπόψιν υλικού.

Συμπερασματικά το φαινόμενο της φυσικής διάβρωσης στην περιοχή έκθεσης προσομοιάστηκε πολύ ικανοποιητικά από το πείραμα επιταχυνόμενης διάβρωσης Modified EXCO Test για χρόνο έκθεσης μέχρι 48 ώρες.

Αντιθέτως το πείραμα επιταχυνόμενης διάβρωσης EXCO Test που καλύπτεται από την προδιαγραφή ASTM G34-90, δεν προσομοίωσε το φυσικό φαινόμενο καθώς η δράση του αποδείχθηκε πολύ έντονη για το περιβάλλον έκθεσης.

Τέλος το πείραμα επιταχυνόμενης διάβρωσης Alternate Immersion επίσης αποδείχθηκε πολύ έντονο στην διαβρωτική του δράση και δεν προσομοίωσε το περιβάλλον έκθεσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημανθεί ότι υπάρχουν πτητικά μέσα όπως αεράκατοι, αεροσκάφη ναυτικής συνεργασίας ή υδροπλάνα, των οποίων η χρήση είναι σε αρκετά έντονο διαβρωτικό περιβάλλον που θα μπορούσε κάλλιστα να προσομοιωθεί σε πείραμα Alternate Immersion ή EXCO Test. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα πυροσβεστικά αφη CL-215/415. Τούτο θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

Όσον αφορά τον χαρακτηρισμό της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος της αεροπορικής βάσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 6-5, προέκυψε ότι κατατάσσεται στα μέγιστα όρια της κατηγορίας 3 και στα ελάχιστα όρια της κατηγορίας 4 σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 9223, που αντιστοιχεί σε τυπικό παραθαλάσσιο περιβάλλον στο οποίο επικρατεί ήπιο κλίμα με μέτρια έως υψηλά ποσοστά σχετικής υγρασίας. Πρακτικά τούτο σημαίνει ότι ο αναμενόμενος ρυθμός διάβρωσης είναι της τάξης των 0.2  $\mu\text{m}/\text{y}$ .

Χαρακτηριστικά	Τιμή	Κατηγοριοποίηση Τάξης	Κατηγορία Περιβάλλοντος	Ρυθμός Διάβρωσης ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
Ρυθμός Απόθεσης $\text{Cl}_2$ ( $\text{mg}/\text{m}^2 \text{day}$ )	45.2	S1	3	ST: 0.025-0.2 LT: 0.02-0.2
Ρυθμός Απόθεσης $\text{SO}_2$ ( $\text{mg}/\text{m}^2 \text{day}$ )	29.5	P1		
Χρόνος Ύγρανσης (hrs)	0-12 μήνες: 2322 hrs	T3		
	12-24 μήνες: 2694 hrs	T4	3-4	ST: περιοχή 0.2 LT: περιοχή 0.2
	M.O.: 2508 hrs/έτος	T3max – T4min		

**Εικόνα 6-5:** Χαρακτηρισμός διαβρωτικότητας περιβάλλοντος αεροδρομίου Ν. Αγχιάλου.





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ “Α”

### ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

Καθόλη την διάρκεια της εργασίας απαιτήθηκε η χρήση συσκευών και εξοπλισμού που υπήρχαν στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Όπου απαιτήθηκε κατασκευάστηκαν ιδιοσυσκευές για την εκτέλεση των πειραμάτων (π.χ. συσκευή Alternate Immersion, εξέδρα έκθεσης δοκιμίων κτλ). Στις επόμενες παραγράφους, για λόγους πληρότητας της εργασίας, θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των εν λόγω συσκευών.

#### **α. Συσκευή ζύγισης**

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη ζύγιση όλων δοκιμίων είναι η Tare Model 300, κατασκευής Denver Instrument Company DE Series. Η εν λόγω συσκευή δίνει ακρίβεια μέτρησης  $\pm 0.001gr$ .

#### **β. Συσκευή μέτρησης pH – θερμοκρασίας διαλυμάτων**

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της οξύτητας (pH) και της θερμοκρασίας των διαλυμάτων στα πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης είναι η pH-meter/ $^{\circ}C$ -meter CONSORT C231 με τα εξής χαρακτηριστικά:

(1) Εύρος μέτρησης pH: 0 – 14 pH με ανάλυση 0.01 pH

(2) Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας ( $^{\circ}C$ ): 0 - 100 $^{\circ}C$  με ανάλυση 0.5 $^{\circ}C$ .

Η ρύθμιση (calibration) του μετρητή οξύτητας δ/τος (pH-meter) της συσκευής γίνεται με χρήση προτύπων υγρών με pH: 4.01, pH: 6.87 και pH: 9.18 στους 25 $^{\circ}C$ .

Μετά κάθε μέτρηση το στέλεχος μέτρησης (pH-probe) εμβαπτίζεται και ξεπλένεται με απιονισμένο νερό και στη συνέχεια εμβαπτίζεται-διατηρείται σε υγρό 3.5M KCl.

#### **γ. Συσκευές Εκχόνδρισης – Λείανσης - Στίλβωσης**

Εγινε με χρήση των συσκευών Knuth Rotor-3 και Dap-V (Struers) του εργαστηρίου Υλικών.

#### **δ. Συσκευή κοπής**

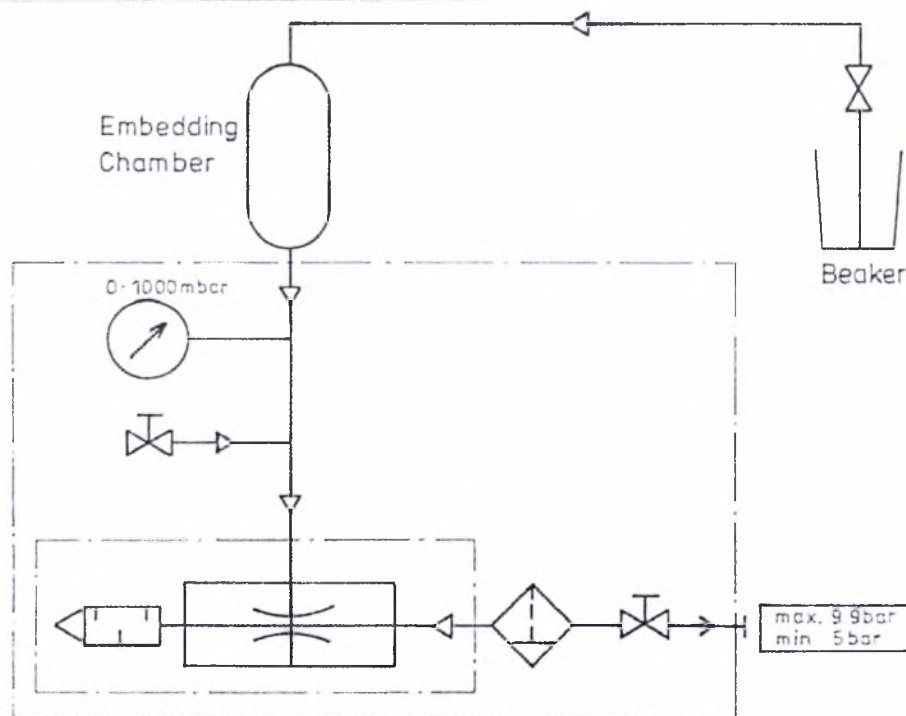
Εγινε με χρήση κοπτικού μηχανήματος λεπτών τομών Minitom εταιρείας Struers (εικόνα A-1).



**Εικόνα A-1:** Συσκευή κοπής Minitom Struers

### ε. Συσκευή εγκιβωτισμού στο κενό

Χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός του εργαστηρίου Υλικών και συγκεκριμένα ειδική συσκευή Eronac με αντλία κενού Heto-Sue 3 εταιρείας Struers για τον εγκιβωτισμό των δειγμάτων που ελήφθησαν από τα δοκίμια (εικόνα A-2). Ο εγκιβωτισμός των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε κενό αέρος ώστε να διασφαλισθεί η είσοδος της εποξικής ρητίνης Eprofix και στις πλέον διαβρωμένες και δυσπρόσιτες περιοχές του δείγματος στις οποίες διαφορετικά θα παρέμενε δεσμευμένος αέρας. Με τον τρόπο αυτό το εγκιβωτισμένο δείγμα κατέσται δυνατό να κατεργασθεί για μεταλλογραφική εξέταση (Εκχόνδριση-Λείανση-Στίλβωση) χωρίς τον κίνδυνο να καταστραφεί η διαβρωμένη περιοχή που πρόκειται να παρατηρηθεί.



Εικόνα A-2: Συσκευή εγκιβωτισμού στο κενό Eronac

#### στ. Συσκευή καθαρισμού με υπερήχους (ultrasonic cleaning)



Εικόνα A-3: Συσκευή ultrasonic cleaning

#### ζ. Μικροσκόπιο

Για τη μεταλλογραφική εξέταση των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Aristomet (Leitz) εφοδιασμένο με δυνατότητα μεγέθυνσης 50, 100, 200, 500 και 1000 φορές. Επίσης το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο φέρει σύστημα φωτογράφισης Leica-Wild MPS 52 (εικόνα A-4).

Σημειώνεται ότι η μεταλλογραφική εξέταση επικεντρώθηκε στα δοκίμια που εμφάνισαν exfoliation corrosion. Επίσης έγινε φωτογράφιση των παρατηρουμένων δοκιμίων.

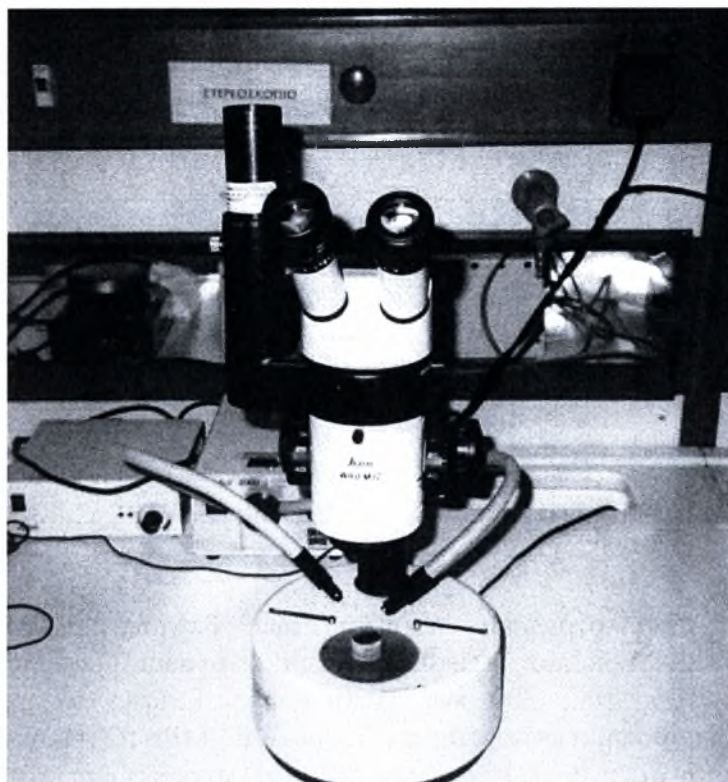


Κάμερα Συστήματος  
Φωτογράφισης

Εικόνα A-4: Μικροσκόπιο Aristomet Leitz

#### η. Στερεοσκόπιο

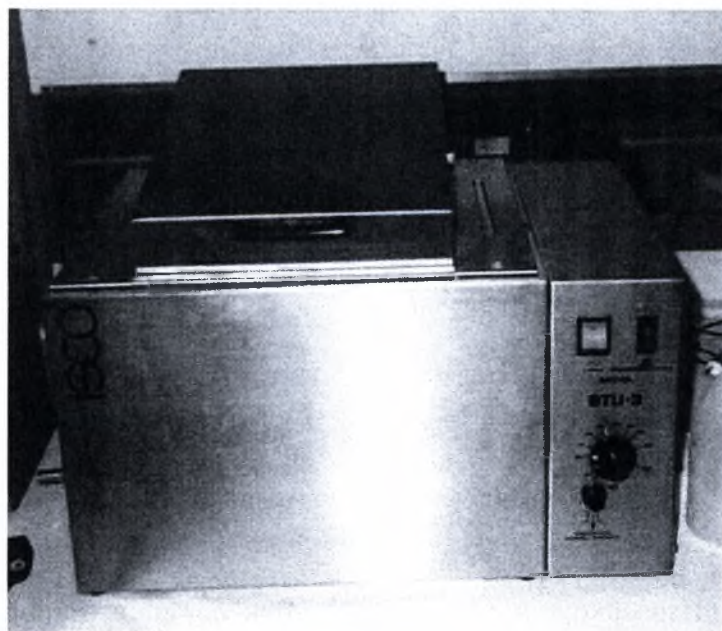
Για τη στερεοσκοπική εξέταση του κάθε δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο M3Z-LEICA μεγεθυντικής ικανότητας  $\times 6.5 - \times 40$  του εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας το οποίο είναι εφοδιασμένο με σύστημα φωτογράφισης (εικόνα A-5).



Εικόνα A-5: Στερεοσκόπιο M3Z-Leica

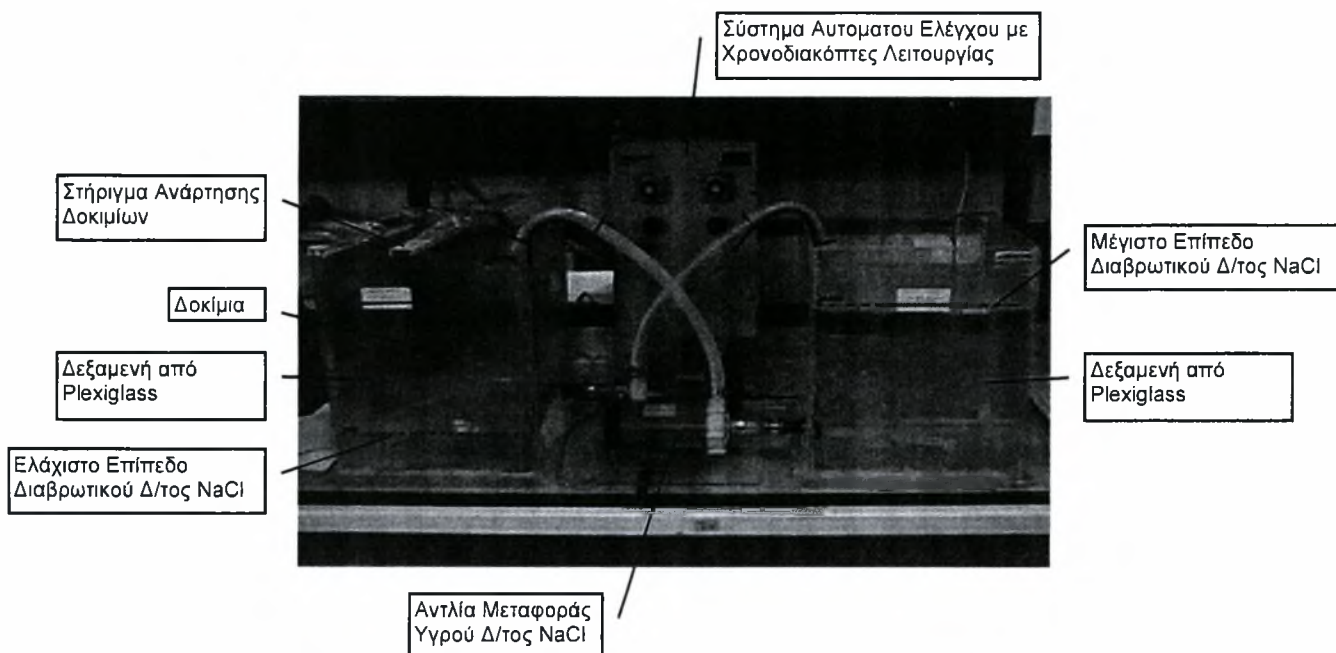
**θ. Συσκευή-δεξαμενή διατήρησης θερμοκρασίας υγρών σε προκαθορισμένα επίπεδα**

Η συσκευή που απεικονίζεται στην εικόνα A-6, χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων Modified EXCO Test.



Εικόνα A-6: Συσκευή διατήρησης θερμοκρασίας

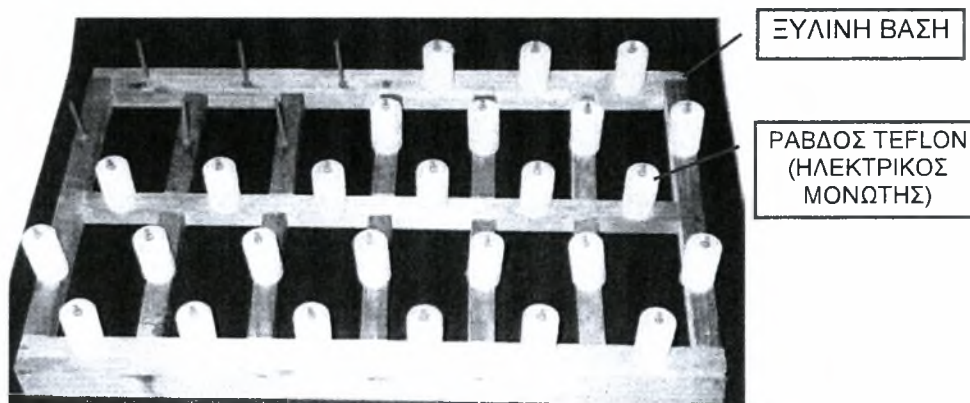
## 1. Ιδιοσυσκευή Alternate Immersion



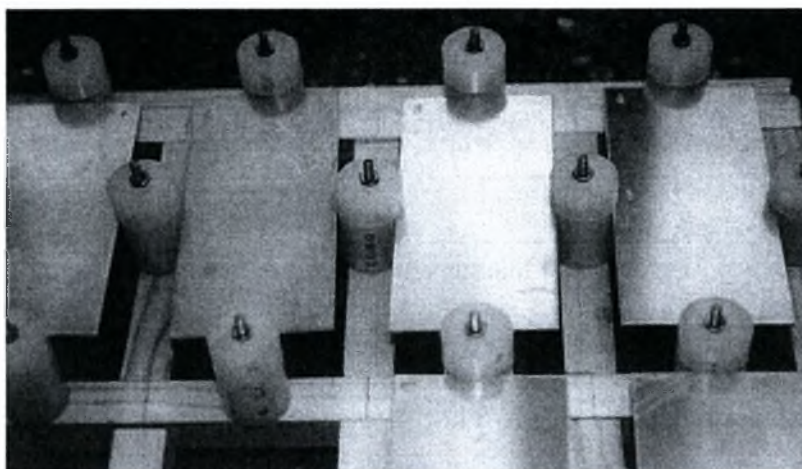
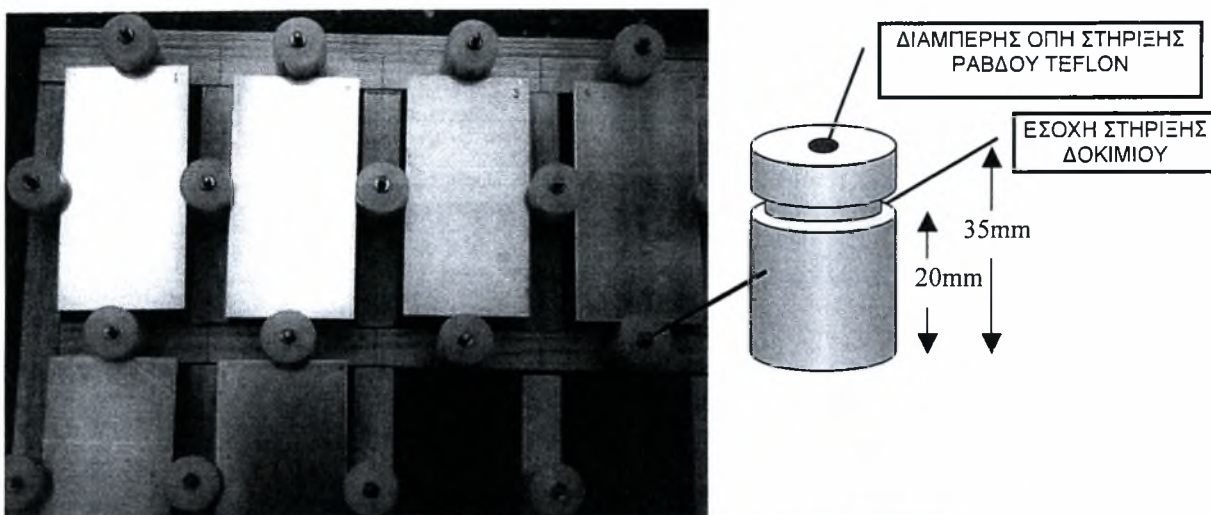
Εικόνα A-7: Ιδιοσυσκευή Alternate Immersion

### 1α. Εξέδρα έκθεσης δοκιμίων (ιδιοκατασκευή)

Η εξέδρα φυσικής έκθεσης δοκιμίων αποτέλεσε ιδιοκατασκευή, λεπτομέρειες της οποίας φαίνονται στις εικόνες A-8 και A-9.



Εικόνα A-8: Εξέδρα έκθεσης δοκιμίων φυσικής διάβρωσης



Εικόνα Α-9: Εξέδρα έκθεσης δοκιμίων φυσικής διάβρωσης

#### ιβ. Συσκευές Μετεωρολογικού Σταθμού

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό για την παρακολούθηση και καταγραφή των μετεωρολογικών στοιχείων κατά την περίοδο διεξαγωγής των πειραμάτων φυσικής διάβρωσης των δοκιμίων είναι οι ακόλουθες:

- (1) Υδραργυρικό Βαρόμετρο Fortin 5392
- (2) Βαρογράφος Instruments 421
- (3) Ξηρό Θερμόμετρο Siebert 1148/52
- (4) Υγρό Θερμόμετρο Siebert 1146/52
- (5) Μεγιστοβάθμιο Θερμόμετρο Richer 1146/52
- (6) Ελαχιστοβάθμιο Θερμόμετρο Siebert 7816825
- (7) Θερμογράφος Lambrecht 412225
- (8) Υγρογράφος Lambrecht
- (9) Βροχόμετρο Αναγνώστου AM 450 10/ΚΟ
- (10) Βροχογράφος Lambrecht 420106
- (11) Ανεμογράφος Vaisala 46405
- (12) Ανεμόμετρο Vaisala
- (13) Ηλιογράφος Lambrecht 350140
- (14) Εξατμισόμετρο Λεκάνης
- (15) Piche

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ “B”

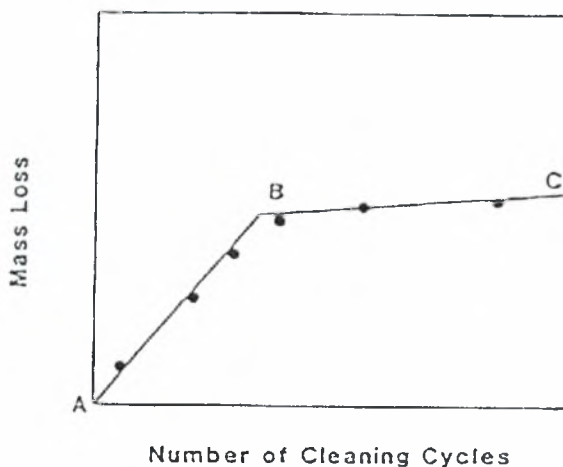
### ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ [1]

Οι διαδικασίες καθαρισμού δοκιμίων από τα προϊόντα της διάβρωσης μπορούν να διακριθούν σε τρεις (3) γενικές κατηγορίες, την μηχανική, την χημική και την ηλεκτρολυτική.

Ιδεατά η κάθε διαδικασία θα έπρεπε να αφαιρεί τα προϊόντα της διάβρωσης χωρίς να επιδρά στο μεταλλικό υλικό. Στην πράξη όμως τούτο δεν είναι εφικτό. Για τον καθορισμό του ορίου πέραν του οποίου η συνέχιση του καθαρισμού δεν έχει ουσιαστική επίδραση στα αποτελέσματα της μέτρησης, εφαρμόστηκε η κάτωθι διαδικασία.

Η εφαρμοζόμενη διαδικασία καθαρισμού επαναλήφθηκε αρκετές φορές, ακολουθούμενη από μέτρηση ακριβείας της απώλειας μάζας του δοκιμίου.

Η απώλεια μάζας τοποθετήθηκε σε γράφημα σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλήψεων καθαρισμού. Η μορφή του γραφήματος που λαμβάνεται είναι αντίστοιχη της εικόνας B-1



**Εικόνα B-1:** Γράφημα Απώλειας μάζας σε σχέση με τις επαναλήψεις καθαρισμού [1]

Διακρίνονται δύο τμήματα AB και BC. Το τμήμα BC αντιστοιχεί στην απώλεια μάζας του υλικού μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης. Η απώλεια δε είναι κατά προσέγγιση ίση με την τιμή στο σημείο B.

Η βέλτιστη μέθοδος καθαρισμού είναι εκείνη που παρέχει την μικρότερη δυνατή κλίση στο τμήμα BC.

### **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ - REFERENCES**

1. Standard ASTM G1-90





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ “Γ”

### ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ [1,2]

Οι ρυθμοί διάβρωσης εκφράζονται ποικιλοτρόπως στη βιβλιογραφία όπως φαίνεται στον πίνακα Γ-1 που ακολουθεί.

**Πίνακας Γ-1:** Εκφράσεις Ρυθμού Διάβρωσης [1,2]

ΕΚΦΡΑΣΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ & ΣΧΟΛΙΑ
Απώλεια βάρους (g ή mg) Ποσοστό μεταβολής του βάρους	Ανεπαρκής μέθοδος – το σχήμα του δοκιμίου και ο χρόνος έκθεσης επηρεάζουν τα αποτελέσματα
Milligrams per square decimeter per day (mdd) Grams per square decimeter per day Grams per square centimeter per hour Grams per square meter per day hour Grams per square inch per hour Moles per square centimeter per hour	Καλή μέθοδος – αλλά οι εκφράσεις αυτές δεν δίνουν τους βαθμούς διείδυσης.
Inches per year Inches per month Millimeters per year	Καλύτερη έκφραση. Δίνει τους βαθμούς διείδυσης.
Mils per year (mpy)	Ο καλύτερος τρόπος. Εκφράζει τη διείδυση χωρίς δεκαδικά ή μεγάλα νούμερα

Η απώλεια βάρους σε γραμμάρια ή χιλιοστά του γραμμαρίου και το ποσοστό μεταβολής του βάρους του υλικού μετά την έκθεση στο διαβρωτικό περιβάλλον είναι ατελείς μέθοδοι για την έκφραση της διάβρωσης. Είναι φανερό ότι και οι δύο αυτές εκφράσεις επηρεάζονται από τη διάρκεια της έκθεσης. Επίσης το σχήμα του δοκιμίου έχει επίδραση στα αποτελέσματα.

Η επόμενη ομάδα εκφράσεων είναι απλά παραλλαγές της γενικευμένης έκφρασης απώλειας βάρους ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου. Αντίθετα από τις δύο πρώτες εκφράσεις, αυτές περιλαμβάνουν την επίδραση της εκτιθέμενης επιφάνειας και τη διάρκεια της έκθεσης. Ωστόσο, τα παραπάνω έχουν σοβαρό μειονέκτημα επειδή δεν εκφράζουν την αντίσταση σε διάβρωση σε όρους διείδυσης. Από μηχανολογικής απόψεως, ο βαθμός της διείδυσης της διάβρωσης ή της λέπτυνσης ενός δομικού μέλους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευθέως για την πρόβλεψη της ζωής ενός δεδομένου εξαρτήματος.

Οι επόμενες τέσσερις εκφράσεις που περιλαμβάνουν ίντσες διείδυσης ανά έτος, ίντσες διείδυσης ανά μήνα, χιλιοστόμετρα διείδυσης ανά έτος και mils διείδυσης ανά έτος (mpy) δηλώνουν αντίσταση σε διάβρωση εκφρασμένη άμεσα σε όρους διείδυσης. Υπό το πρίσμα της ευκολίας στη χρήση προτιμάται το mpy εφόσον ο βαθμός διάβρωσης των πρακτικά χρήσιμων υλικών διαφέρει μεταξύ 1 και 200 mpy περίπου. Έτσι, είναι δυνατή η παρουσίαση των στοιχείων της διάβρωσης χρησιμοποιώντας μικρά ακέραια νούμερα.

Για τους παραπάνω λόγους η έκφραση mpy είναι ο πλέον επιθυμητός τρόπος έκφρασης ρυθμών διάβρωσης. Αυτή η έκφραση υπολογίζεται άμεσα από την απώλεια βάρους των μεταλλικών δοκιμίων, κατά τα πειράματα διαβρωτικών προσβολών, από την ακόλουθη σχέση:

$$mpy = \frac{534W}{DAT}$$

όπου

*W*: απώλεια βάρους, mg.

*D*: πυκνότητα υλικού δοκιμίου, g/cm<sup>3</sup>.

*A*: επιφάνεια δοκιμίου, sq.in.

*T*: χρόνος έκθεσης.

Γενικότερα ο ρυθμός διάβρωσης υπολογίζεται από την γενική σχέση:

$$(\text{Corrosion Rate}) = \frac{(K \times W)}{(A \times T \times D)}$$

όπου

*K*: σταθερά που καθορίζει την έκφραση του ρυθμού διάβρωσης.

*W*: απώλεια βάρους σε g με ακρίβεια στο πλησιέστερο 1mg.

*D*: πυκνότητα υλικού δοκιμίου σε g/cm<sup>3</sup>.

*A*: επιφάνεια δοκιμίου σε cm<sup>2</sup> με ακρίβεια στο πλησιέστερο 0.01cm<sup>2</sup>.

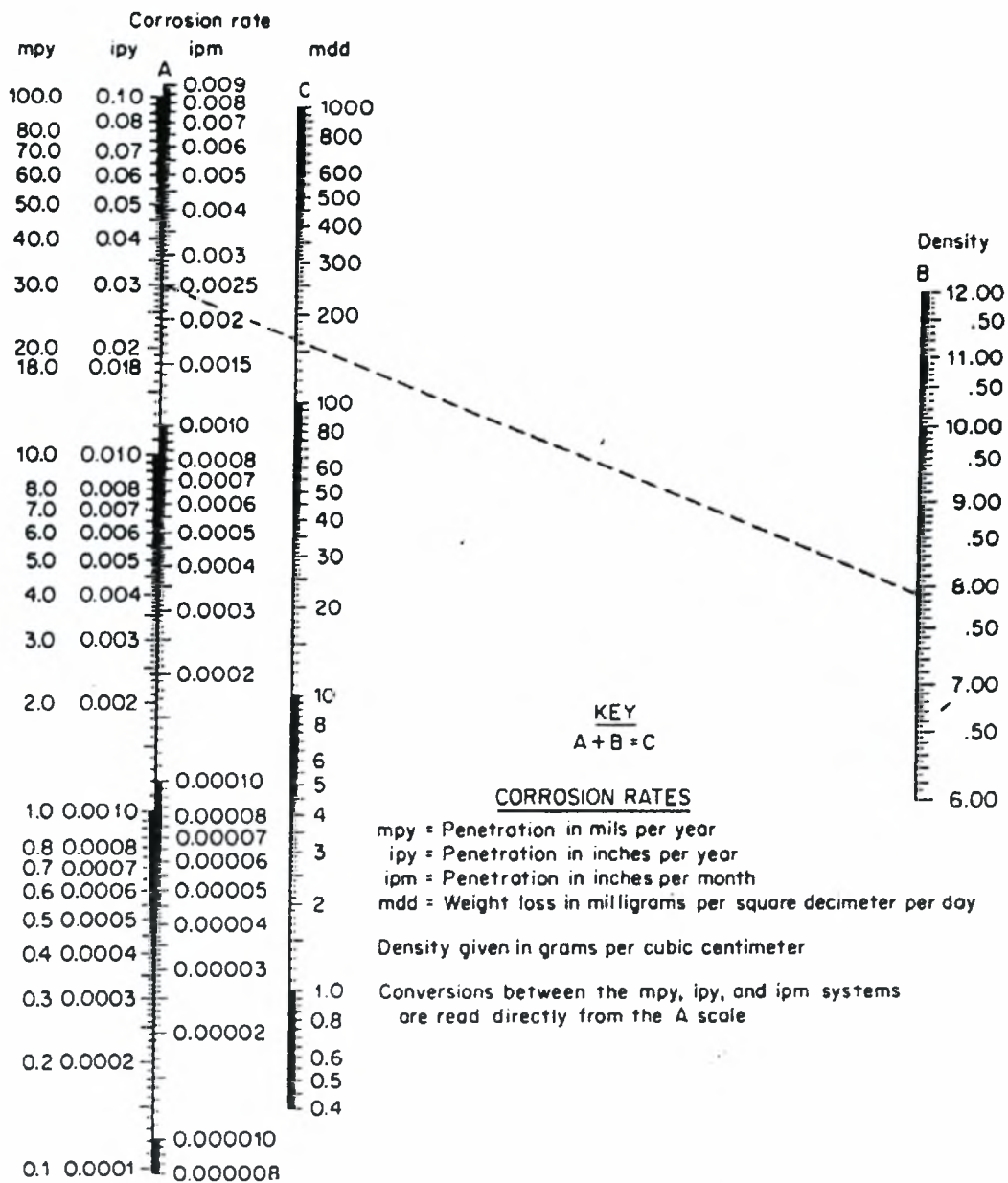
*T*: χρόνος έκθεσης σε ώρες (hrs) με ακρίβεια στο πλησιέστερο 0.01hrs.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι πιο συνηθισμένες εκφράσεις του ρυθμού διάβρωσης φαίνονται στον πίνακα Γ-2:

**Πίνακας Γ-2: Εκφράσεις Ρυθμού Διάβρωσης [3]**

	Έκφραση Ρυθμού Διάβρωσης	Σύμβολο	Σταθερά K
1	Mils per year	mpy	$3.45 \times 10^6$
2	Inches per year	ipy	$3.45 \times 10^3$
3	Inches per month	ipm	$2.87 \times 10^2$
4	Millimeters per year	mm/y	$8.76 \times 10^4$
5	Micrometers per year	μm/y	$8.76 \times 10^7$
6	Picometers per second	pm/s	$2.78 \times 10^6$
7	Grams per square meter per hour	g/m <sup>2</sup> h	$1.00 \times 10^4 \times D$
8	Milligrams per square decimeter per day	mdd	$2.40 \times 10^6 \times D$
9	Micrograms per square meter per second	μg/m <sup>2</sup> s	$2.78 \times 10^6 \times D$

Το νομογράφημα που επιτρέπει γρήγορη αντιστοίχιση των παραπάνω τρόπων έκφρασης των ρυθμών διάβρωσης απεικονίζεται στην εικόνα Γ-1.



Εικόνα Γ-1: Γράφημα Απώλειας μάζας σε σχέση με τις επαναλήψεις καθαρισμού

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ - REFERENCES

1. Standard ASTM G1-90, Paragraph 8.
2. Mattson E., "Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers", Ellis Horwood Ltd, pp.177.
3. Baboian R., "Corrosion Tests and Standards", ASTM 1995, pp.22.



**ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΙ 2024-Τ3**

	ΜΑΙΟΣ 1998			ΙΟΥΝΙΟΣ 1998			ΙΟΥΛΙΟΣ 1998			ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 1998			ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1998		
	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ
Δεκαήμερο έκθεσης	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Μ.Ο. Θερμοκρασίας	18,6667	18,1533	23,2	24,9133	25,68	27,2267	28,12	27,4867	32,5	30,0333	26,3067	29,18	23,9	22,2333	21,3267
Ελάχιστη Θερμοκρασία	13,08	13,66	16	17,18	17,72	18,66	19,44	18,08	22,62	22,34	11,8	21,36	16,32	15,64	15,88
Μ.Ο.Ελάχιστης Θερμοκρασίας	14,62	14,8	17,505	19,78	19,46	21,7	22,2	21,16	24,455	24,63	17,63	22,305	18,74	17,22	16,76
Μέγιστη Θερμοκρασία	22,64	21,98	26,84	28,9	29,32	30,96	32,78	31,68	37,06	34,87	30,14	34,3	27,7	27,6	24,13
Μ.Ο.Μέγιστης Θερμοκρασίας	20,28	19,66	23,43	25,27	27,35	28,62	30,25	29,31	32,995	32,125	28,16	30,105	25,65	24,69	22,415
Δνση Ανέμου															
Ενταση Ανέμου (knots)															
Σχετική Υγρασία	60,2333	69,8	75,4333	60,2333	39,9	53,9333	43,5	44	49,4667	46,7	57,8333	65,0333	61	56,3333	57,4333
Απόλυτη Υγρασία	92,2067	105,56	138,717	139,513	98,2167	143,903	122,213	117,693	147,55	142,947	144	164,837	132,8	108,937	106,793
Μ.Ο. Σημείου Δρόσου	94,4333	119,6	147,9	162,633	103,5	166,833	137,6	135,367	156,067	166,967	171	174,733	156,2	119,1	120,767
Ολική Ακτινοβολία (ώρες)	75,5	55,3	103,9	108,7	123,2	119,2	122,7	128,3	127,5	111,8	104,6	114,1	71,5	84	72,6
Συνολικό ύψος βροχής		80,4			3,6			0			3			9,5	
Ημέρες βροχής>1,0 mm		10			1			0			1			3	

	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1998			ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 1998			ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 1998			ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 1999			ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 1999		
	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ
Δεκαήμερο έκθεσης	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Μ.Ο. Θερμοκρασίας	21,2533	17,5933	18,7067	16,3933	11,2667	9,99333	8,97333	6,27333	4,88667	8,24667	8,48	7,11333	5,14667	7,69333	7,71333
Ελάχιστη Θερμοκρασία	15	12,02	13	10,96	6,88	7,51	7,16	3,56	1,54	4,9	3,58	3,08	0,84	3,58	3,54
Μ.Ο.Ελάχιστης Θερμοκρασίας	15,93	12,77	13,115	11,71	7,06	7,905	7,09	4,205	1,48	5,13	4,1	3,275	1,09	3,79	4,11
Μέγιστη Θερμοκρασία	25,71	23,04	24,1	21,36	15,64	11,72	11,58	9,17	9,1	12,22	13,54	11,54	9,38	12,16	12,08
Μ.Ο.Μέγιστης Θερμοκρασίας	23,425	20,31	20,31	19,01	13,63	11,03	10,96	7,605	6,475	10,04	10,54	9,35	6,85	9,95	11,245
Δνση Ανέμου															
Ενταση Ανέμου (knots)															
Σχετική Υγρασία	65,4	66,9333	68,0667	63,9667	72,3333	84,8667	75,6333	75,8333	85,9	78,9	73,5	79,1667	73,2333	65,7333	48,9333
Απόλυτη Υγρασία	121,203	102,353	97,41	84,5667	73,0667	78,3667	66,1	54,5333	54,8	63,7667	61,12	56,4367	48,0033	51,1967	42,7967
Μ.Ο. Σημείου Δρόσου	139,533	109,367	90,8	85,2	60,9	75,2	45	22,3667	8,44667	45,7333	37,6	14,2667	3,1	11,3333	16,1667
Ολική Ακτινοβολία (ώρες)	73,2	59,9	59,5	54,1	41,1	7,3	26,8	16,9	33,2	37,2	49,4	48,8	43	47,3	48,5
Συνολικό ύψος βροχής		6,9			151,7			69			42,5			36,3	
Ημέρες βροχής>1,0 mm		2			9			10			5			8	

	ΜΑΡΤΙΟΣ 1999			ΑΠΡΙΛΙΟΣ 1999			ΜΑΙΟΣ 1999			ΙΟΥΝΙΟΣ 1999			ΙΟΥΛΙΟΣ 1999		
	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ
Δεκαήμερο έκθεσης	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Μ.Ο. Θερμοκρασίας	12,7267	8,68667	11,8	14,0333	16,5067	17,5	19,1	21,5867	27,8467	26,3467	27,5067	25,7133	28,43	27,4867	30,18
Ελάχιστη Θερμοκρασία	6,68	5,1	7,44	8,78	9,38	9,6	12,8	13,94	16,18	18,4	19,36	17,44	20,36	20,49	21,82
Μ.Ο.Ελάχιστης Θερμοκρασίας	7,27	5,25	7,565	9,91	11,35	11,9	14,39	16,12	18,015	21,12	22,48	20,12	24,215	23,945	24,74
Μέγιστη Θερμοκρασία	18,36	12,24	15,58	18,38	21,88	22,3	22,6	25,62	28,96	30,62	31,54	30,22	32,18	27,44	29,61
Μ.Ο.Μέγιστης Θερμοκρασίας	15,63	10,95	13,125	15,84	18,98	19,44	21,085	23,2	24,905	27,99	29,05	27,78	29,77	27,5	28,47
Δνση Ανέμου															
Ενταση Ανέμου (knots)															
Σχετική Υγρασία	58,2667	78,0333	83,6	73,1	56,1	68,0333	64,5667	62,1667	63,1333	56,9333	50,8	50,2667	38,4667	42,6	46,0333
Απόλυτη Υγρασία	61,52	65,2233	80,6767	84,31	75,4067	98,95	105,163	117,217	123,377	143,753	136,627	124,707	151,157	157,193	170,193
Μ.Ο. Σημείου Δρόσου	38,1667	48,0667	63,9	86,9	65,4667	109,9	116,367	135,733	125,167	169,033	160,133	143,2	177,633	181,8	178,867
Ολική Ακτινοβολία (ώρες)	78,5	42,1	45,2	61,2	90,1	86,3	69,2	75,6	109,4	109	113,5	101,2	109,9	100,7	117,3
Συνολικό ύψος βροχής		89,2			37			14,2			2,8			32,5	
Ημέρες βροχής>1,0 mm		7			4			2			1			3	

	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 1999			ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1999			ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1999			ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 1999			ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 1999		
	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ
Δεκαήμερο έκθεσης	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Μ.Ο. Θερμοκρασίας	27,8	29,6733	25,48	23,2	21,96	23,2867	20,18	17,58	19,1675	13,915	13,12	8,8675	8,87	10,195	8,30325
Ελάχιστη Θερμοκρασία	20,22	21,36	18,67	18,06	16,86	16,14	15,64	13,32	15,82	10,92	10,26	5,86	5,32	6,48	5,327
Μ.Ο.Ελάχιστης Θερμοκρασίας	22,33	23,54	20,48	18,985	17,67	17,725	16,32	14,31	15,62	11,69	10,71	6,17	5,4	6,45	5,4835
Μέγιστη Θερμοκρασία	31,88	34,37	29,52	27,38	26,26	28,12	26,66	22,78	24,81	18,16	16,3	13,76	14,84	16,54	11,89
Μ.Ο.Μέγιστης Θερμοκρασίας	29,1	31,82	27,76	25,135	23,96	25,57	24,21	20,23	21,585	16,46	14,97	11,76	11,81	13,27	10,79
Δνση Ανέμου															
Ενταση Ανέμου (knots)															
Σχετική Υγρασία	62,3	54,8	60,5733	72,0333	71	74,3	66,075	70,75	83,15	78,525	77,9	74,75	79,975	79,025	76,235
Απόλυτη Υγρασία	171,123	164,17	145,425	158,307	136,82	141,397	116,865	110,038	124,248	94,44	87,3775	65,6325	67,05	73,795	62,415
Μ.Ο. Σημείου Δρόσου	196,133	186,667	169,183	172,667	162,367	165,433	129,825	115,8	134,725	104,425	95,725	44,05	49,525	65,875	37,6
Ολική Ακτινοβολία (ώρες)	113	113,1	97,1	72,1	53,5	84,8	81,4	55	54,9	25,3	10,4	39,8	48,8	48,7	21
Συνολικό ύψος βροχής		3			27,8			40,2			183,3			57,3	
Ημέρες βροχής>1,0 mm		1			4			4			6			4	

	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2000			ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2000			ΜΑΡΤΙΟΣ 2000			ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2000			ΜΑΙΟΣ 2000		
	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ	Α ΔΕΚ	Β ΔΕΚ	Γ ΔΕΚ
Δεκαήμερο έκθεσης	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
Μ.Ο. Θερμοκρασίας	4,59	4,1925	3,64425	7,96	8,19	5,60525	7,835	8,225	10,21	13,6	14,545	17,585	15,965	20,875	23,0125
Ελάχιστη Θερμοκρασία	0	1,96	-0,881	3,42	4,82	2,622	2,6	4,28	5,055	8,54	8,8	12,48	10,36	15,14	15,76
Μ.Ο.Ελάχιστης Θερμοκρασίας	0,22	2,12	-0,0305	3,77	4,95	2,811	3,06	4,56	6,1025	9,85	10,66	13,98	12,41	17,37	18,87
Μέγιστη Θερμοκρασία	8,54	7,68	10,02	14,78	12,52	8,978	15,04	13,42	16,51	19,44	20,12	22,78	21,08	26,56	27,76
Μ.Ο.Μέγιστης Θερμοκρασίας	5,805	6,19	7,035	11,53	10,72	7,944	11,5	11,39	13,71	16,97	17,58	20,13	18,91	23,89	25,58
Δνση Ανέμου															
Ενταση Ανέμου (knots)															
Σχετική Υγρασία	71,525	74,45	65,6125	73,05	79,025	77,295	63,925	72,7	76,275	66,075	77,075	68,625	71,375	60,05	56,9
Απόλυτη Υγρασία	40,49	47,81	38,2988	57,6775	65,4225	51,6345	50,5975	57,9475	73,1713	76,4475	94,225	101,35	96,6975	107,688	113,208
Μ.Ο. Σημείου Δρόσου	-18,475	-4,625	-27,725	29,575	46,4	15,2025	8,875	29,75	58,45	68,725	102,6	113,35	106,95	122,35	129,15
Ολική Ακτινοβολία (ώρες)	58,1	30,3	78,5	65,3	33,6	32	85,3	64,2	63	60,1	66,3	79,2	91,3	85,6	122,1
Συνολικό ύψος βροχής		5,9			29,8			21,3			6,6			10,7	
Ημέρες βροχής>1,0 mm		2			6			6			2			2	







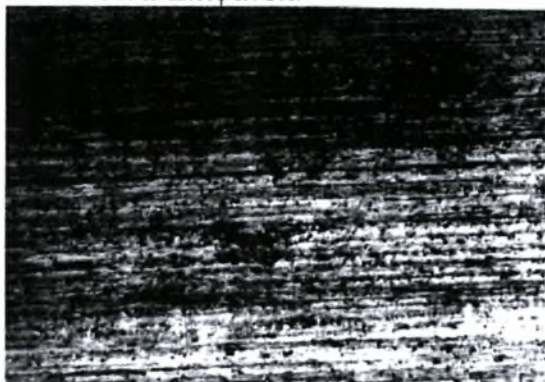


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ “ΣΤ”

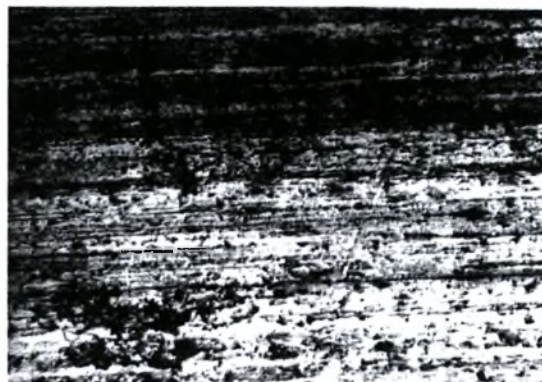
### ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΦΥΣΙΚΑ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ Al 2024-T3 (NATURAL CORROSION TEST).

#### Δοκίμιο NC1

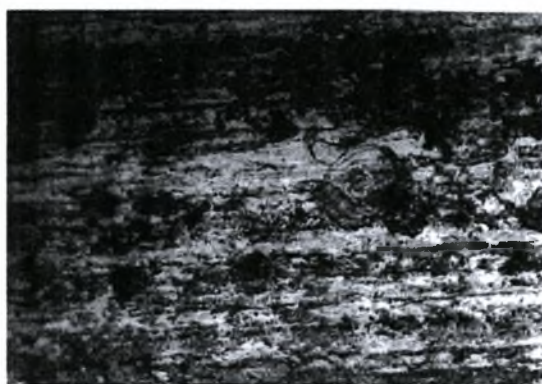
##### Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-1:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.

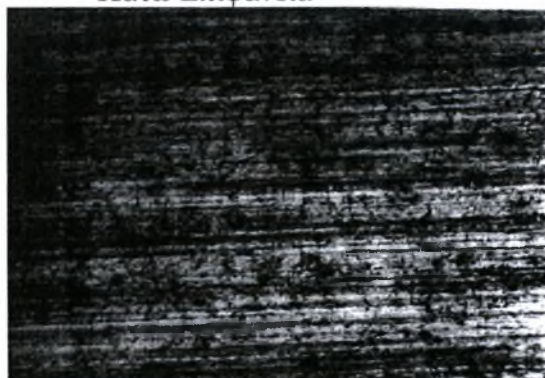


**Εικόνα ΣΤ-2:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες. Ίδια θέση με εικόνα ΣΤ-1.

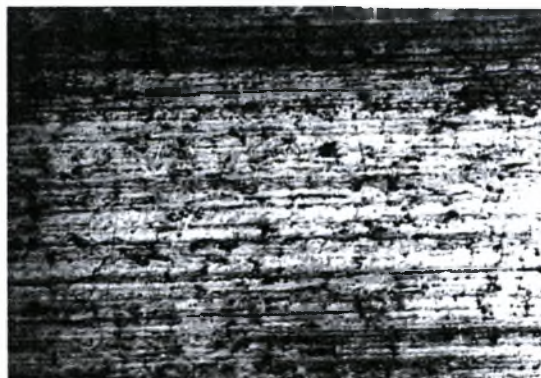


**Εικόνα ΣΤ-3:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.

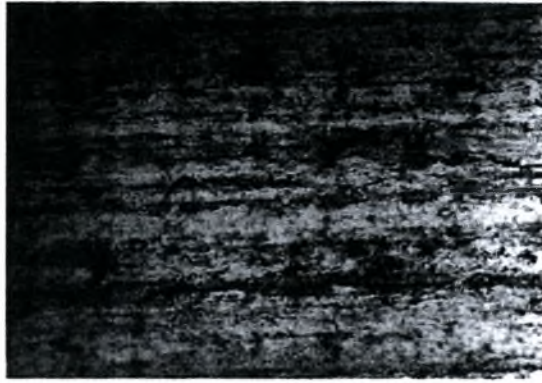
##### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-4:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.



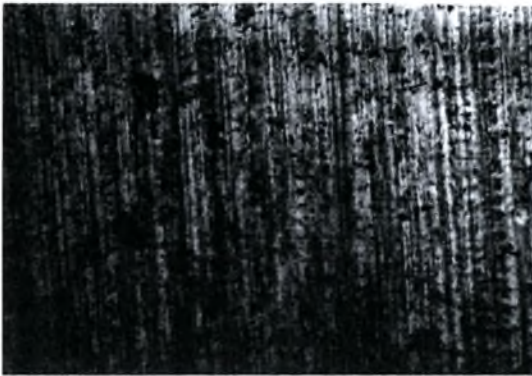
**Εικόνα ΣΤ-5:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.



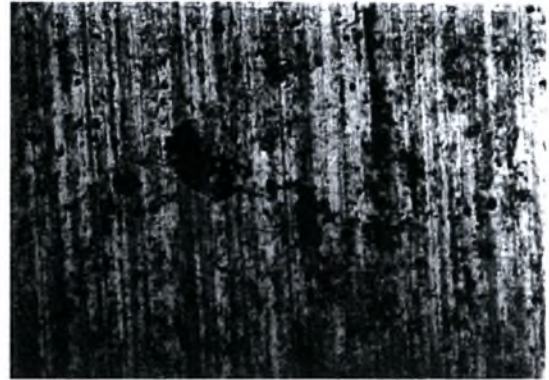
**Εικόνα ΣΤ-6:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.

### Δοκίμιο NC2

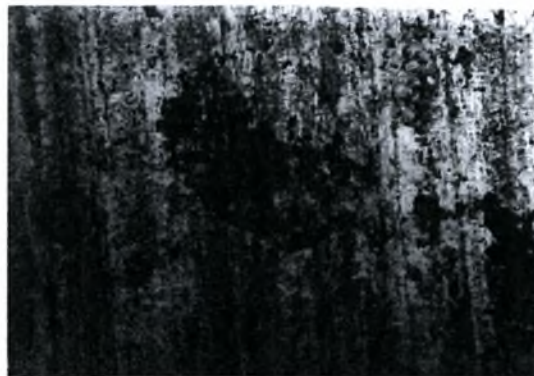
#### Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-7:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-8:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-9:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.

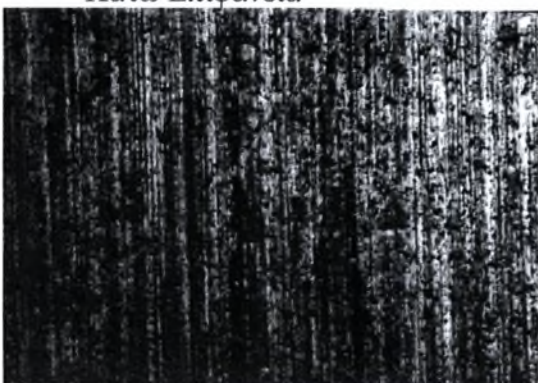


**Εικόνα ΣΤ-10:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.

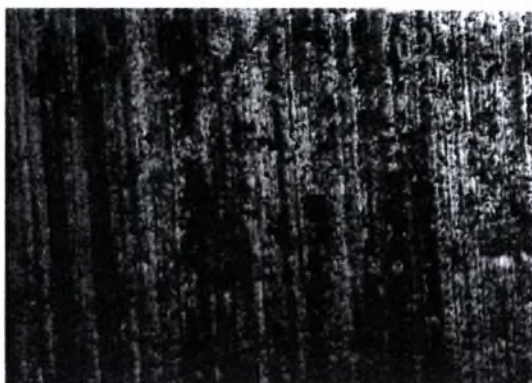


**Εικόνα ΣΤ-11:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.

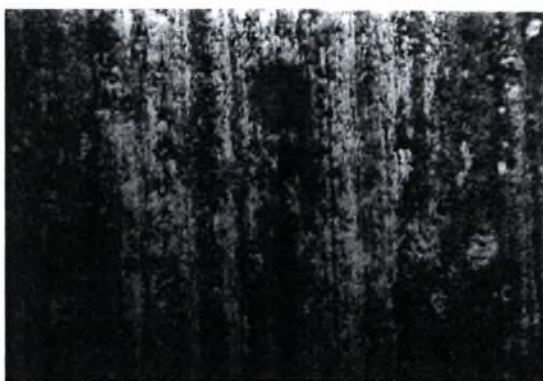
#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-12:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-13:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-14:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διαβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.



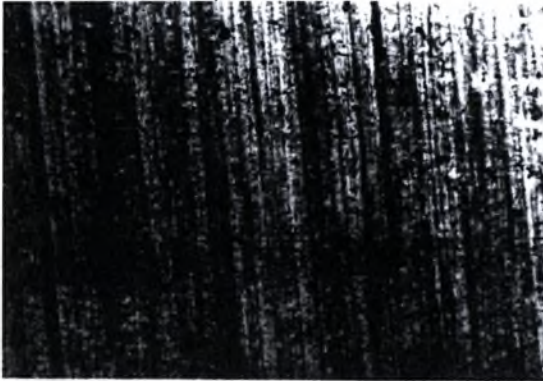
**Εικόνα ΣΤ-15:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.



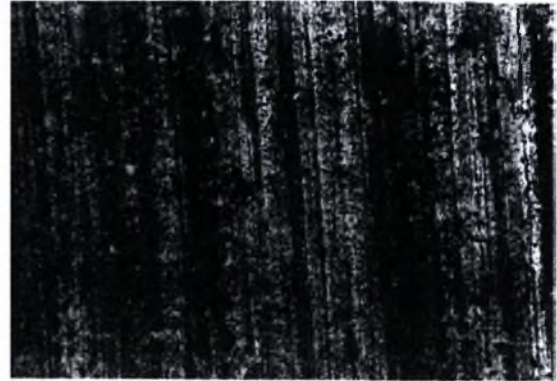
**Εικόνα ΣΤ-16:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.

### Δοκίμιο NC3

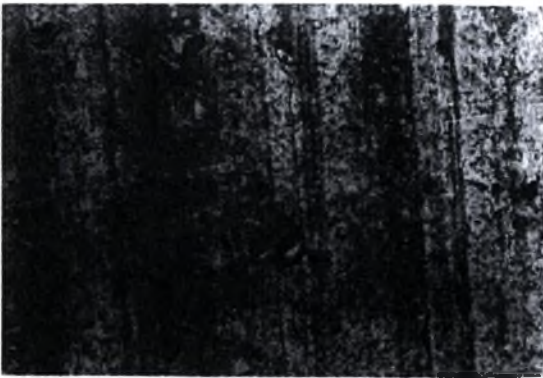
#### Άνω Επιφάνεια



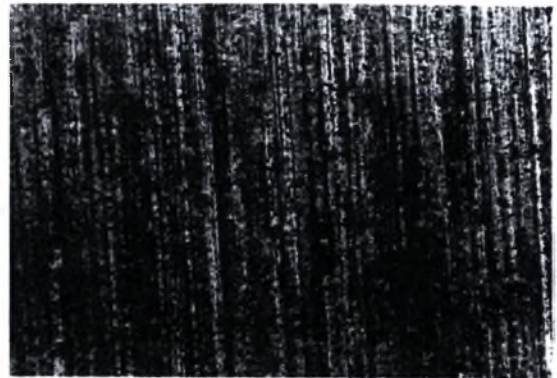
**Εικόνα ΣΤ-17:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.



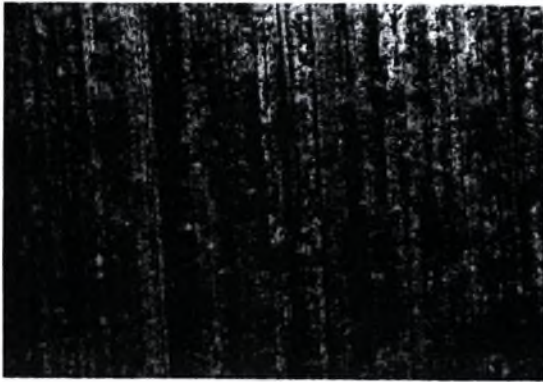
**Εικόνα ΣΤ-18:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-19:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-20:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.

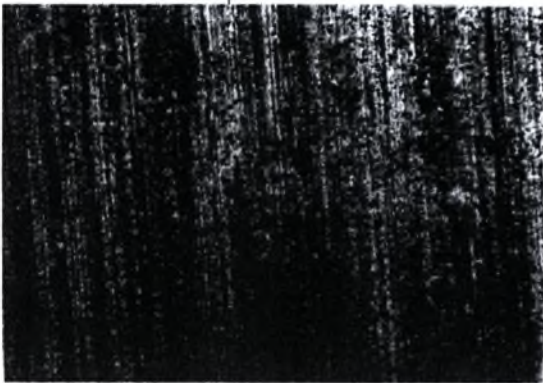


**Εικόνα ΣΤ-21:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.

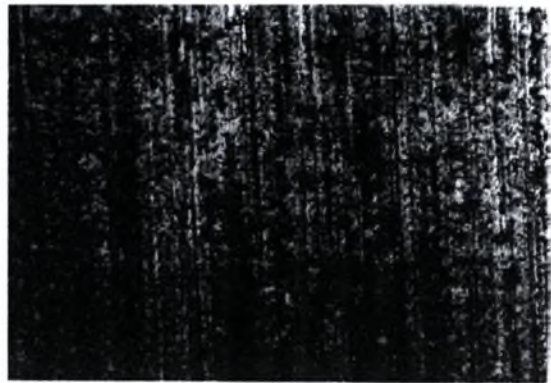


**Εικόνα ΣΤ-22:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.

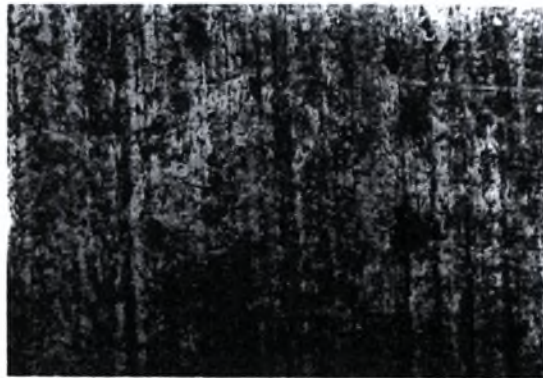
#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-23:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-24:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-25:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διάβρωσης AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.

## Δοκίμιο NC4

### Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-26:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



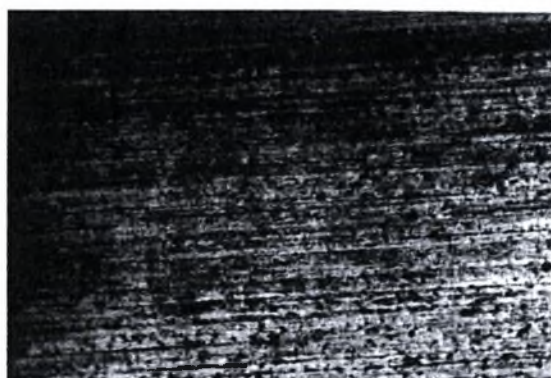
**Εικόνα ΣΤ-27:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



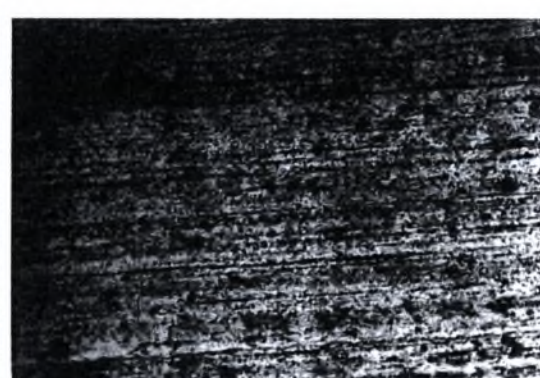
**Εικόνα ΣΤ-28:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



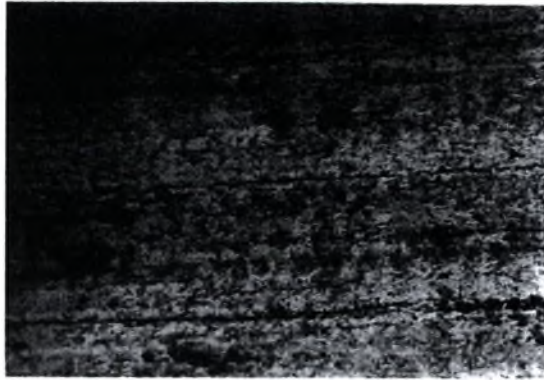
**Εικόνα ΣΤ-29:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-30:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-31:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.

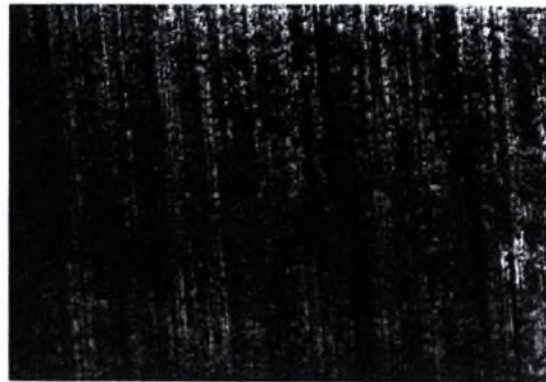


**Εικόνα ΣΤ-32:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.

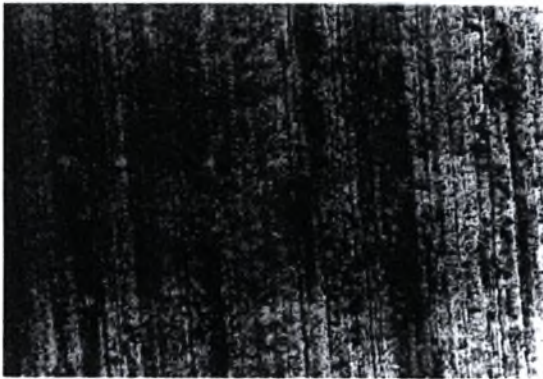
**Κάτω Επιφάνεια**



**Εικόνα ΣΤ-33:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



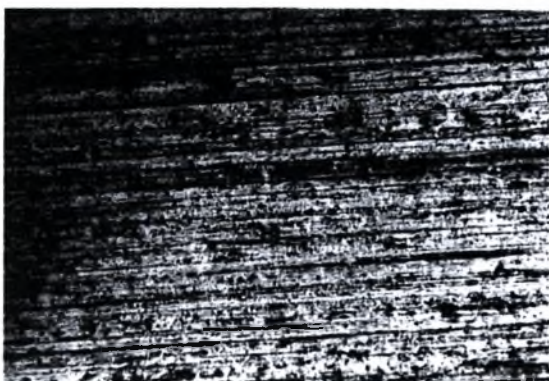
**Εικόνα ΣΤ-34:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



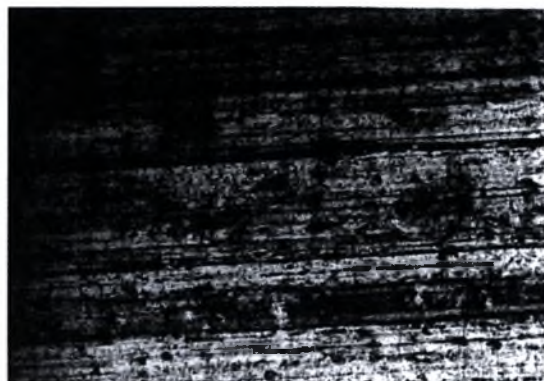
**Εικόνα ΣΤ-35:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-36:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-37:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



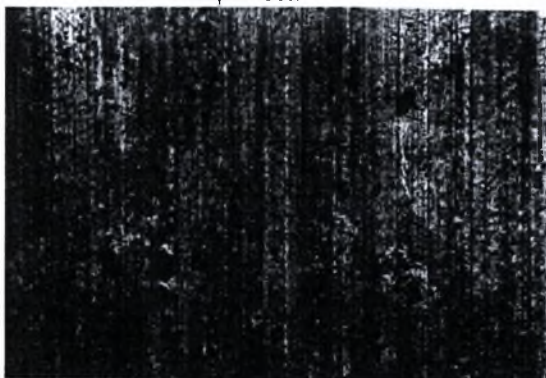
**Εικόνα ΣΤ-38:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



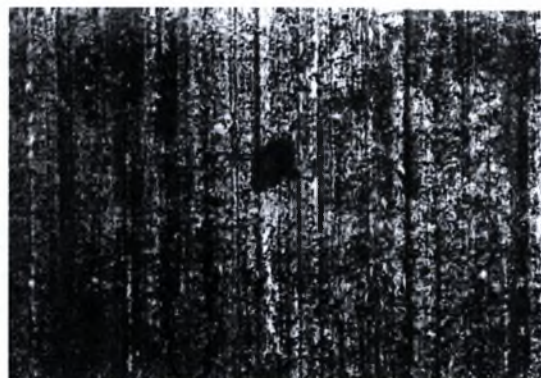
**Εικόνα ΣΤ-39:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.

## Δοκίμιο NC5

### Άνω Επιφάνεια

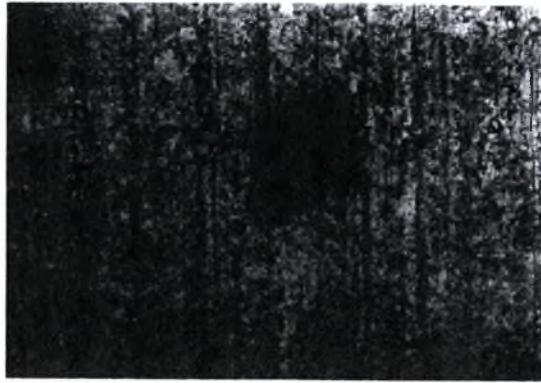


**Εικόνα ΣΤ-40:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

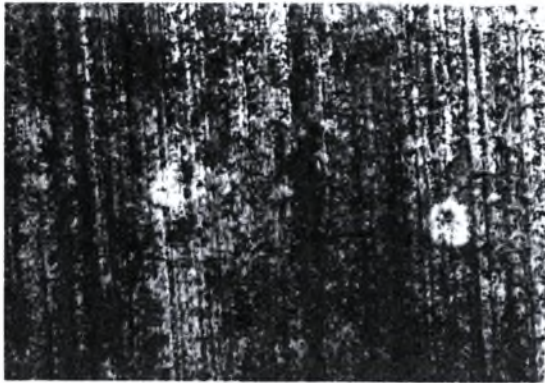


**Εικόνα ΣΤ-41:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

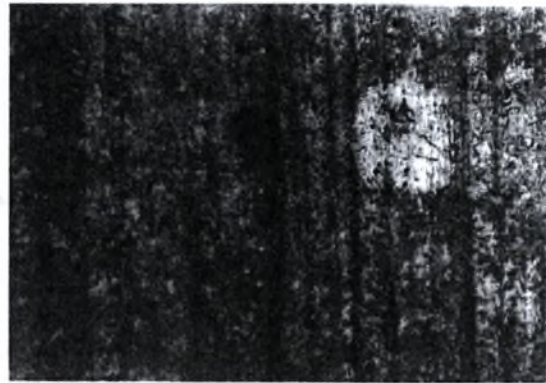




**Εικόνα ΣΤ-42:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

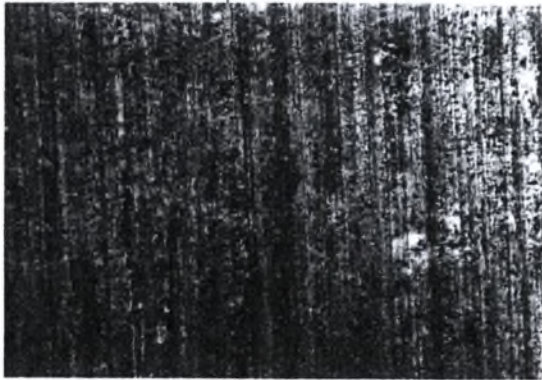


**Εικόνα ΣΤ-43:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

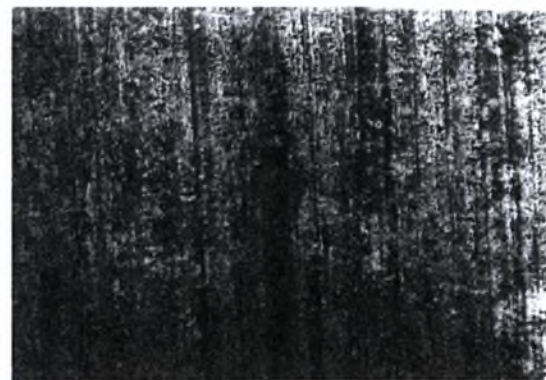


**Εικόνα ΣΤ-44:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-45:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.



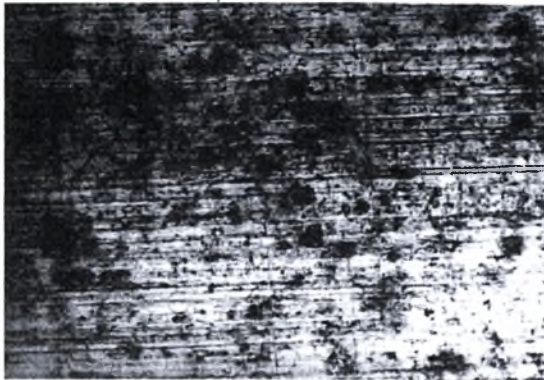
**Εικόνα ΣΤ-46:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.



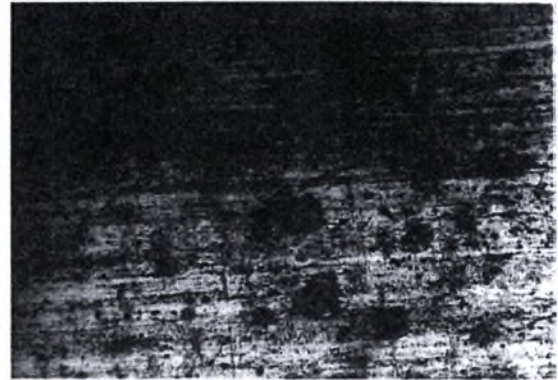
**Εικόνα ΣΤ-47:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διαβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

### Δοκίμιο NC6

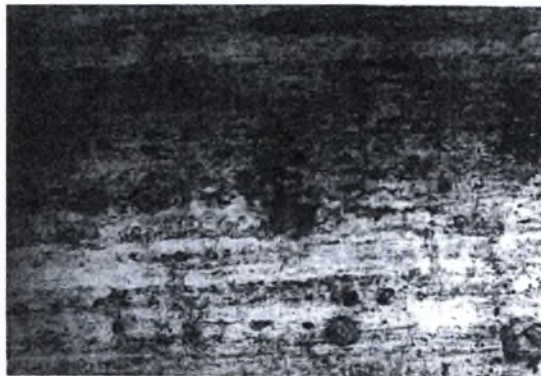
#### Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-48:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.

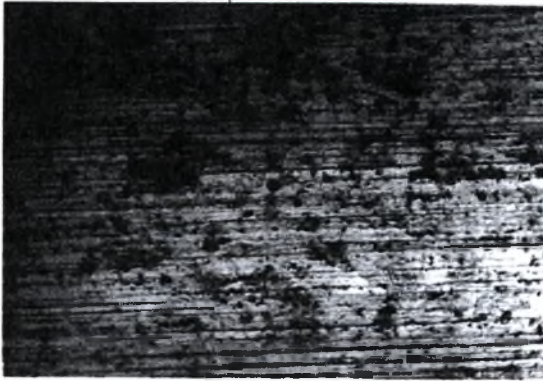


**Εικόνα ΣΤ-49:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.

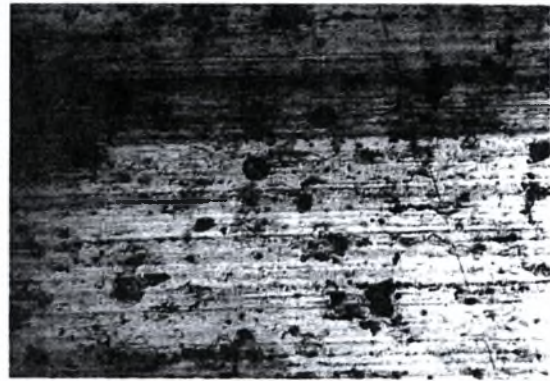


**Εικόνα ΣΤ-50:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διαβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.

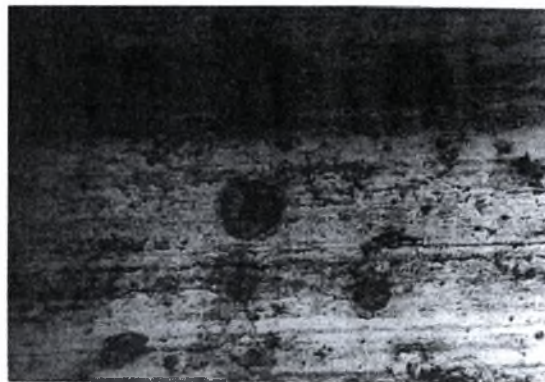
### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-51:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.



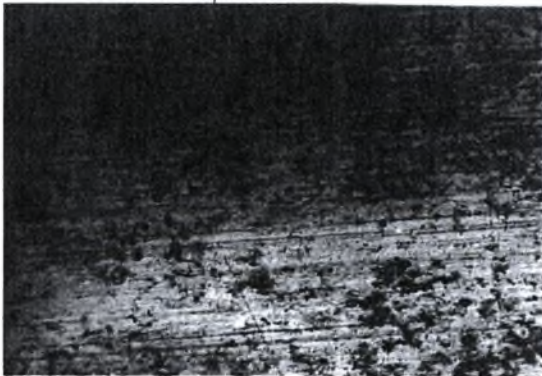
**Εικόνα ΣΤ-52:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.



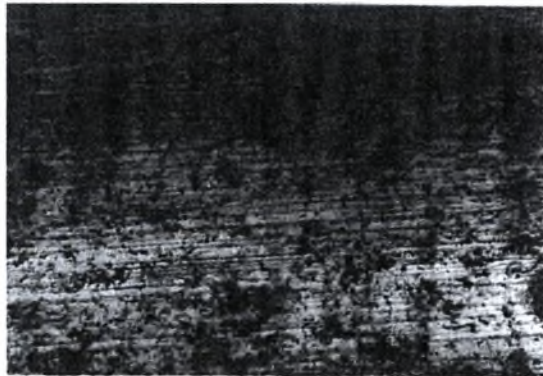
**Εικόνα ΣΤ-53:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.

### Δοκίμιο NC7

#### Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-54:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.

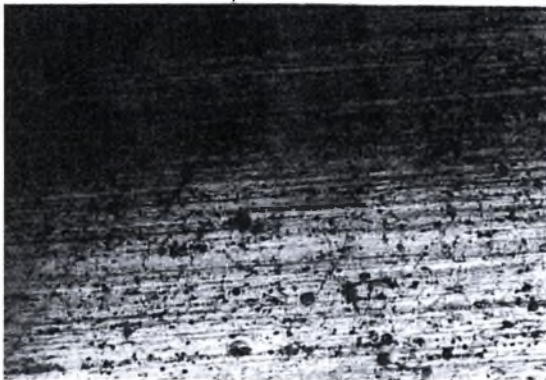


**Εικόνα ΣΤ-55:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.

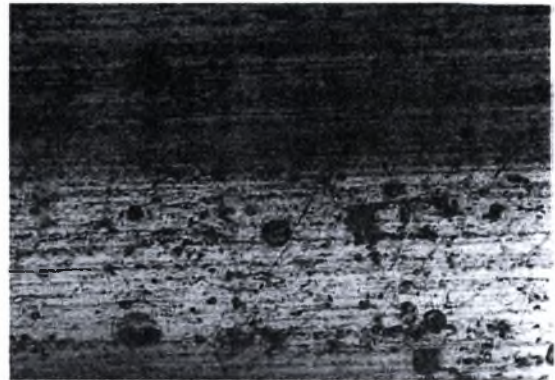


**Εικόνα ΣΤ-56:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.

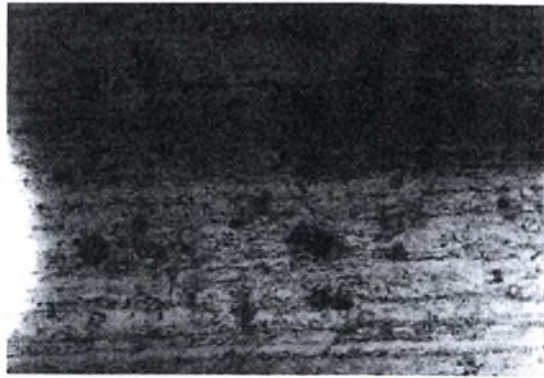
#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-57:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.



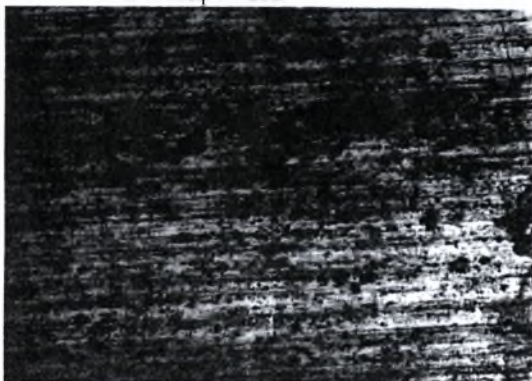
**Εικόνα ΣΤ-58:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.



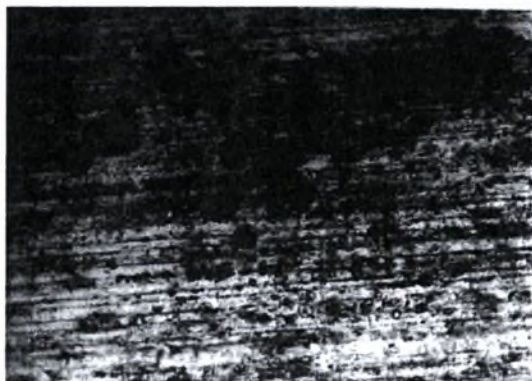
**Εικόνα ΣΤ-59:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.

## Δοκίμιο NC8

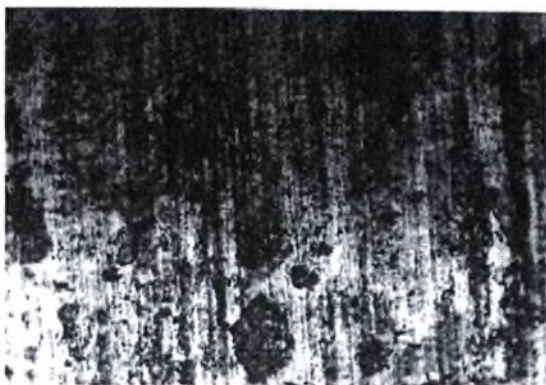
Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα ΣΤ-60:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-61:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-62:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.

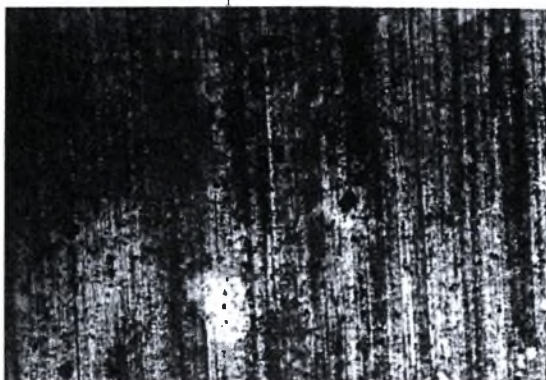


**Εικόνα ΣΤ-63:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-64:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.

Κάτω Επιφάνεια



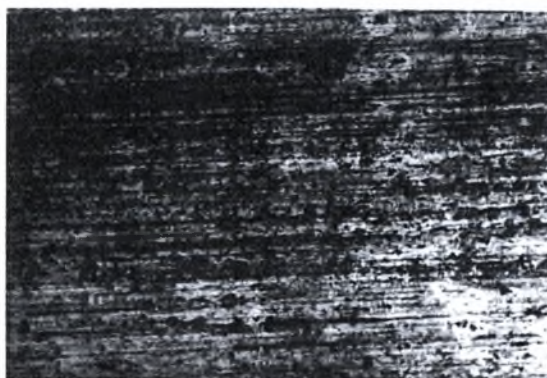
**Εικόνα ΣΤ-65:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



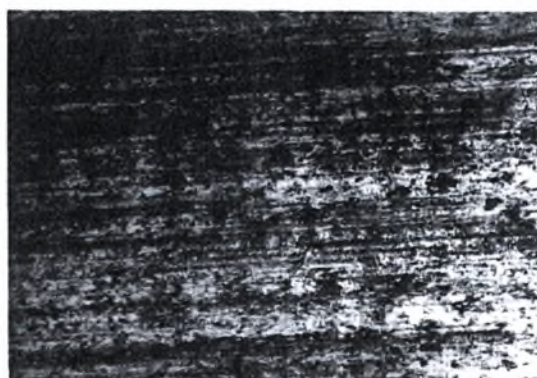
**Εικόνα ΣΤ-66:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



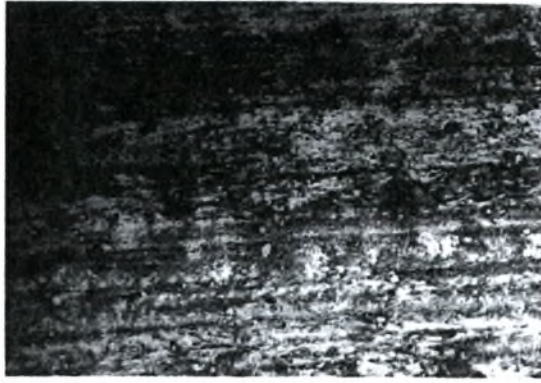
**Εικόνα ΣΤ-67:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-68:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



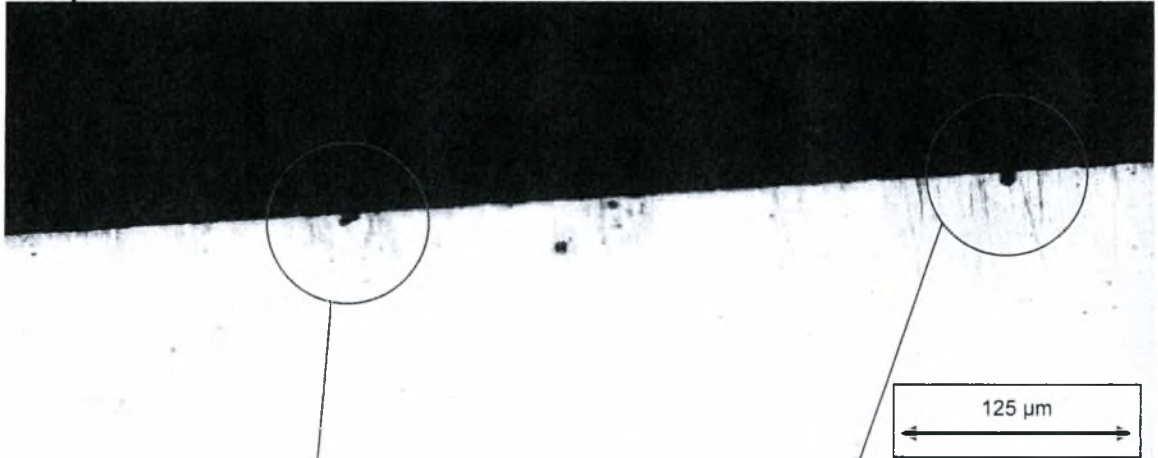
**Εικόνα ΣΤ-69:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-70:** Στερεοσκοπία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.

**ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΦΥΣΙΚΑ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ**  
**Al 2024-T3 (NATURAL CORROSION TEST).**

**Δοκίμιο NC1**



**Εικόνα ΣΤ-71:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC1 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-72:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC1. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-73:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC1. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-74:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC1. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.

**Εικόνα ΣΤ-75:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC1. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 3 μήνες.



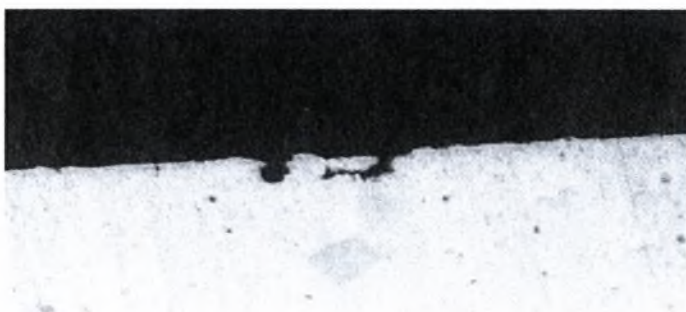
## Δοκίμιο NC2



**Εικόνα ΣΤ-76:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-77:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.

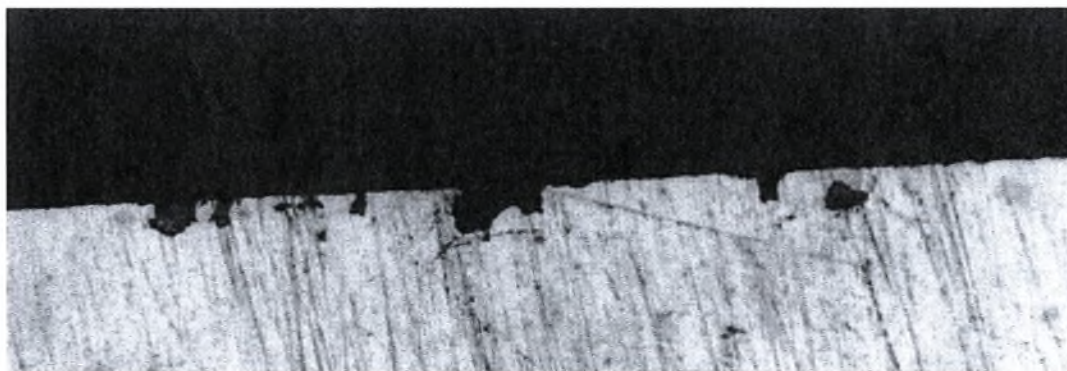


**Εικόνα ΣΤ-78:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC2 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 6 μήνες.

## Δοκίμιο NC3



**Εικόνα ΣΤ-79:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-80:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC3 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 9 μήνες.

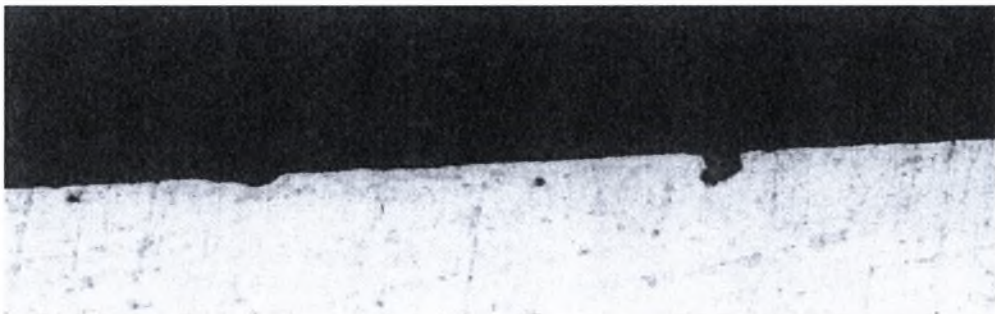
## Δοκίμιο NC4



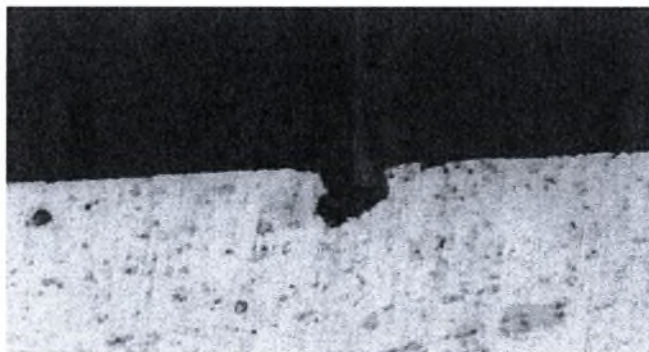
**Εικόνα ΣΤ-81:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-82:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-83:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.

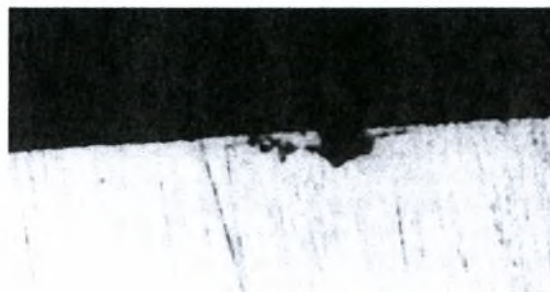


**Εικόνα ΣΤ-84:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC4 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 12 μήνες.

### Δοκίμιο NC5



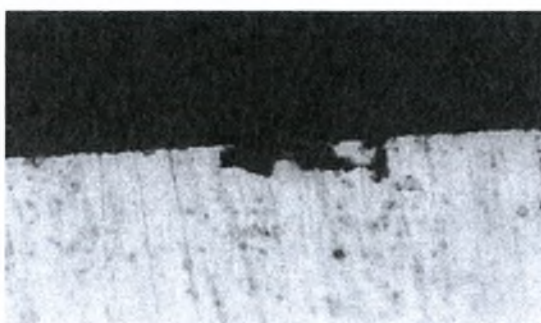
**Εικόνα ΣΤ-85:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.



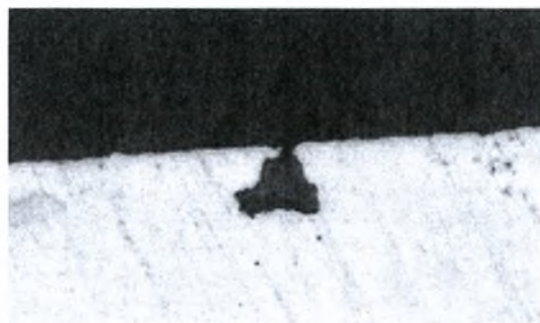
**Εικόνα ΣΤ-86:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-87:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

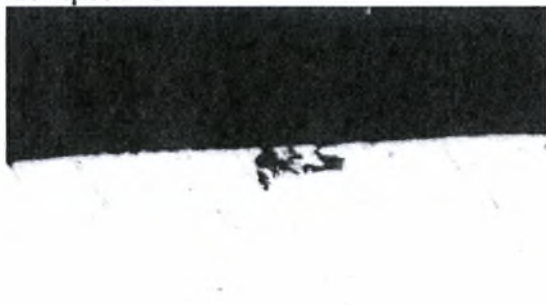


**Εικόνα ΣΤ-88:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

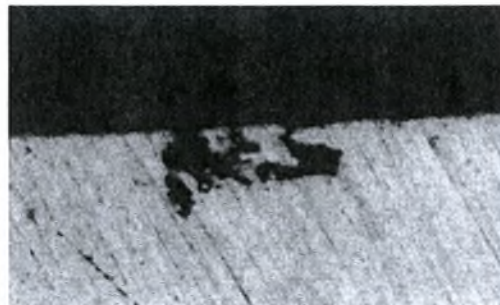


**Εικόνα ΣΤ-89:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC5 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 15 μήνες.

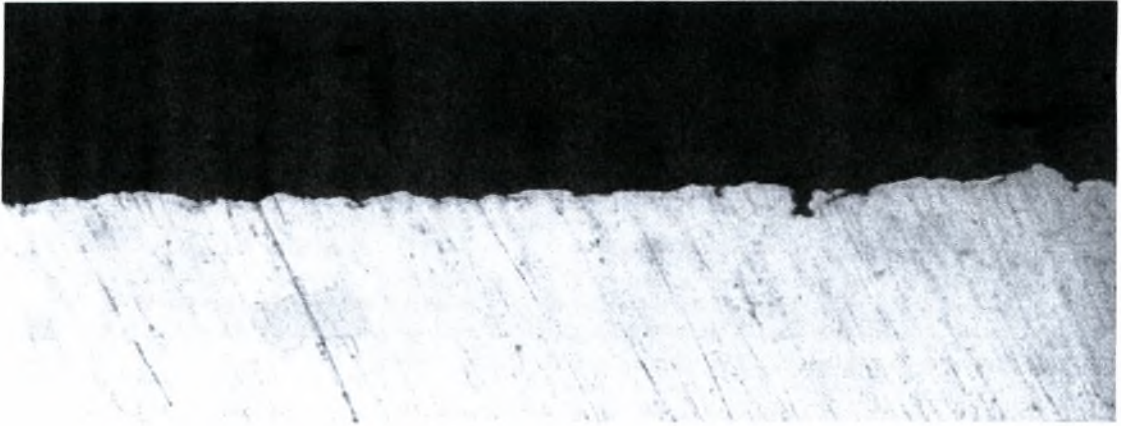
### Δοκίμιο NC6



**Εικόνα ΣΤ-90:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.

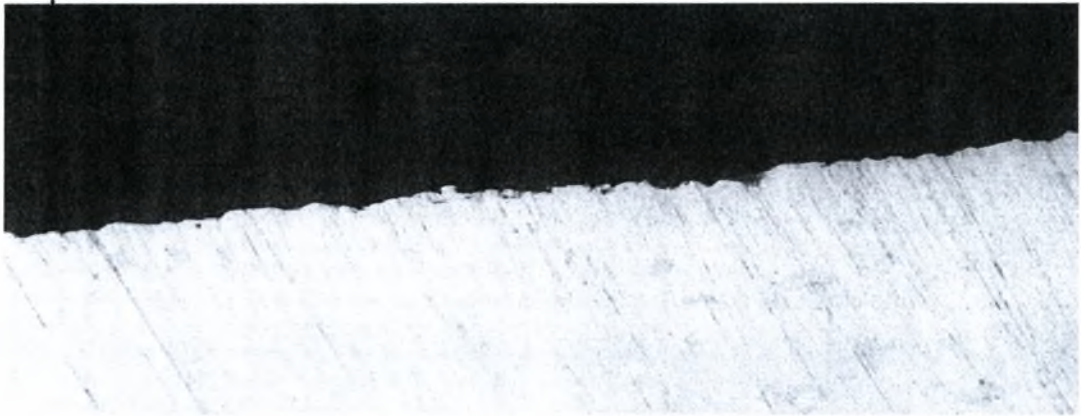


**Εικόνα ΣΤ-91:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διάβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.

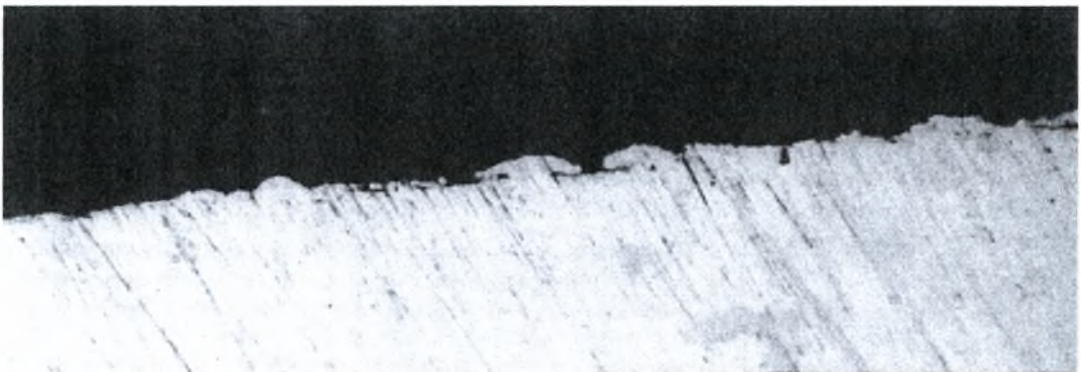


**Εικόνα ΣΤ-92:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC6 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 18 μήνες.

#### Δοκίμιο NC7



**Εικόνα ΣΤ-93:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.

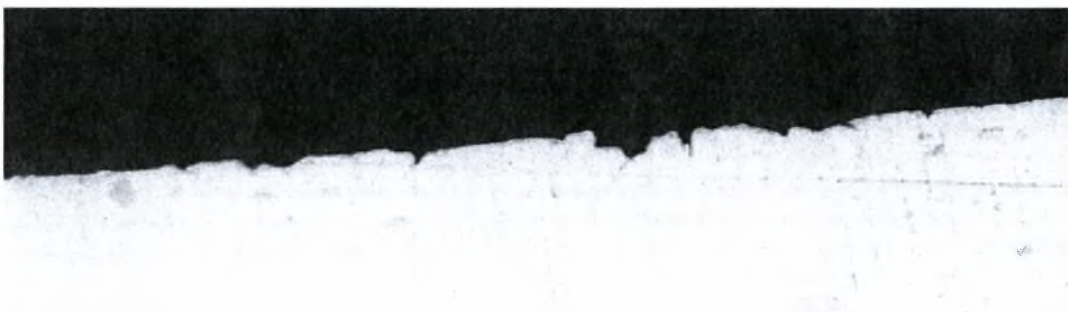


**Εικόνα ΣΤ-94:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC7 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 100$ . Χρόνος έκθεσης 21 μήνες.

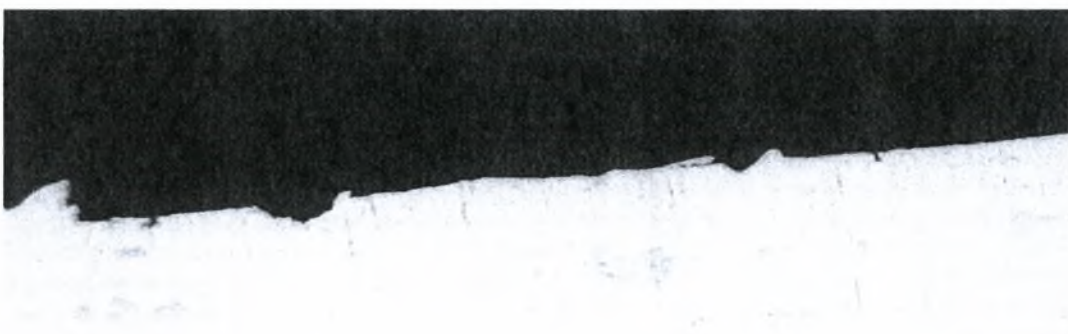
## Δοκίμιο NC8



**Εικόνα ΣΤ-95:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-96:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.



**Εικόνα ΣΤ-97:** Μεταλλογραφία δοκιμίου NC8 πειράματος φυσικής διαβρωσης Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 24 μήνες.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ “Ζ”

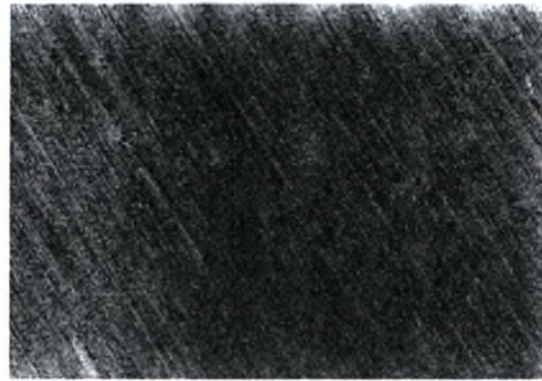
### ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΙ 2024-Τ3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΜΕ EXCO TEST

#### Δοκίμιο Α5

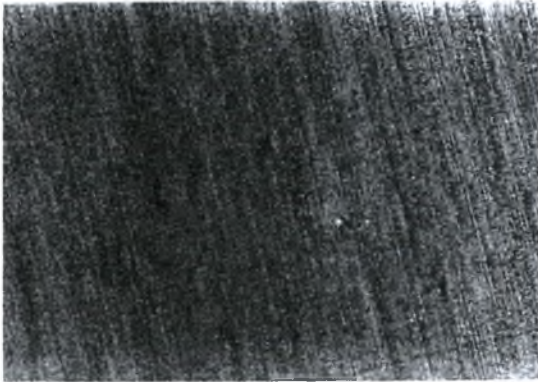
Άνω Επιφάνεια



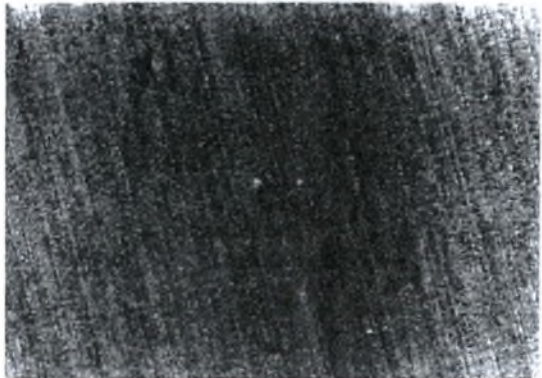
**Εικόνα Z-1:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Α5 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα Z-2:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Α5 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.

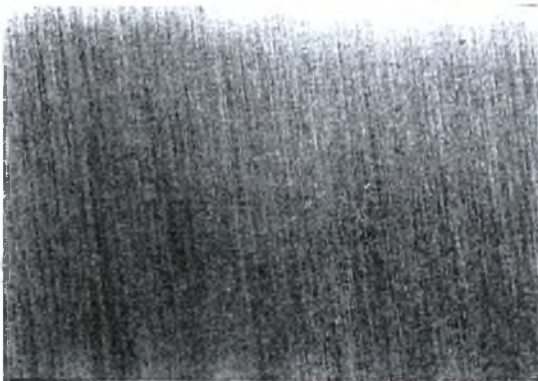


**Εικόνα Z-3:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Α5 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα Z-4:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Α5 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.

Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα Z-5:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Α5 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες. Έναρξη Pitting.



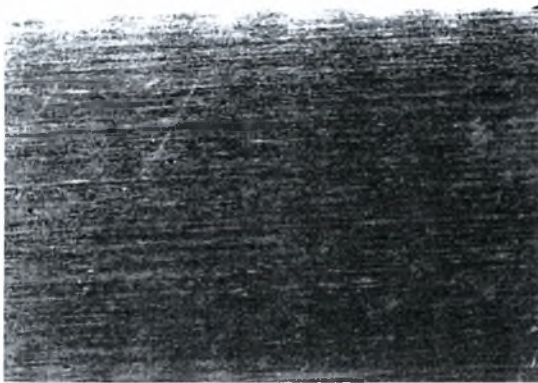
**Εικόνα Z-6:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Α5 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες. Έναρξη Pitting.



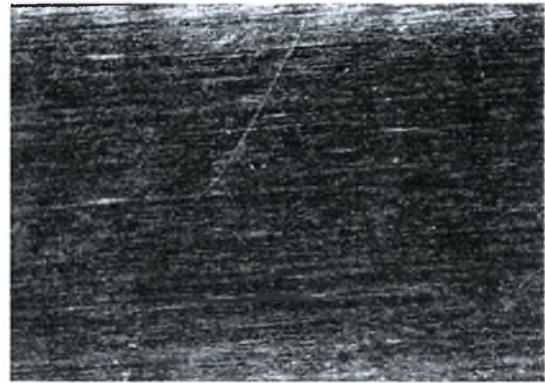
**Εικόνα Z-7:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A5 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες. Έναρξη Pitting.

### Δοκίμιο A8

#### Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα Z-8:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα Z-9:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.

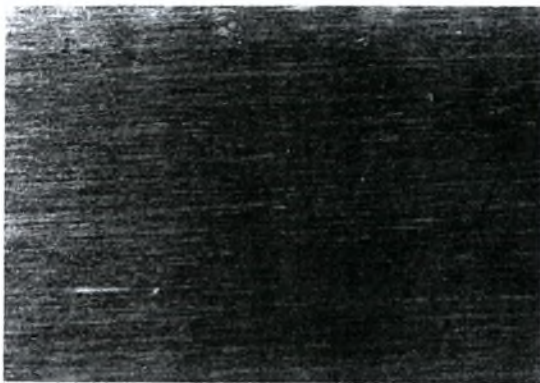


**Εικόνα Z-10:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα Z-11:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.

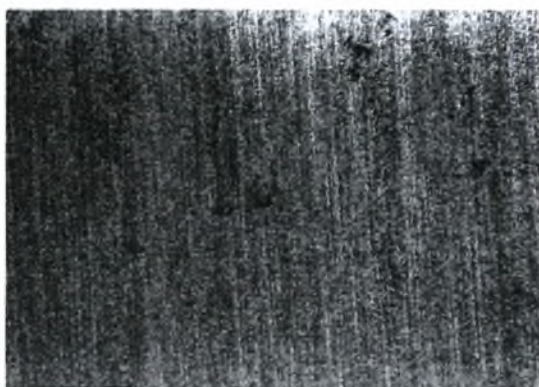
## Κάτω Επιφάνεια



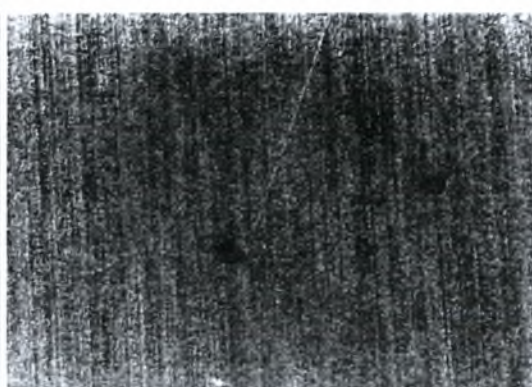
**Εικόνα Z-12:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



**Εικόνα Z-13:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



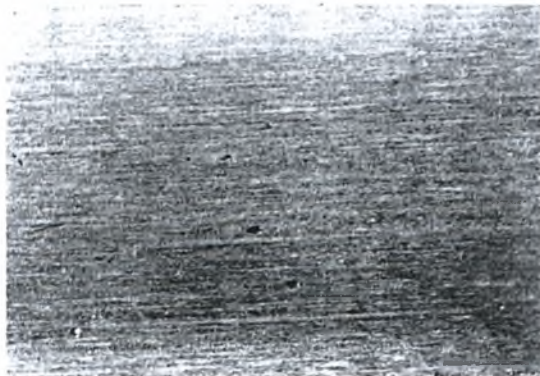
**Εικόνα Z-14:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.



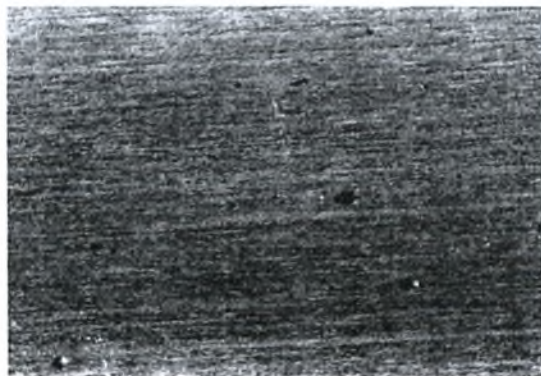
**Εικόνα Z-15:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A8 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.

## Δοκίμιο A12

### Άνω Επιφάνεια

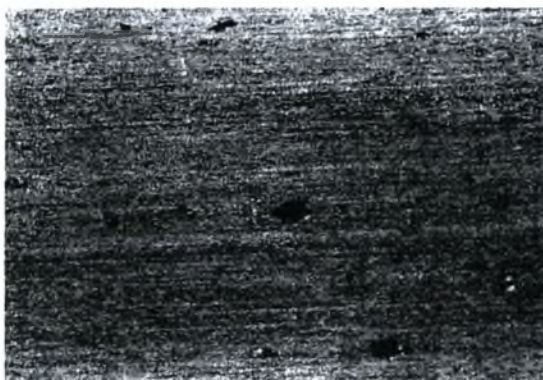


**Εικόνα Z-16:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

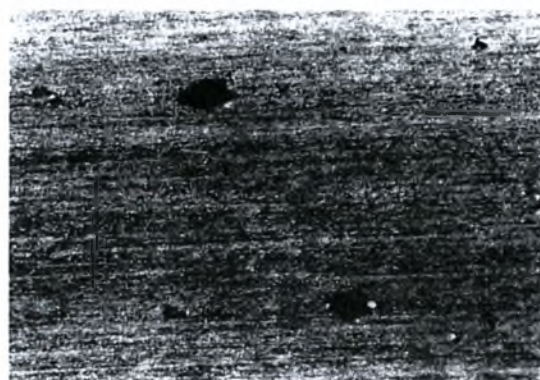


**Εικόνα Z-17:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



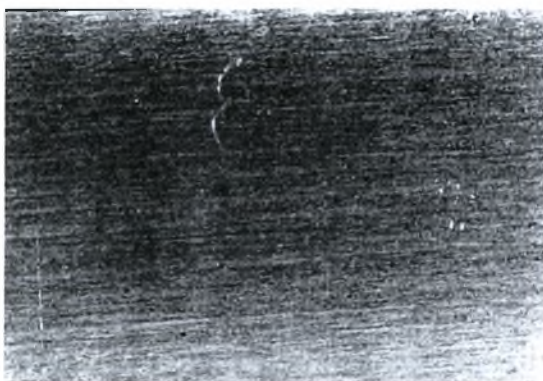


**Εικόνα Z-18:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

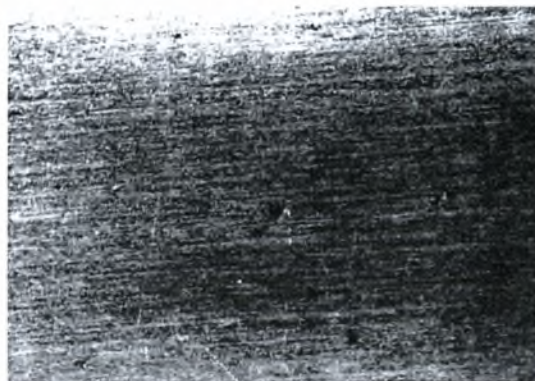


**Εικόνα Z-19:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα Z-20:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα Z-21:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα Z-22:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα Z-23:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A12 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

## Δοκίμιο A16

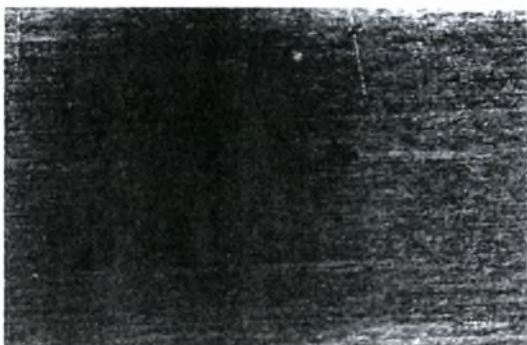
### Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα Z-24:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



**Εικόνα Z-25:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



**Εικόνα Z-26:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.

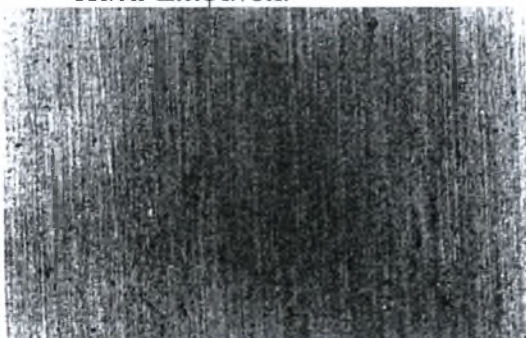


**Εικόνα Z-27:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



**Εικόνα Z-28:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.

### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα Z-29:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



**Εικόνα Z-30:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



**Εικόνα Z-31:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



**Εικόνα Z-32:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



**Εικόνα Z-33:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



**Εικόνα Z-34:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.

## **Δοκίμιο A24**

### **Άνω Επιφάνεια**



**Εικόνα Z-35:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-36:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-37:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



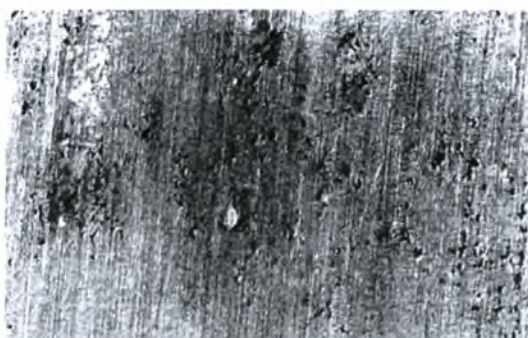
**Εικόνα Z-38:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



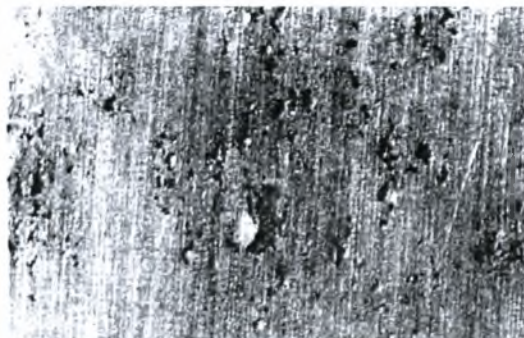
**Εικόνα Z-39:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-40:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-41:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες. Έναρξη Exfoliation.



**Εικόνα Z-42:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες. Έναρξη Exfoliation.



**Εικόνα Z-43:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



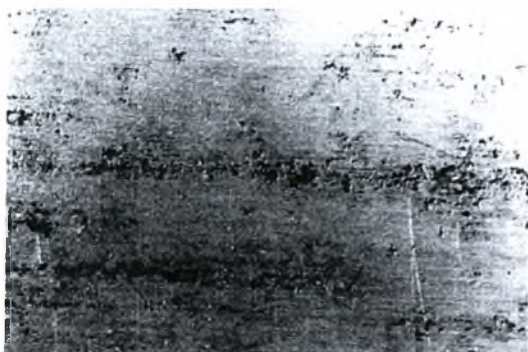
**Εικόνα Z-44:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



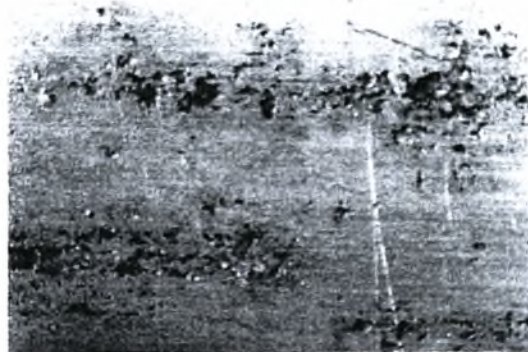
**Εικόνα Z-45:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-46:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-47:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-48:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-49:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα Z-50:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-51:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-52:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-53:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-54:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Z-55:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

### **Δοκίμιο A36**

Άνω Επιφάνεια



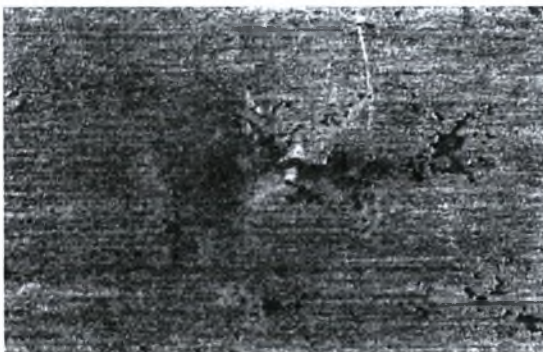
**Εικόνα Z-56:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Z-57:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Z-58:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Z-59:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



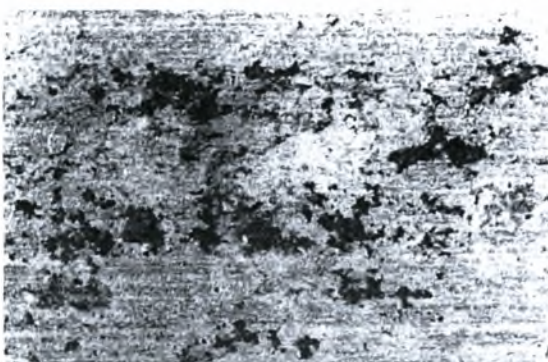
**Εικόνα Z-60:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



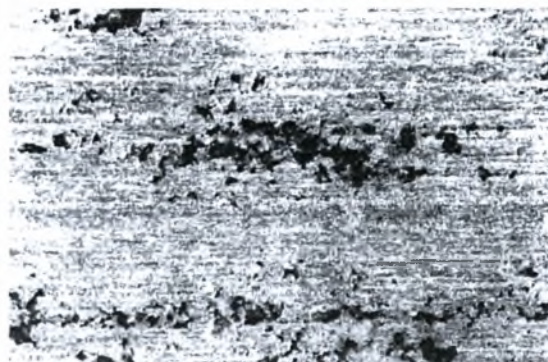
**Εικόνα Z-61:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Z-62:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Z-63:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Z-64:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.

#### Κάτω Επιφάνεια



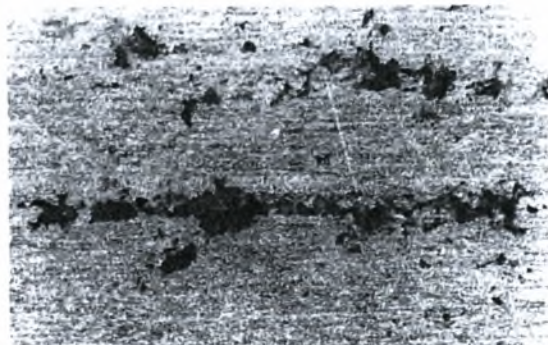
**Εικόνα Z-65:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Z-66:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



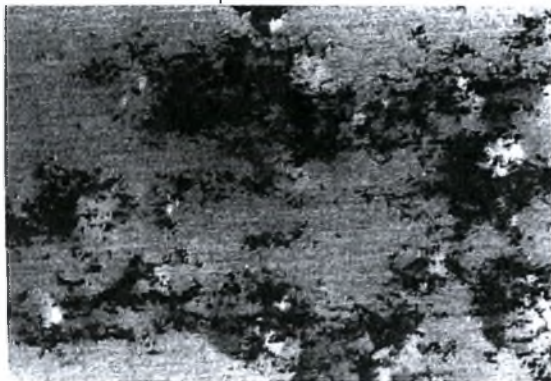
**Εικόνα Z-67:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Z-68:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.

## Δοκίμιο A48

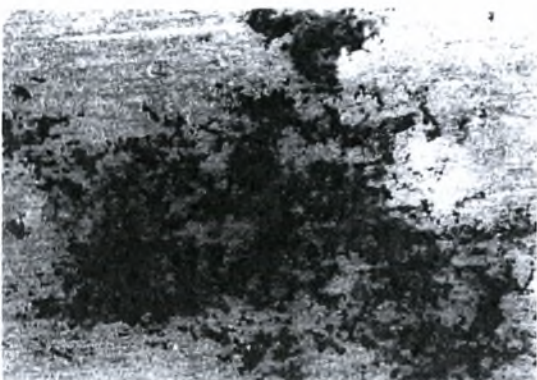
### Άνω Επιφάνεια



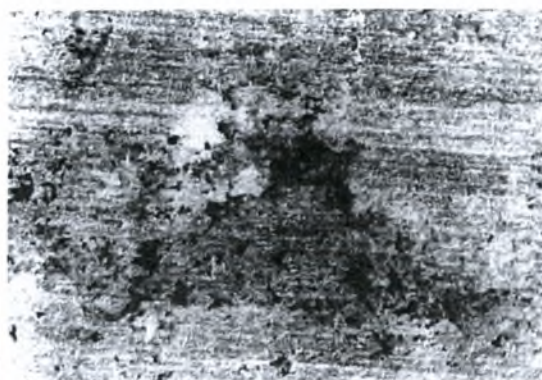
**Εικόνα Z-69:** Στερεοσκοπία δοκίμιου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.



**Εικόνα Z-70:** Στερεοσκοπία δοκίμιου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.

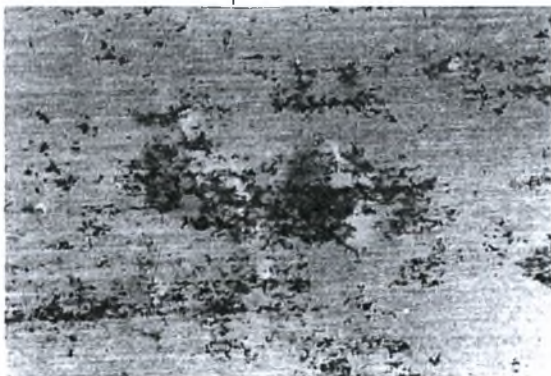


**Εικόνα Z-71:** Στερεοσκοπία δοκίμιου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.

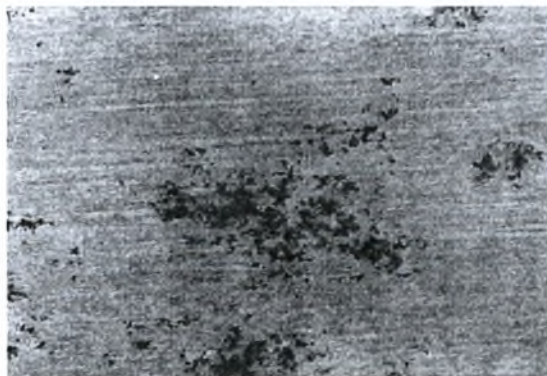


**Εικόνα Z-72:** Στερεοσκοπία δοκίμιου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.

### Κάτω Επιφάνεια

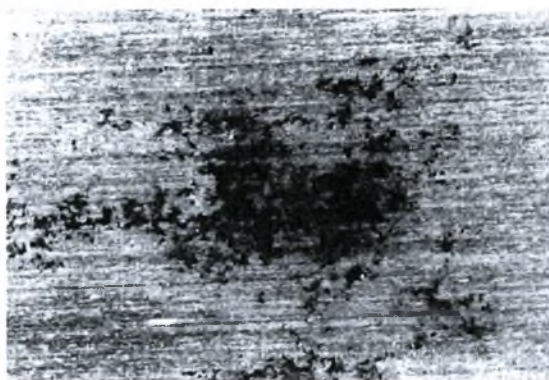


**Εικόνα Z-73:** Στερεοσκοπία δοκίμιου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.



**Εικόνα Z-74:** Στερεοσκοπία δοκίμιου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.





**Εικόνα Z-75:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.

### Δοκίμιο A72

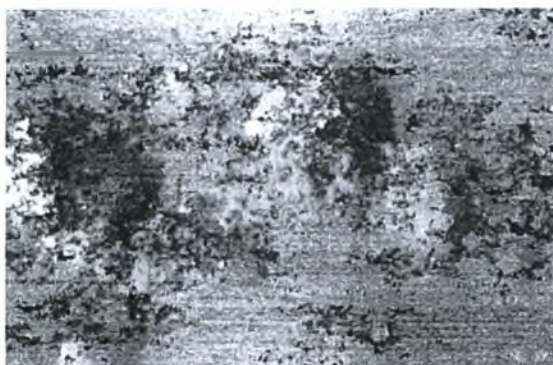
Άνω Επιφάνεια



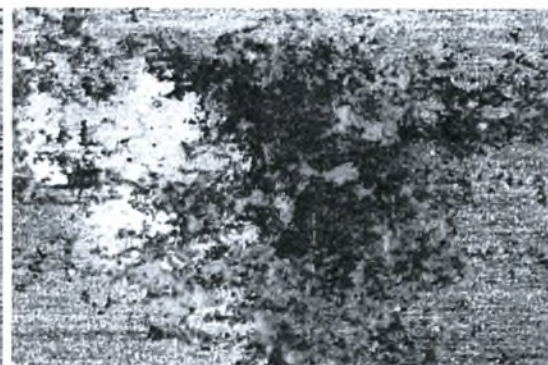
**Εικόνα Z-76:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες. Επιφάνεια πριν τον καθαρισμό από τα άλατα



**Εικόνα Z-77:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες. Επιφάνεια πριν τον καθαρισμό από τα άλατα



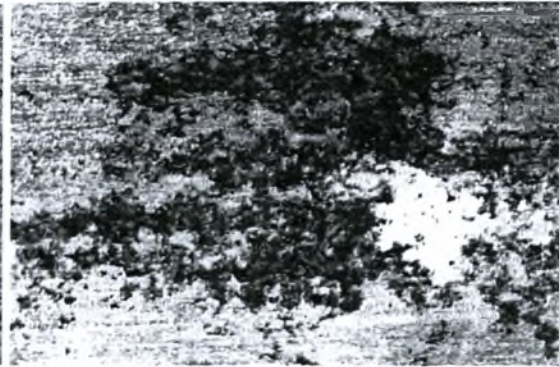
**Εικόνα Z-78:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες. Επιφάνεια πριν τον καθαρισμό από τα άλατα



**Εικόνα Z-79:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες. Επιφάνεια πριν τον καθαρισμό από τα άλατα



**Εικόνα Z-80:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Z-81:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Z-82:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Z-83:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.

#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα Z-84:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες. Επιφάνεια πριν τον καθαρισμό από τα άλατα



**Εικόνα Z-85:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



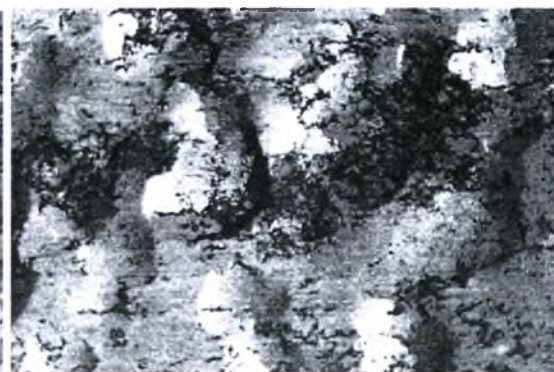
**Εικόνα Z-86:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.

### **Δοκίμιο A96**

#### **Άνω Επιφάνεια**



**Εικόνα Z-87:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Έντονο Exfoliation.



**Εικόνα Z-88:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Έντονο Exfoliation.



**Εικόνα Z-89:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Έντονο Exfoliation.



**Εικόνα Z-90:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Έντονο Exfoliation.

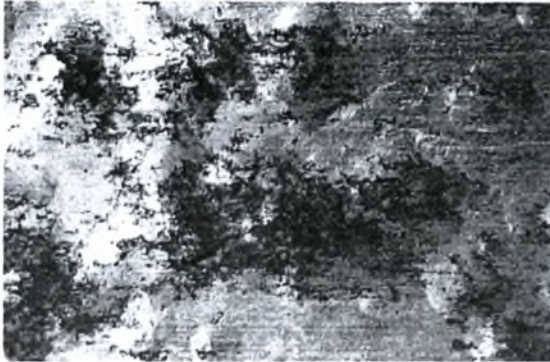


**Εικόνα Z-91:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.

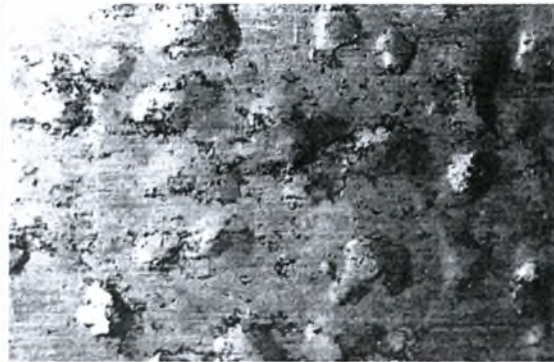


**Εικόνα Z-92:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.

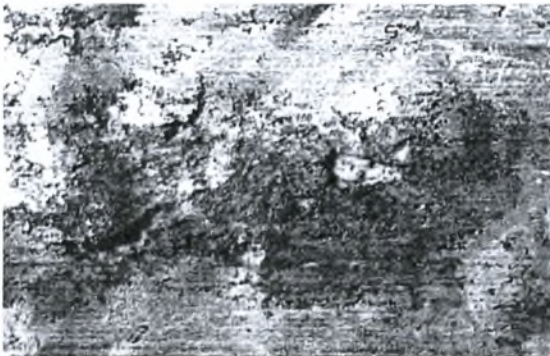
#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα Z-93:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



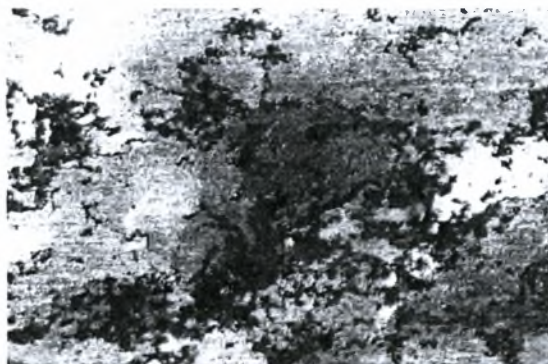
**Εικόνα Z-94:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Z-95:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



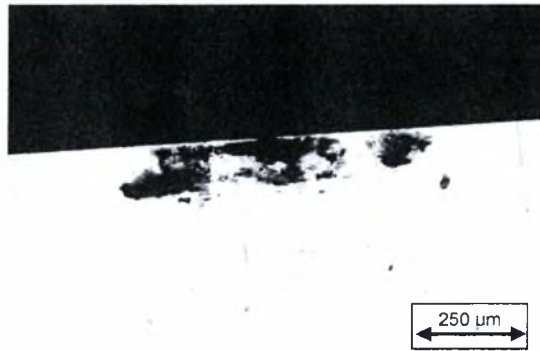
**Εικόνα Z-96:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Z-97:** Στερεοσκοπία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.

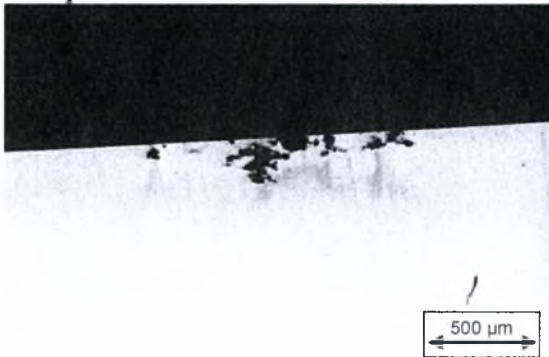
**ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΙ 2024-Τ3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ**  
**ΜΕ EXCO TEST**

**Δοκίμιο Α5**

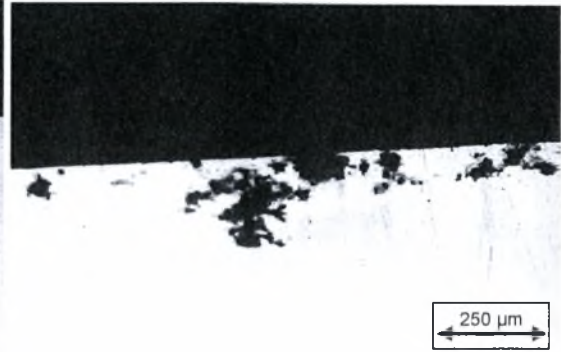


**Εικόνα Z-98:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Α5 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.

**Δοκίμιο Α8**

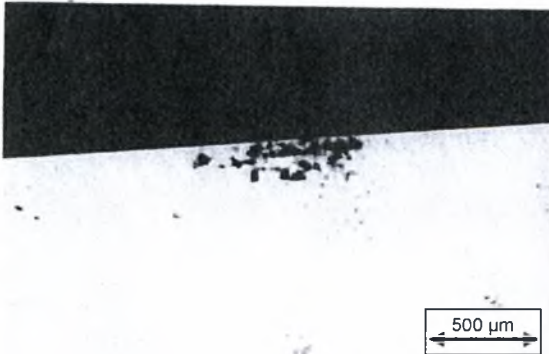


**Εικόνα Z-99:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Α8 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.

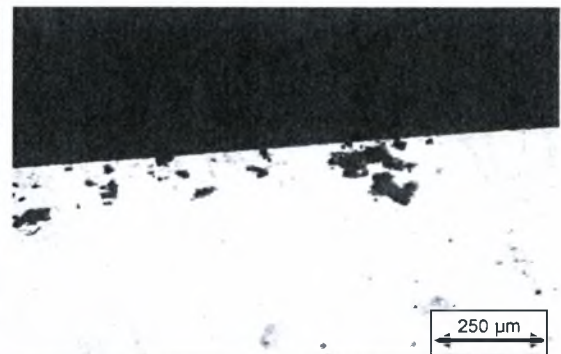


**Εικόνα Z-100:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Α8 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.

**Δοκίμιο Α12**

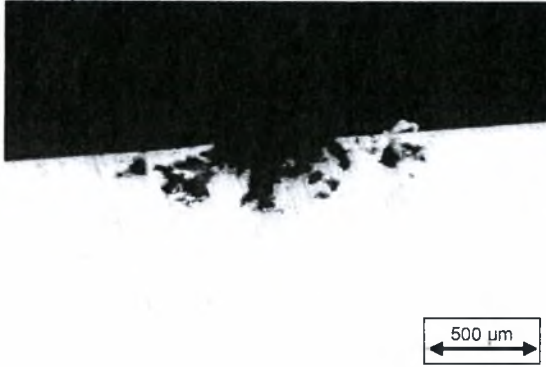


**Εικόνα Z-101:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Α12 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

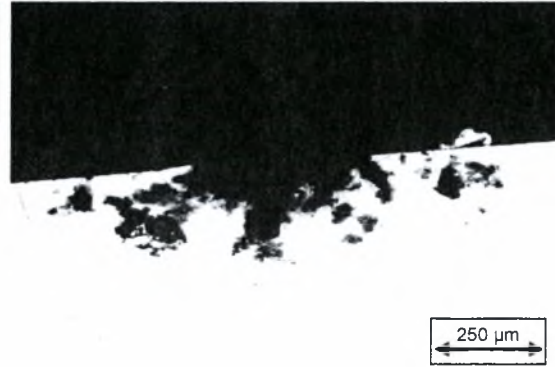


**Εικόνα Z-102:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Α12 πειράματος EXCO Test ΑΙ 2024-Τ3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

### Δοκίμιο A16

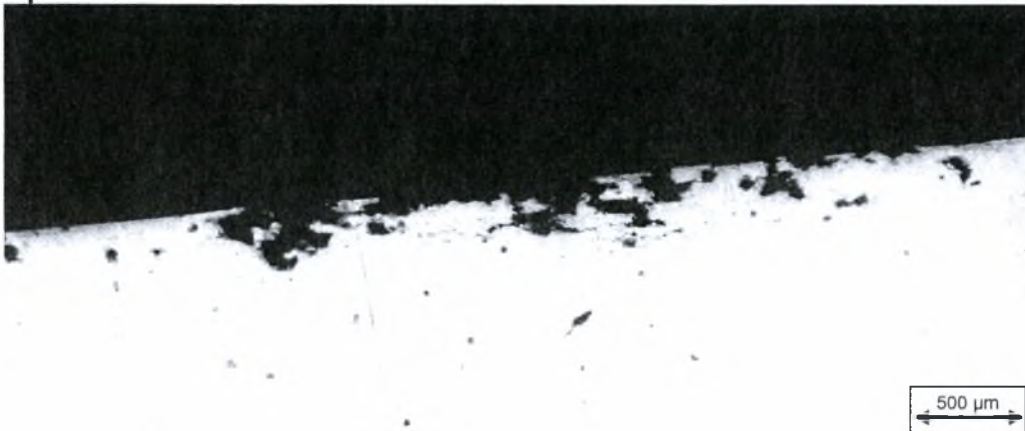


**Εικόνα Z-103:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.

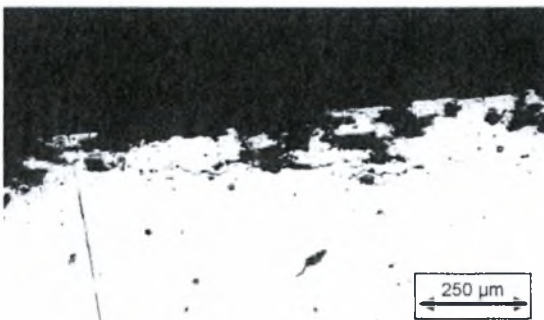


**Εικόνα Z-104:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A16 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.

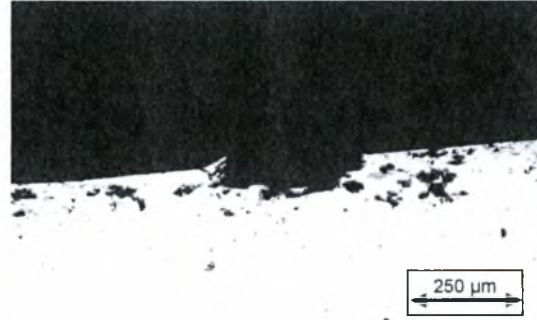
### Δοκίμιο A24



**Εικόνα Z-105:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

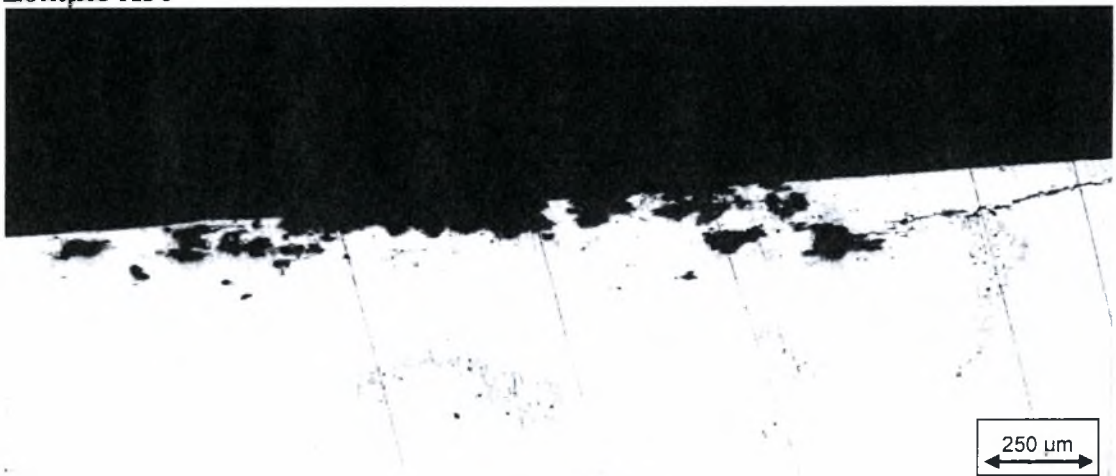


**Εικόνα Z-106:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

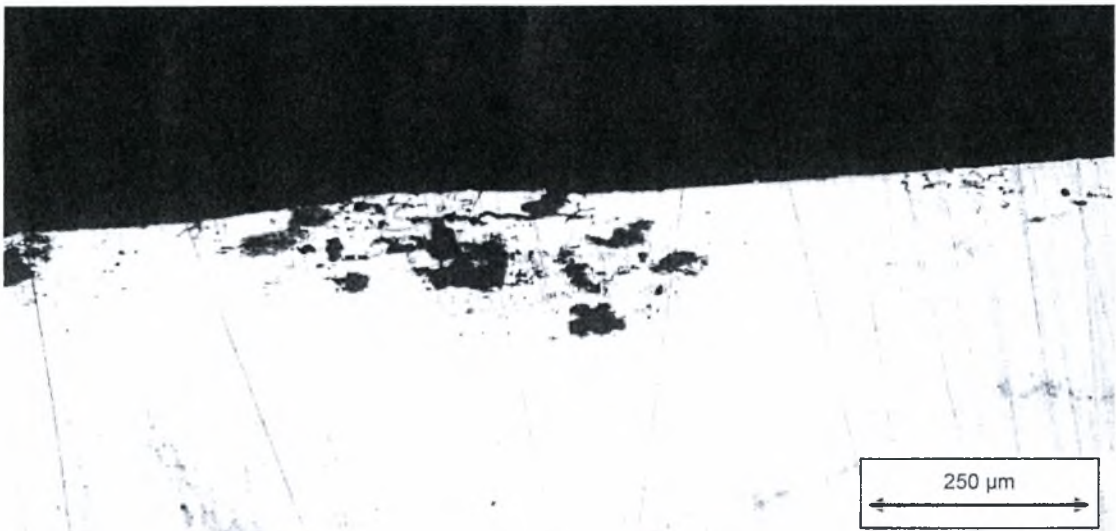


**Εικόνα Z-107:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A24 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

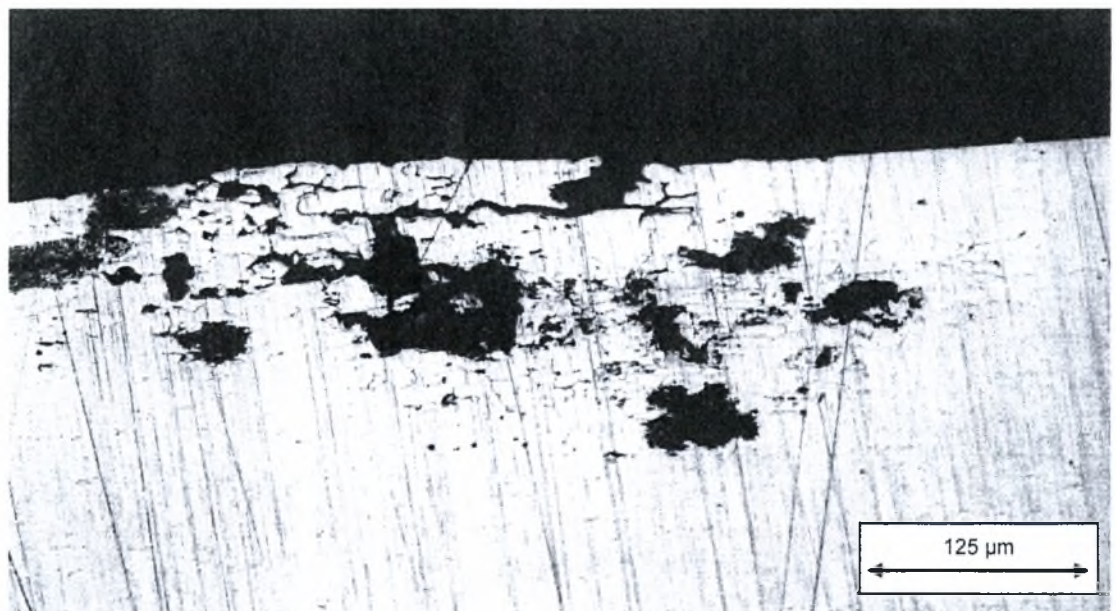
## Δοκίμιο A36



**Εικόνα Z-108:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test A1 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.

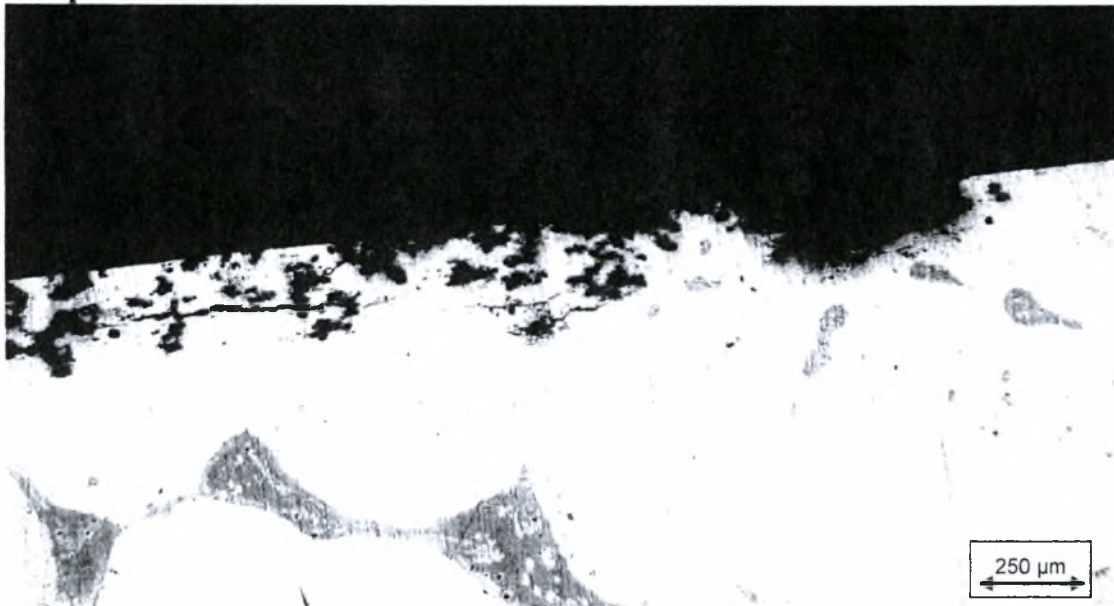


**Εικόνα Z-109:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test A1 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες. Pitting και περικρυσταλλική διάβρωση.

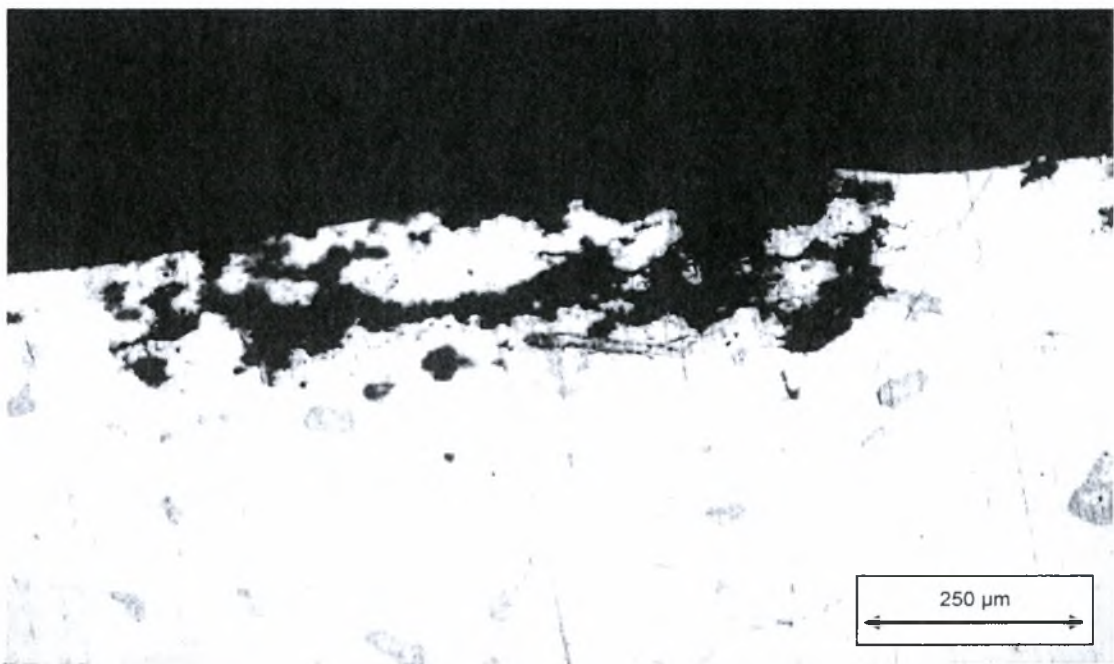


**Εικόνα Z-110:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A36 πειράματος EXCO Test A1 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες. Pitting και περικρυσταλλική διάβρωση.

## Δοκίμιο A48



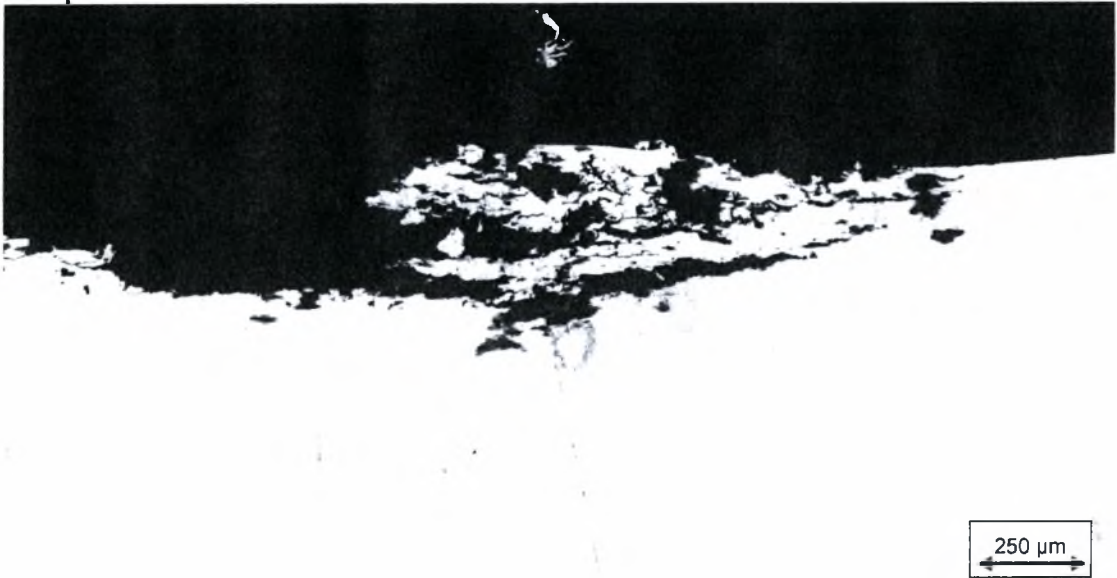
**Εικόνα Z-111:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες. Pitting και περικρυσταλλική διάβρωση.



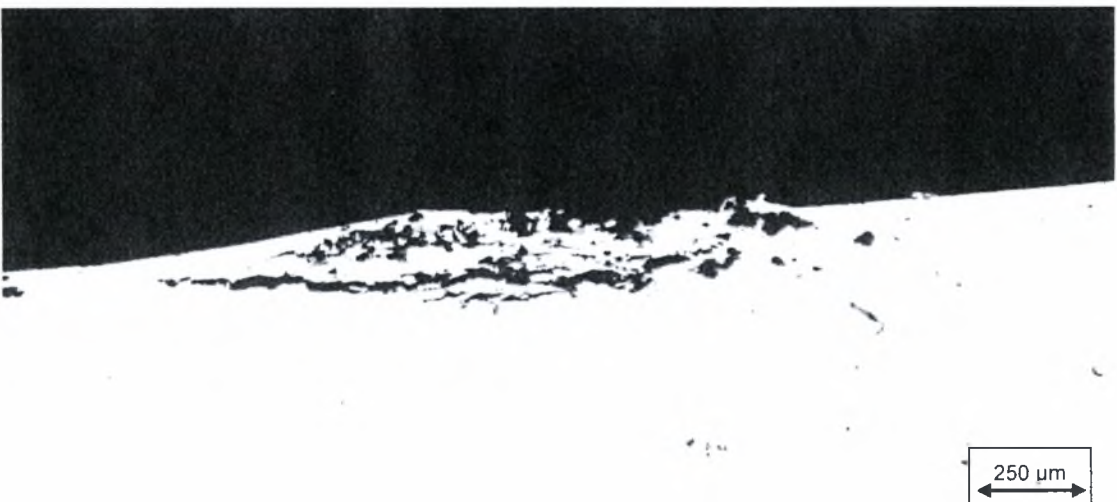
**Εικόνα Z-112:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A48 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες. Pitting και περικρυσταλλική διάβρωση.



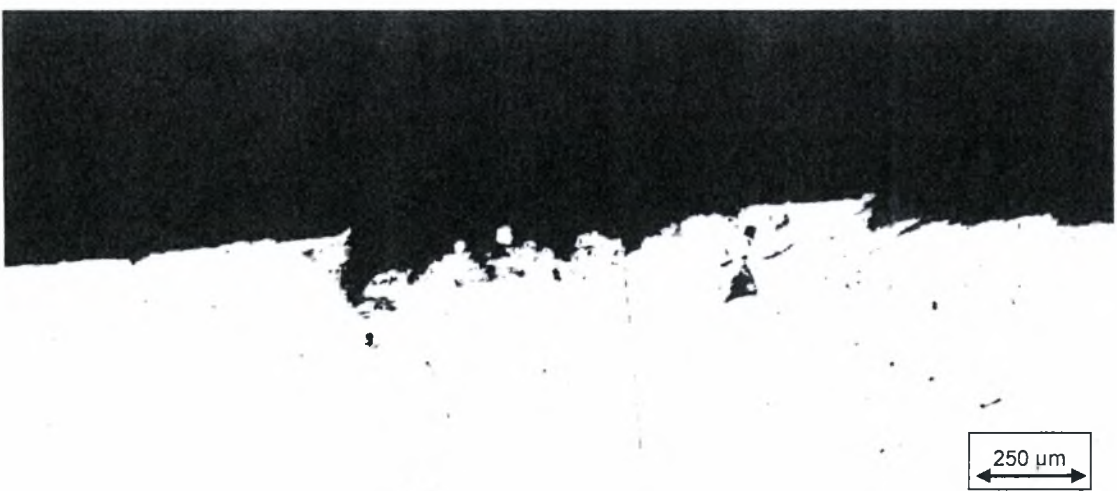
**Δοκίμιο A72**



**Εικόνα Z-113:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες. Έντονο Exfoliation.

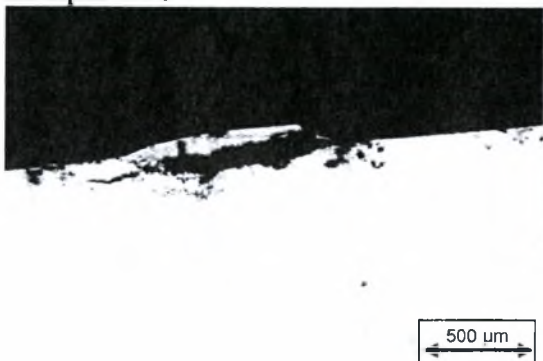


**Εικόνα Z-114:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες. Exfoliation.

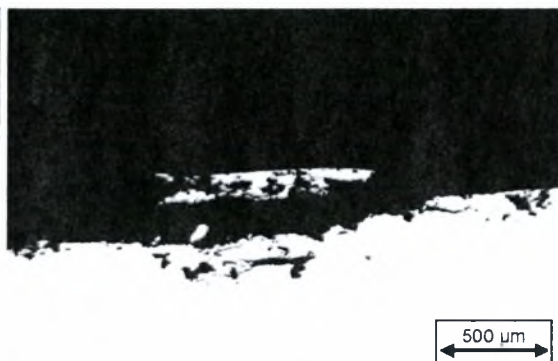


**Εικόνα Z-115:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A72 πειράματος EXCO Test Al 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.

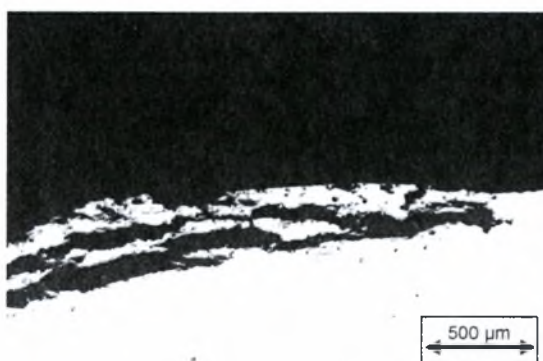
## Δοκίμιο A96



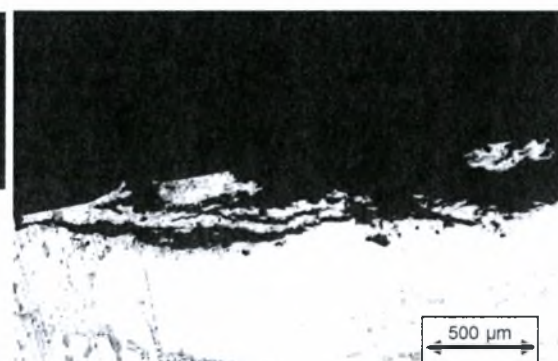
**Εικόνα Z-116:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Έντονο Exfoliation.



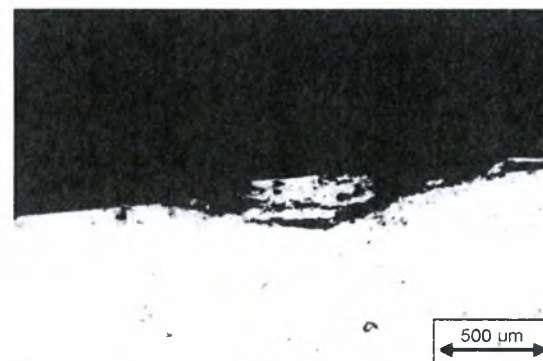
**Εικόνα Z-117:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Έντονο Exfoliation.



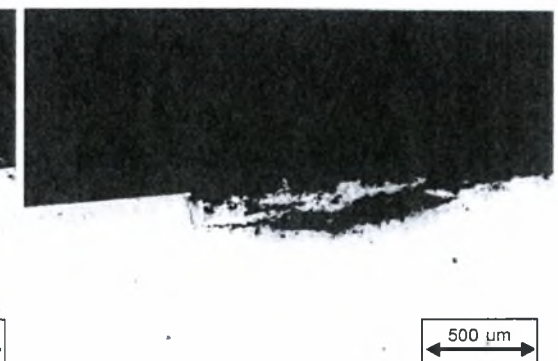
**Εικόνα Z-118:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Έντονο Exfoliation.



**Εικόνα Z-119:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Έντονο Exfoliation.



**Εικόνα Z-120:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Exfoliation.

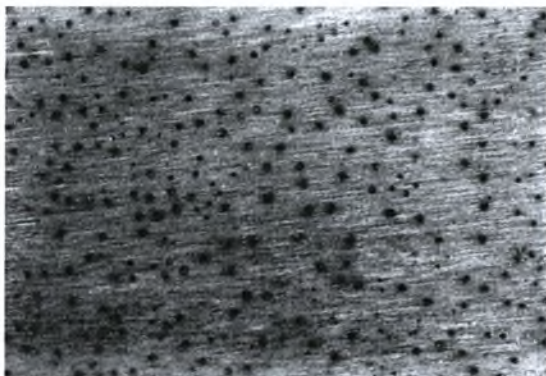


**Εικόνα Z-121:** Μεταλλογραφία δοκιμίου A96 πειράματος EXCO Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες. Exfoliation.

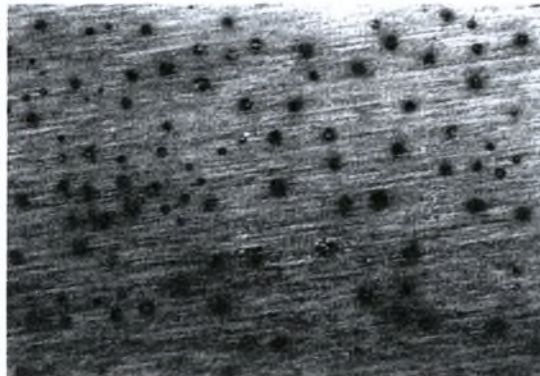
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ “Η”

### ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΙ 2024-T3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΜΕ MODIFIED EXCO TEST

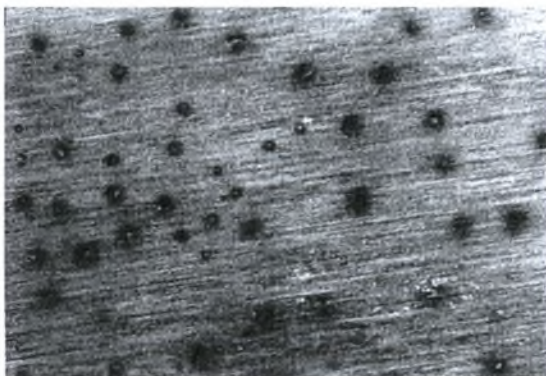
#### Δοκίμιο M1



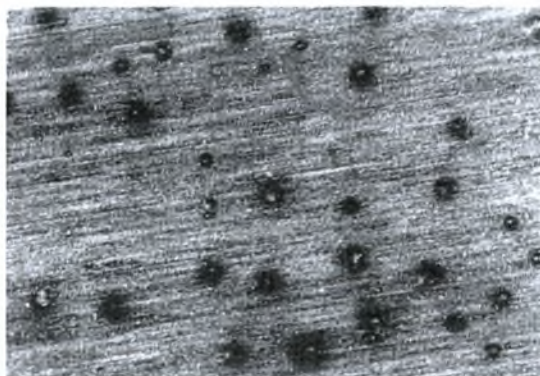
**Εικόνα Η-1:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες.



**Εικόνα Η-2:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες.

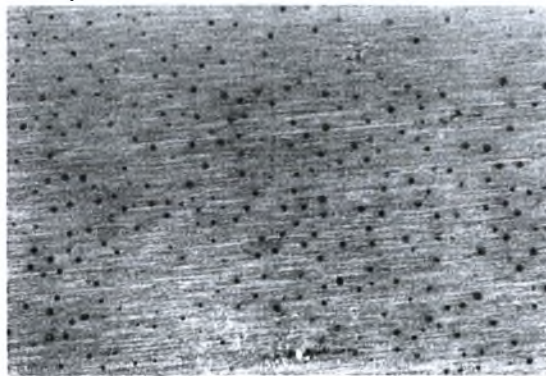


**Εικόνα Η-3:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες.

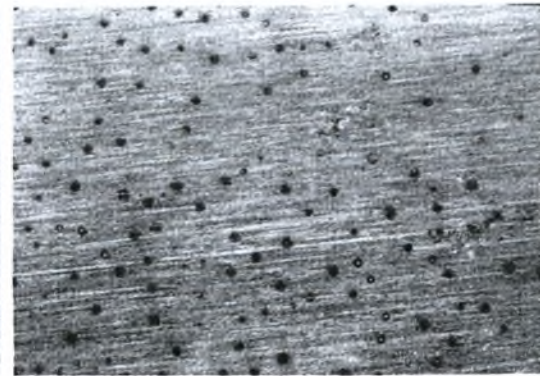


**Εικόνα Η-4:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες.

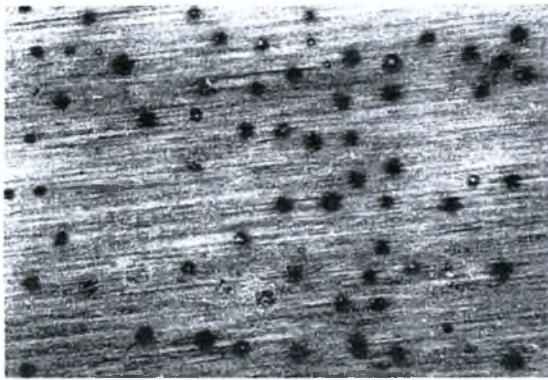
#### Δοκίμιο M2



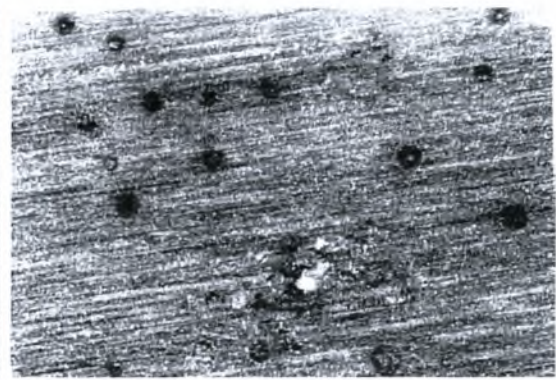
**Εικόνα Η-5:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα Η-6:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες. Exfoliation και Pitting.



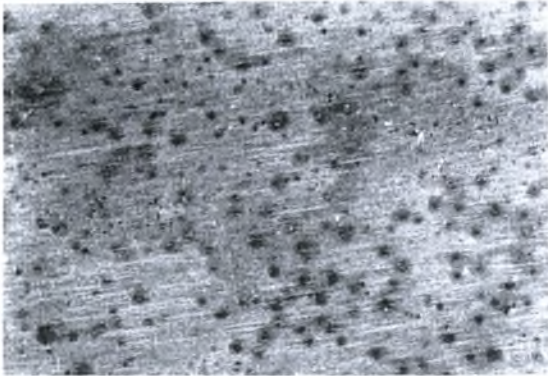
**Εικόνα Η-7:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



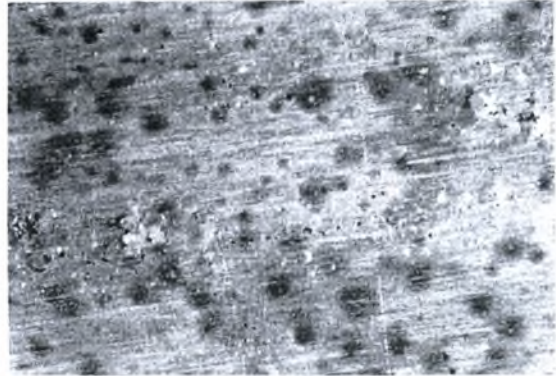
**Εικόνα Η-8:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες. Exfoliation και Pitting.

### Δοκίμιο M3

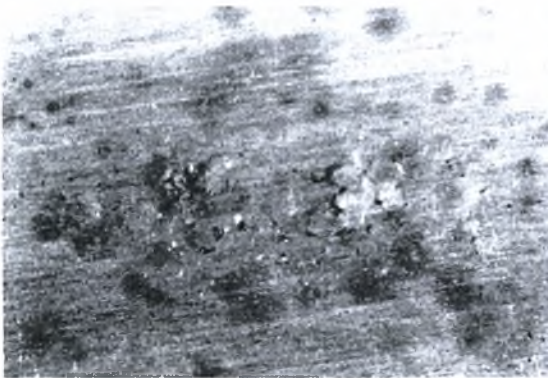
#### Άνω Επιφάνεια



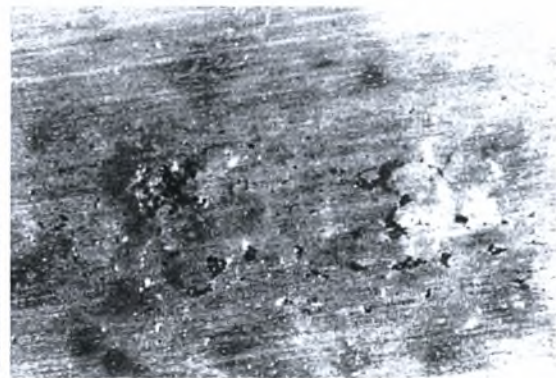
**Εικόνα Η-9:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες. Exfoliation και Pitting



**Εικόνα Η-10:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες. Exfoliation και Pitting.

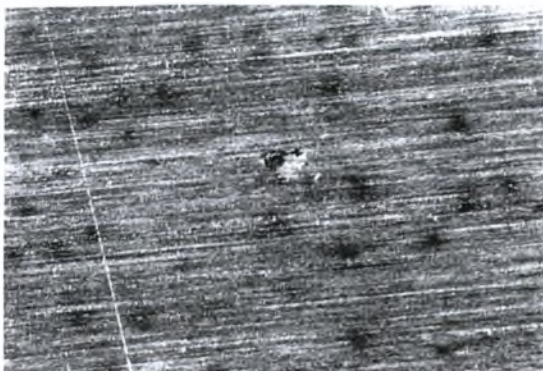


**Εικόνα Η-11:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες. Exfoliation.

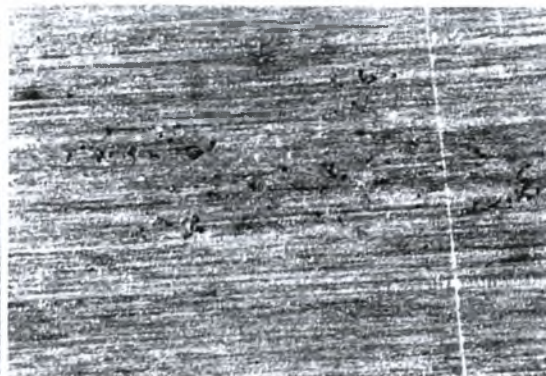


**Εικόνα Η-12:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες. Exfoliation.

### Κάτω Επιφάνεια



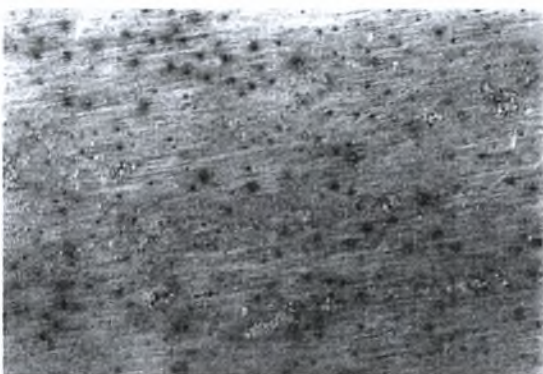
**Εικόνα Η-13:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες. Exfoliation.



**Εικόνα Η-14:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες. Pitting.

### Δοκίμιο Μ4

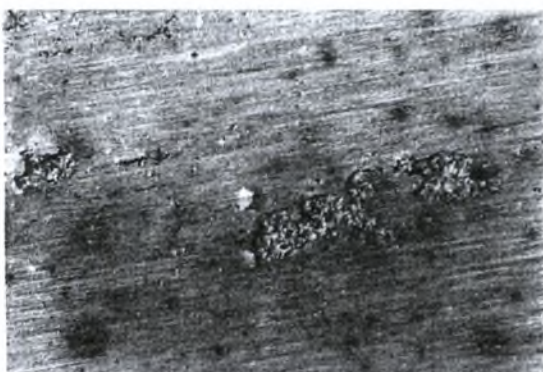
#### Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα Η-15:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα Η-16:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα Η-17:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα Η-18:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

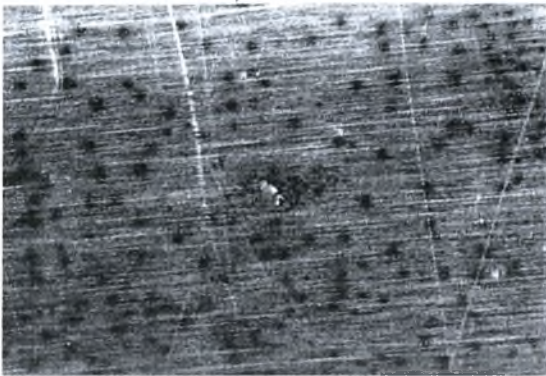


**Εικόνα Η-19:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

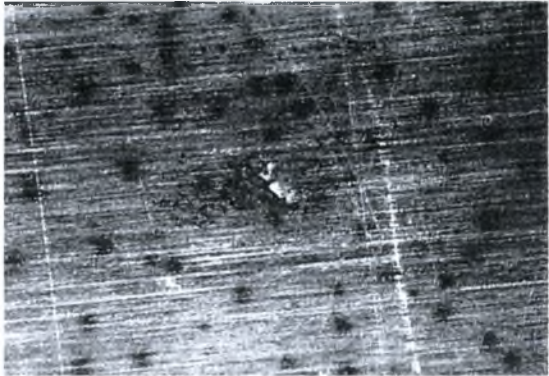


**Εικόνα Η-20:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

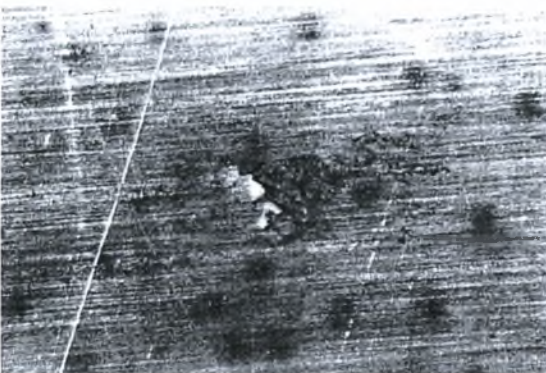
#### Κάτω Επιφάνεια



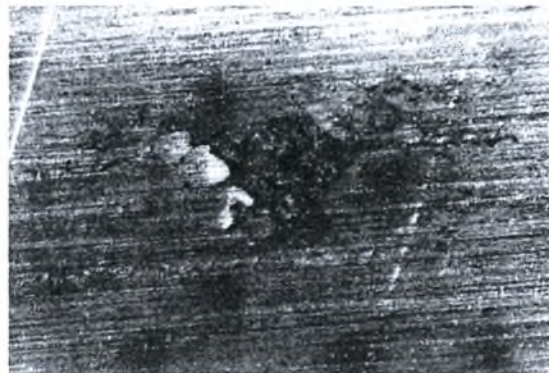
**Εικόνα Η-21:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



**Εικόνα Η-22:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



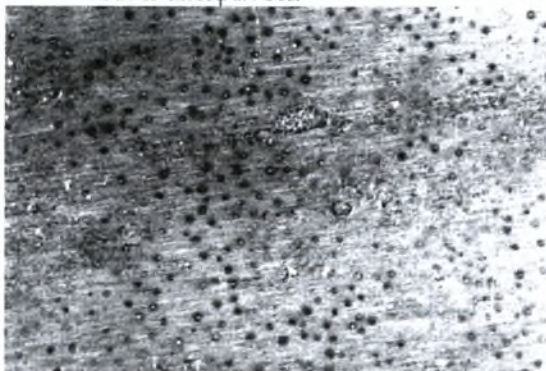
**Εικόνα Η-23:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



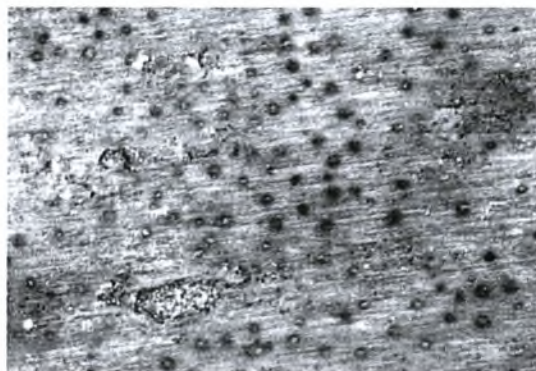
**Εικόνα Η-24:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

## Δοκίμιο M5

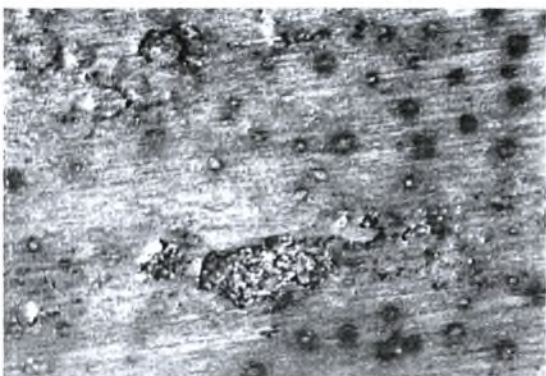
### Άνω Επιφάνεια



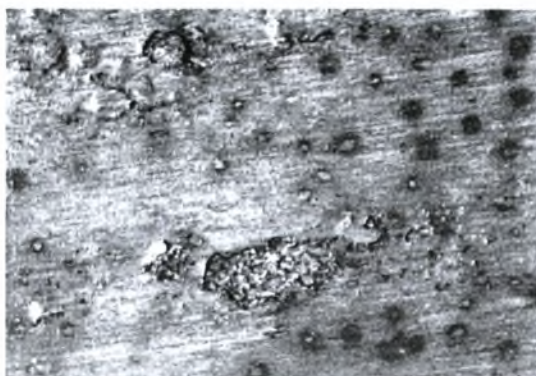
**Εικόνα H-25:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες. Exfoliation.



**Εικόνα H-26:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες. Exfoliation.

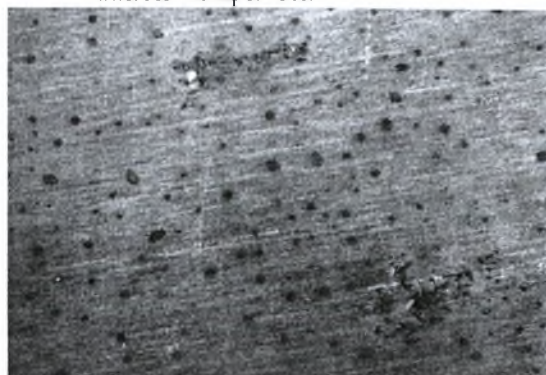


**Εικόνα H-27:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες. Exfoliation.

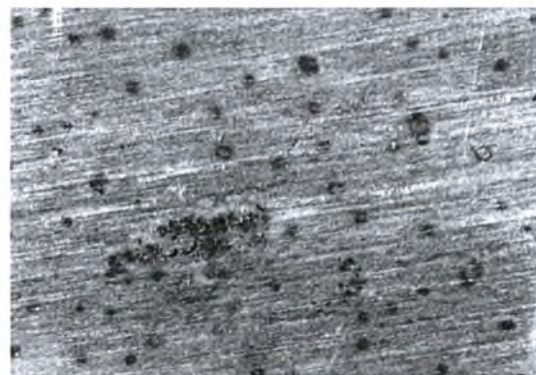


**Εικόνα H-28:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$  με φωτοσκίαση. Χρόνος έκθεσης 16 ώρες. Exfoliation.

### Κάτω Επιφάνεια



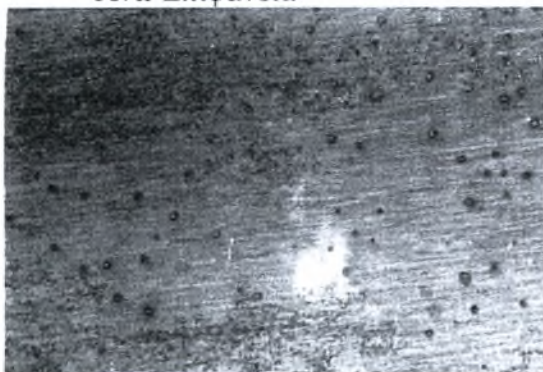
**Εικόνα H-29:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.



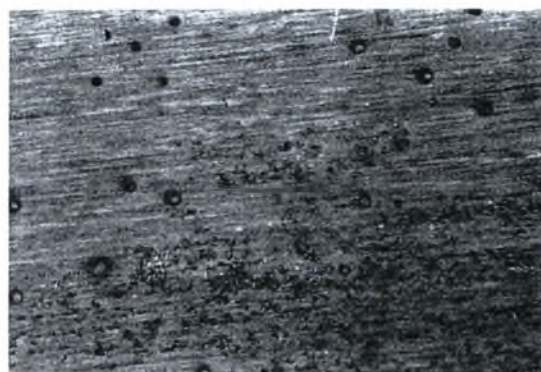
**Εικόνα H-30:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.

## Δοκίμιο Μ6

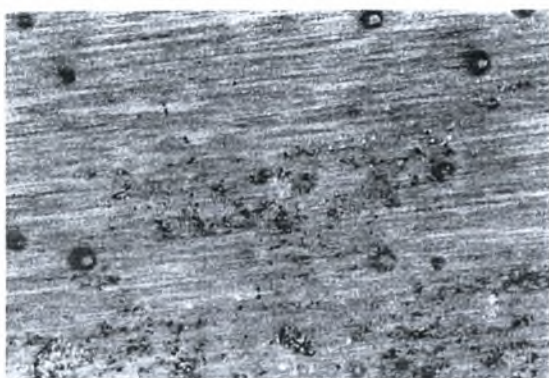
Άνω Επιφάνεια



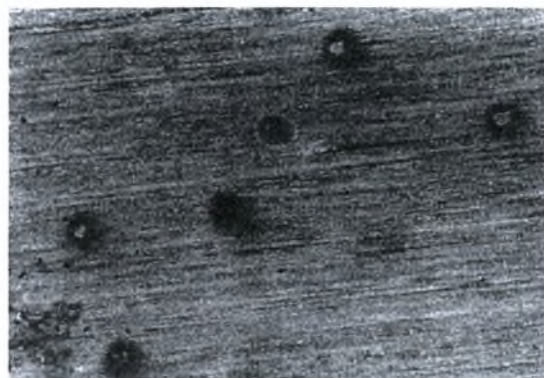
**Εικόνα Η-31:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



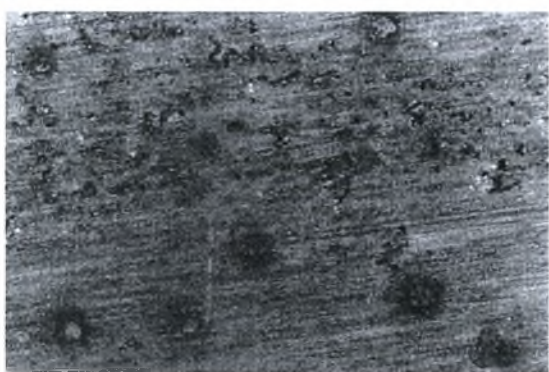
**Εικόνα Η-32:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Η-33:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Η-34:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Η-35:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

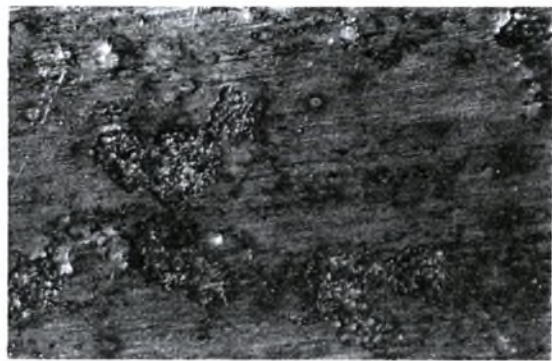


**Εικόνα Η-36:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.





**Εικόνα Η-37:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

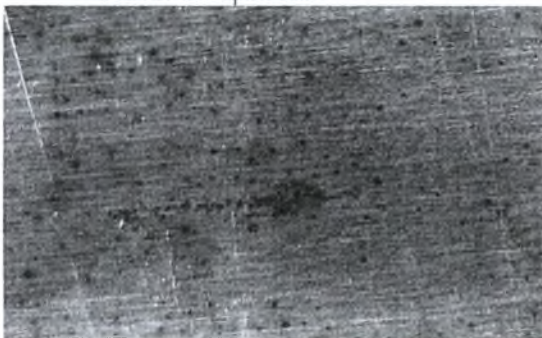


**Εικόνα Η-38:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Η-39:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

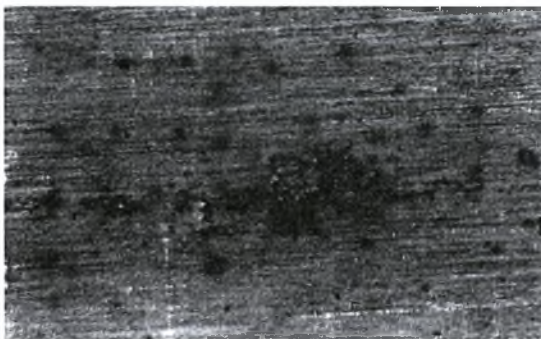
#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα Η-40:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Η-41:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



**Εικόνα Η-42:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.



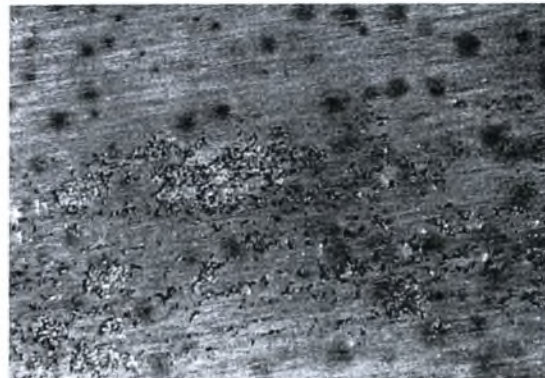
**Εικόνα Η-43:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

## Δοκίμιο Μ7

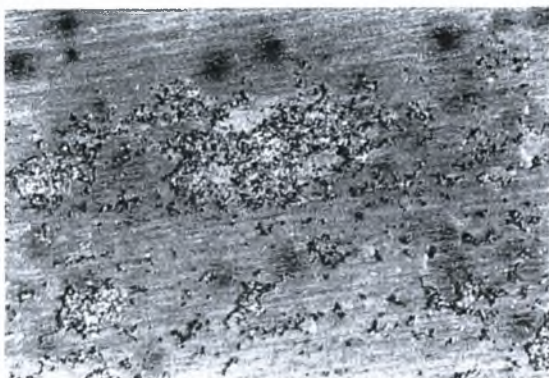
### Άνω Επιφάνεια



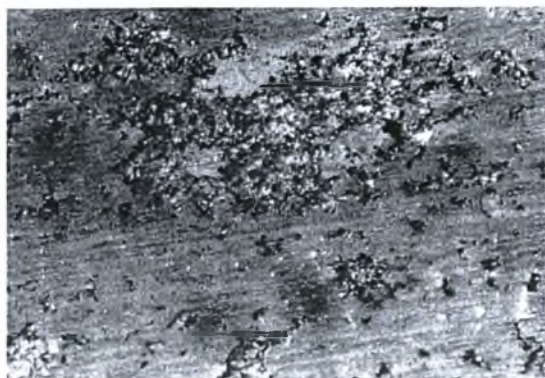
**Εικόνα Η-44:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Η-45:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



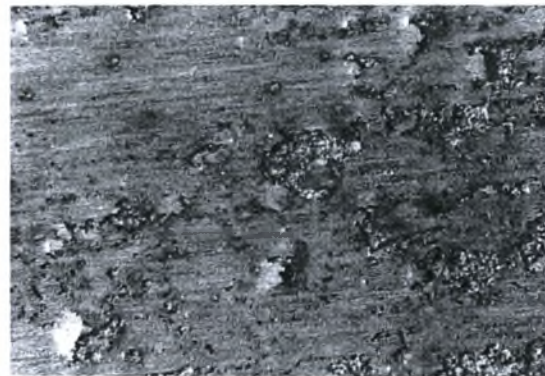
**Εικόνα Η-46:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα Η-47:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες. Ίδια θέση με εικόνα Η-46

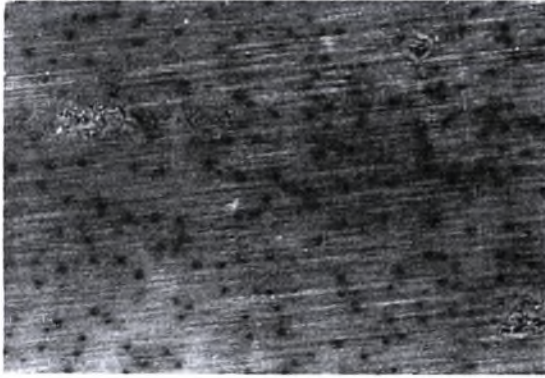


**Εικόνα Η-48:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.

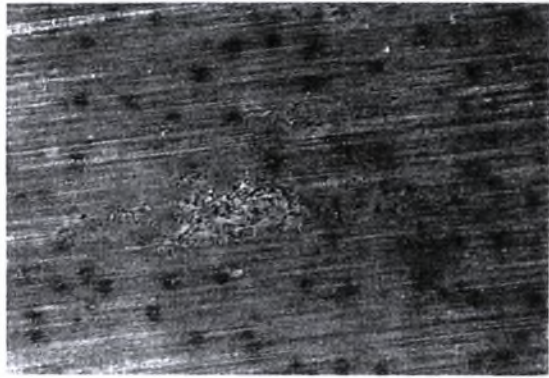


**Εικόνα Η-49:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες. Ίδια θέση με εικόνα Η-48

## Κάτω Επιφάνεια



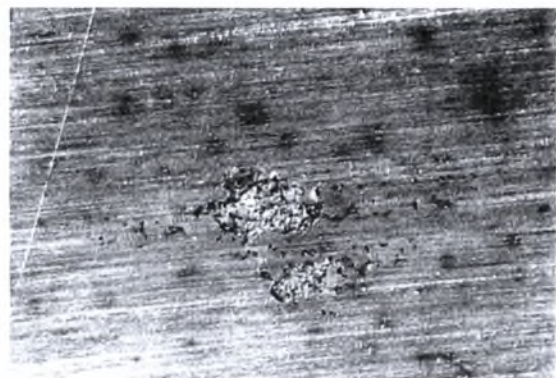
**Εικόνα H-50:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



**Εικόνα H-51:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



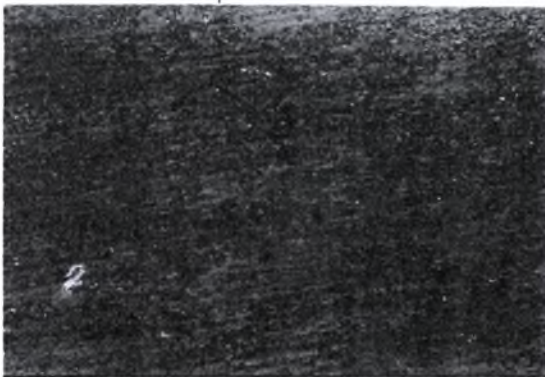
**Εικόνα H-52:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες. Ίδια θέση με εικόνα H-51.



**Εικόνα H-53:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.

## Δοκίμιο M8

### Άνω Επιφάνεια



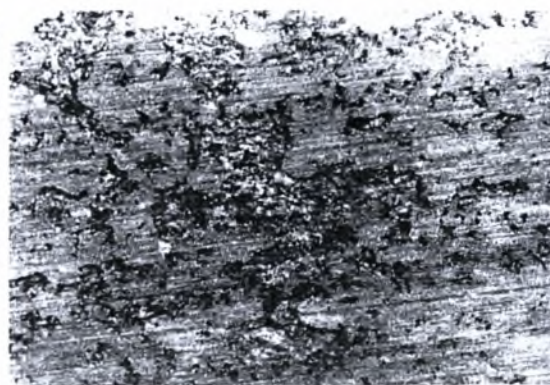
**Εικόνα H-54:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.



**Εικόνα H-55:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες. Exfoliation και Pitting.

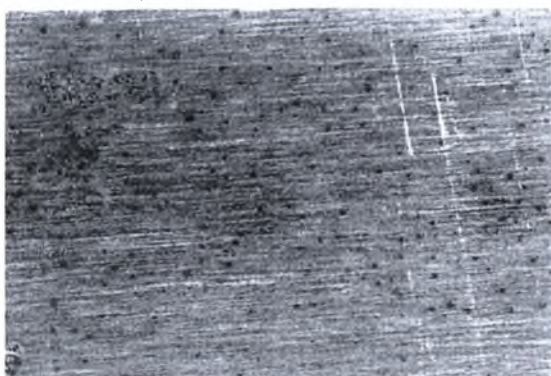


**Εικόνα Η-56:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.



**Εικόνα Η-57:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.

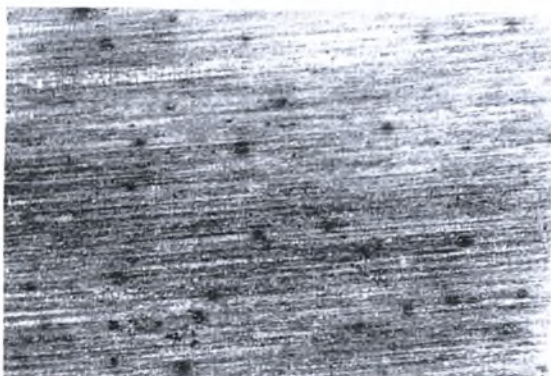
#### Κάτω Επιφάνεια



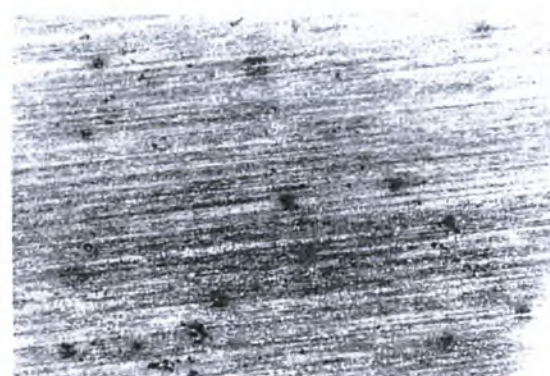
**Εικόνα Η-58:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες. Καθαρότερη από την άνω επιφάνεια.



**Εικόνα Η-59:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες. Καθαρότερη από την άνω επιφάνεια.



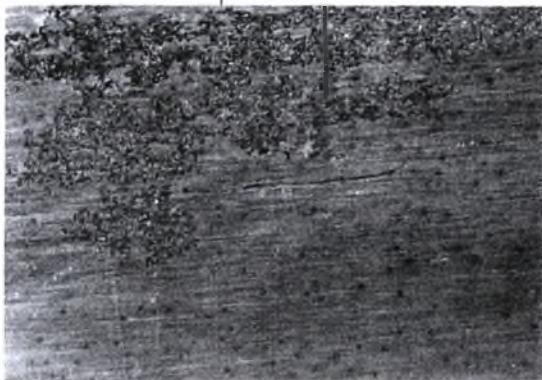
**Εικόνα Η-60:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.



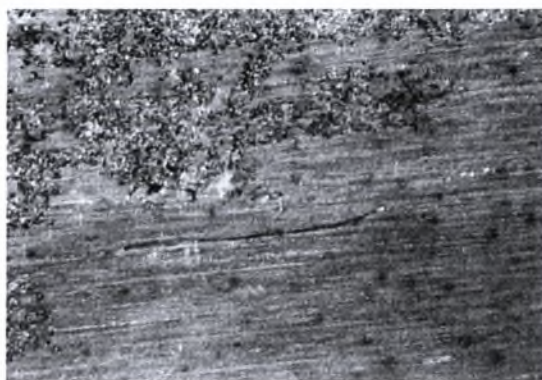
**Εικόνα Η-61:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.

## Δοκίμιο M9

### Άνω Επιφάνεια



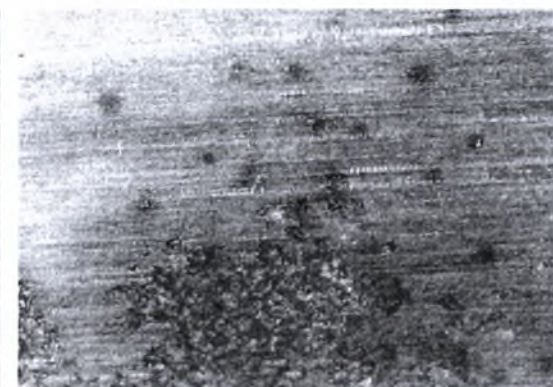
**Εικόνα H-62:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα H-63:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα H-64:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα H-65:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα H-66:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα H-67:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Η-68:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Η-69:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.

#### Κάτω Επιφάνεια



**Εικόνα Η-70:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Η-71:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Η-72:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Η-73:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



**Εικόνα Η-74:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



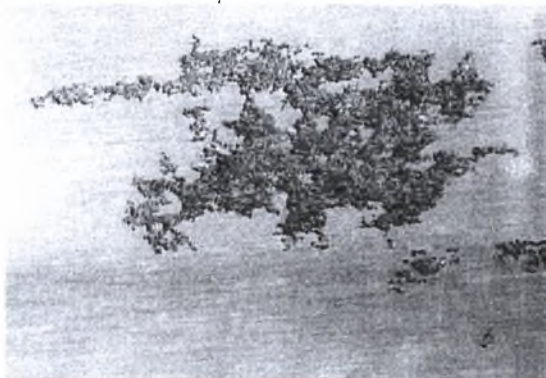
**Εικόνα Η-75:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



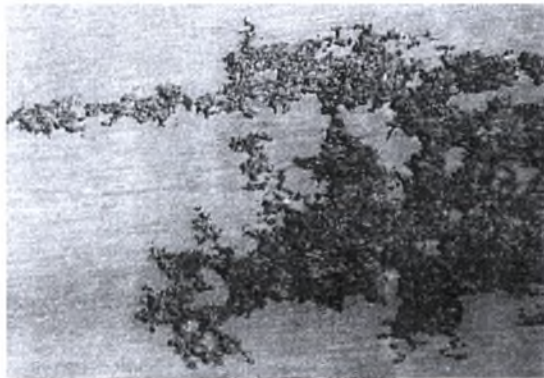
**Εικόνα Η-76:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.

### Δοκίμιο Μ10

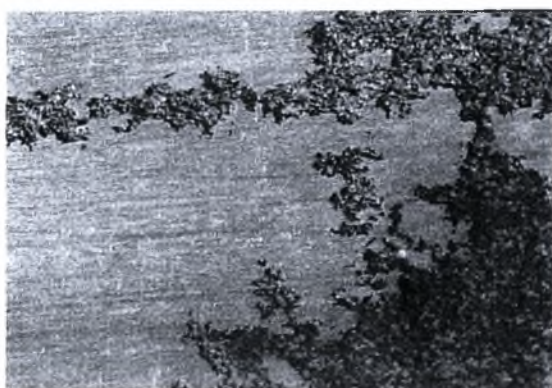
Άνω Επιφάνεια



**Εικόνα Η-77:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



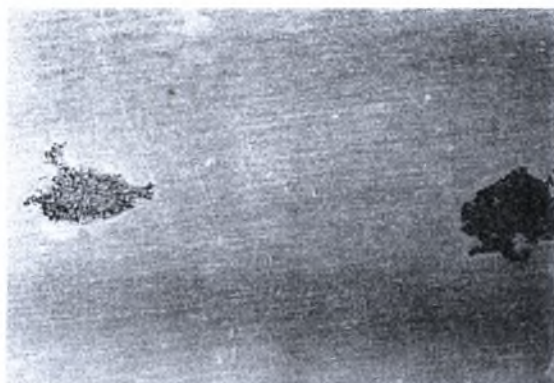
**Εικόνα Η-78:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



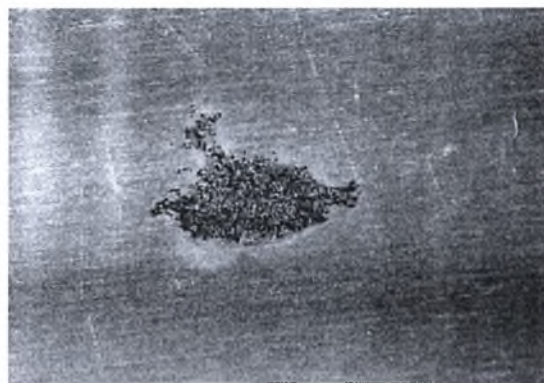
**Εικόνα Η-79:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Η-80:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Η-81:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



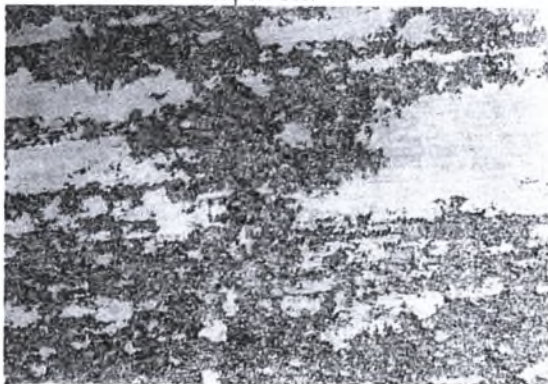
**Εικόνα Η-82:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Η-83:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Μ10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



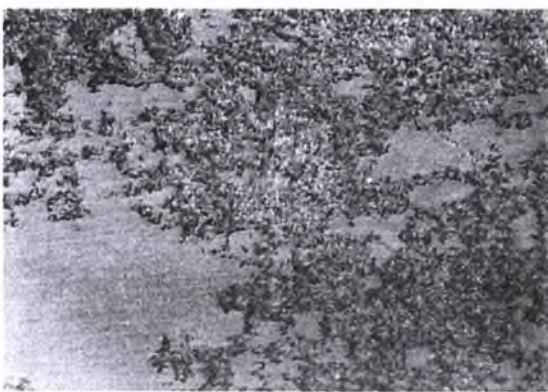
### Κάτω Επιφάνεια



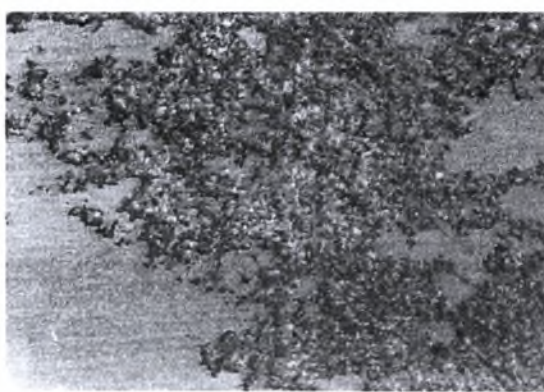
**Εικόνα Η-84:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Η-85:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



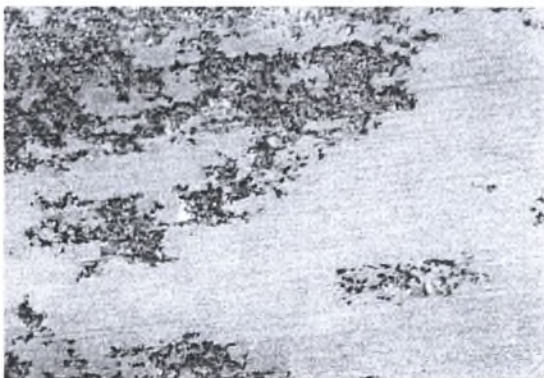
**Εικόνα Η-86:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Η-87:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Η-88:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



**Εικόνα Η-89:** Στερεοσκοπία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.

**ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΙ 2024-T3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ  
ΜΕ MODIFIED EXCO TEST**

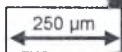
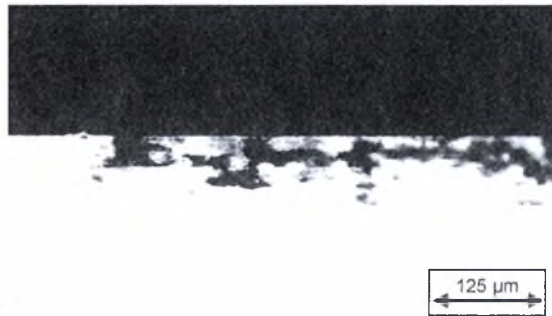
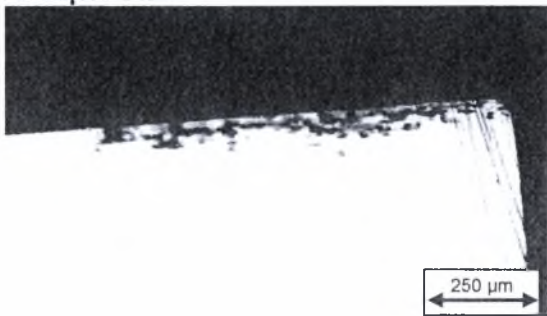
**Δοκίμιο M1**



**Εικόνα H-90:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες.

**Εικόνα H-91:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M1 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 2 ώρες.

**Δοκίμιο M2**



**Εικόνα H-92:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.

**Εικόνα H-93:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.



**Εικόνα H-94:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M2 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 50$ . Χρόνος έκθεσης 5 ώρες.

**Δοκίμιο M3**



**Εικόνα H-95:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.

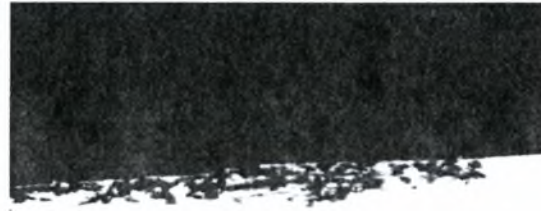
**Εικόνα H-96:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M3 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 8 ώρες.

### Δοκίμιο M4



500 μm

**Εικόνα Η-97:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.



250 μm

**Εικόνα Η-98:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M4 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 12 ώρες.

### Δοκίμιο M5



250 μm

**Εικόνα Η-99:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M5 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 16 ώρες.

### Δοκίμιο M6



250 μm

**Εικόνα Η-100:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M6 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 24 ώρες.

### Δοκίμιο M7



250 μm

**Εικόνα Η-101:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.



125 μm

**Εικόνα Η-102:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M7 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 36 ώρες.

### Δοκίμιο M8



250 μm

**Εικόνα H-103:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M8 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 48 ώρες.

### Δοκίμιο M9



250 μm



250 μm

**Εικόνα H-104:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.

**Εικόνα H-105:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.



250 μm

**Εικόνα H-106:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M9 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 72 ώρες.

## Δοκίμιο M10



500 μm

**Εικόνα H-107:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



500 μm

**Εικόνα H-108:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



250 μm

**Εικόνα H-109:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.



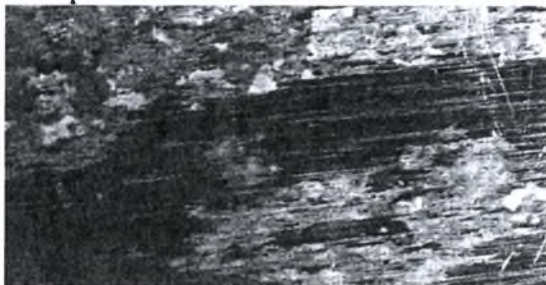
125 μm

**Εικόνα H-110:** Μεταλλογραφία δοκιμίου M10 πειράματος Modified EXCO Test. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 96 ώρες.

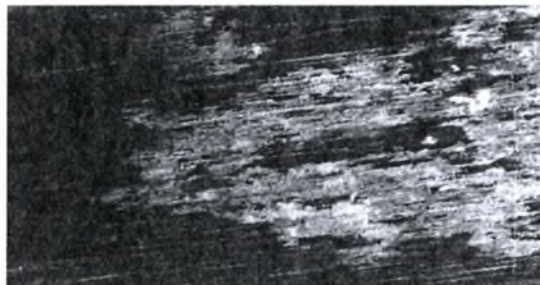
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ “Θ”

### ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΙ 2024-T3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ALTERNATE IMMERSION TEST

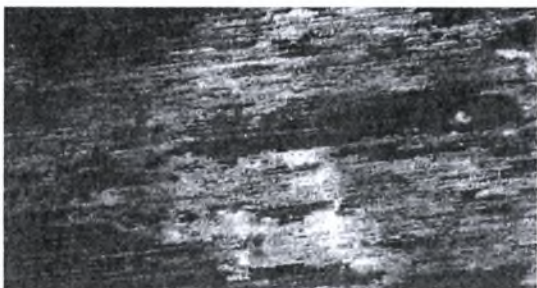
#### Δοκίμιο Δ1



**Εικόνα Θ-1:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.



**Εικόνα Θ-2:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.



**Εικόνα Θ-3:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.



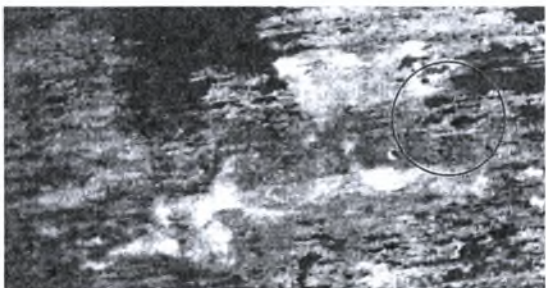
**Εικόνα Θ-4:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.



**Εικόνα Θ-5:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες. Έναρξη Pitting.



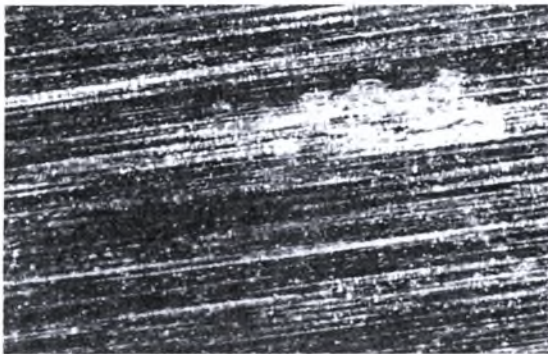
**Εικόνα Θ-6:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.



**Εικόνα Θ-7:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.



**Εικόνα Θ-8:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.

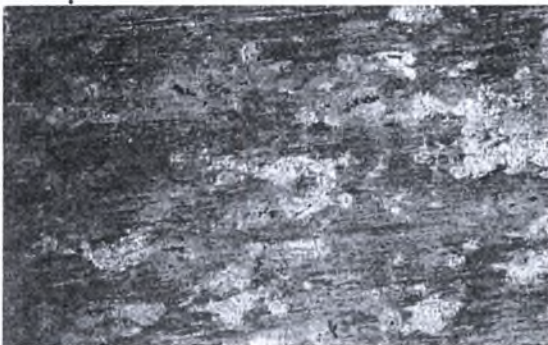


**Εικόνα Θ-9:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες. Κατάστικτη επιφάνεια από pits.



**Εικόνα Θ-10:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες. Θραύση φίλμ και έναρξη Pitting.

### Δοκίμιο Δ2



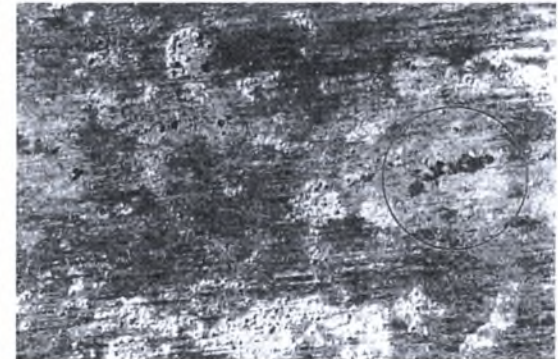
**Εικόνα Θ-11:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ2 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 5 ημέρες.



**Εικόνα Θ-12:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ2 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 5 ημέρες.

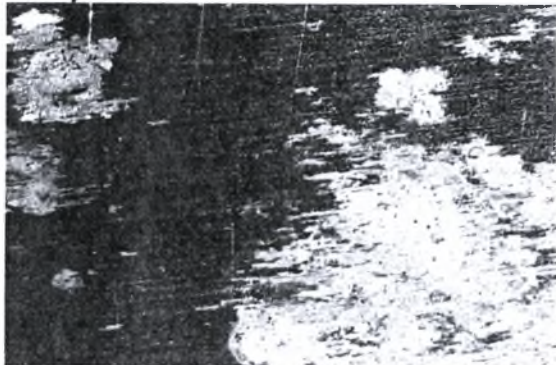


**Εικόνα Θ-13:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ2 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 5 ημέρες.



**Εικόνα Θ-14:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ2 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 5 ημέρες.

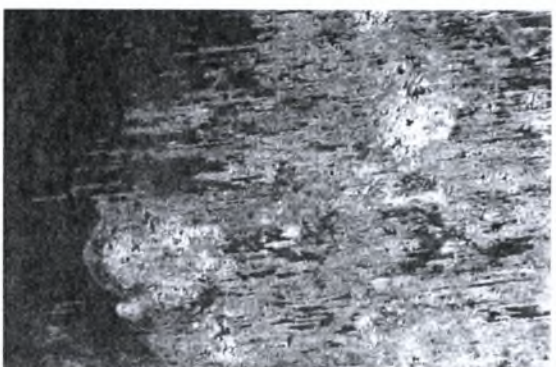
### Δοκίμιο Δ3



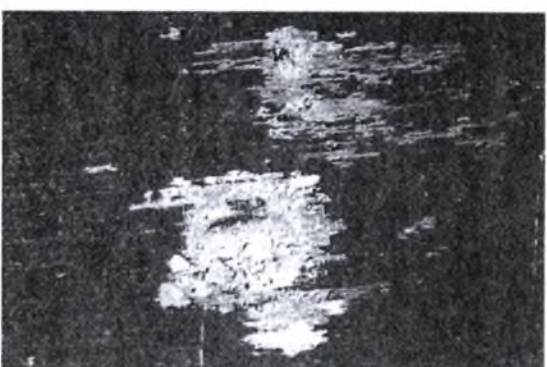
**Εικόνα Θ-15:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.



**Εικόνα Θ-16:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.



**Εικόνα Θ-17:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.



**Εικόνα Θ-18:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.



**Εικόνα Θ-19:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.

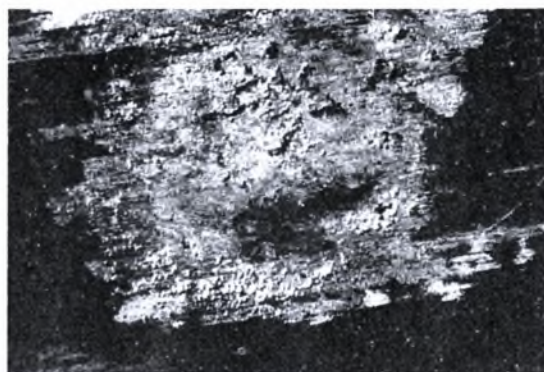


**Εικόνα Θ-20:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.





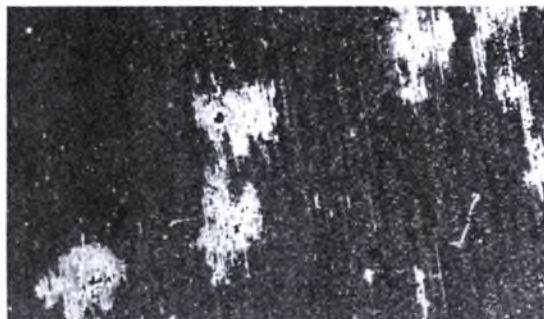
**Εικόνα Θ-21:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.



**Εικόνα Θ-22:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.

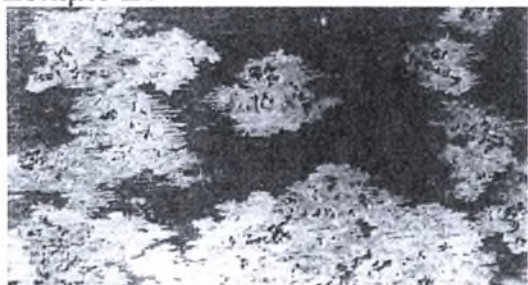


**Εικόνα Θ-23:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.

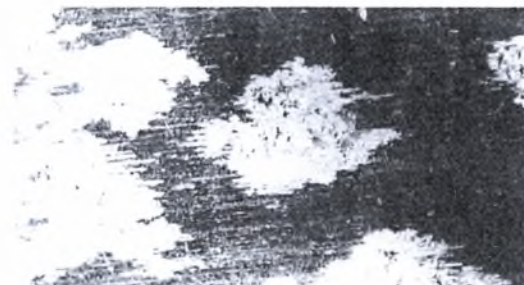


**Εικόνα Θ-24:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.

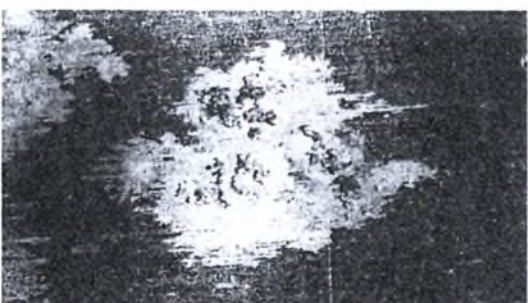
#### Δοκίμιο Δ4



**Εικόνα Θ-25:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



**Εικόνα Θ-26:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



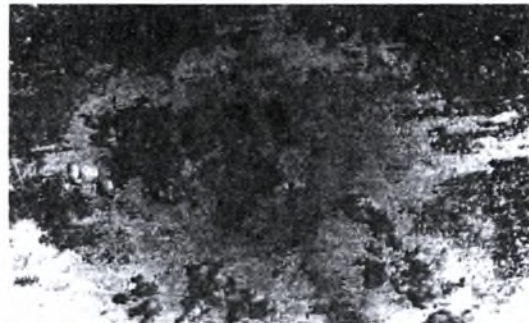
**Εικόνα Θ-27:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



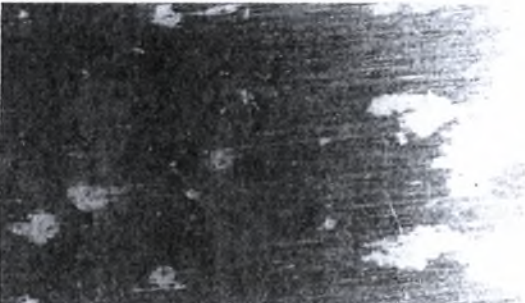
**Εικόνα Θ-28:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



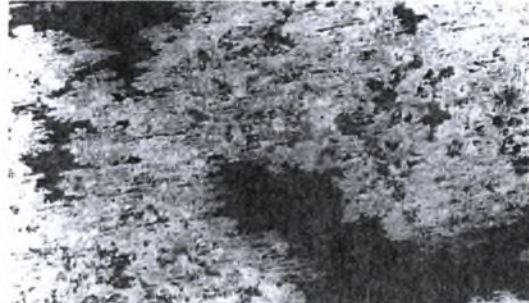
**Εικόνα Θ-29:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



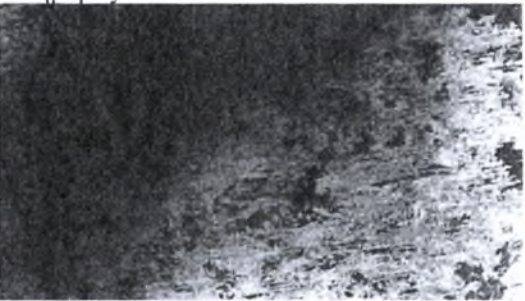
**Εικόνα Θ-30:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



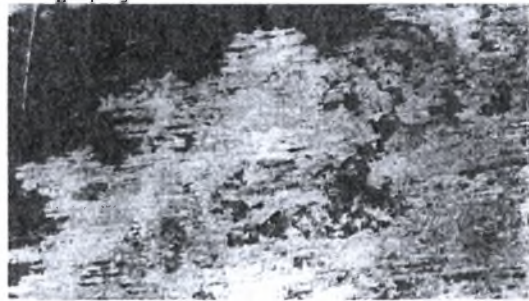
**Εικόνα Θ-31:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



**Εικόνα Θ-32:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



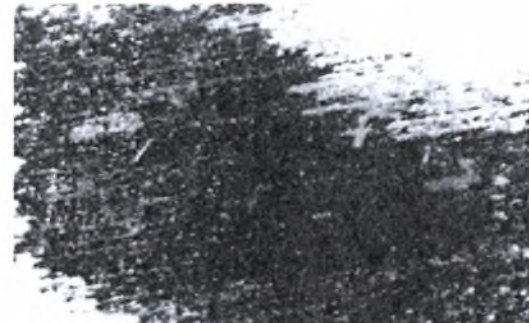
**Εικόνα Θ-33:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



**Εικόνα Θ-34:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



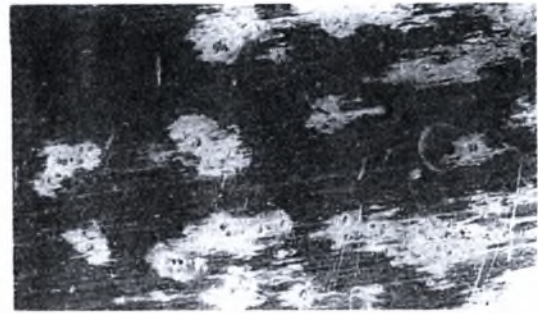
**Εικόνα Θ-35:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



**Εικόνα Θ-36:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες. Θραύση φιλμ οξειδίου.



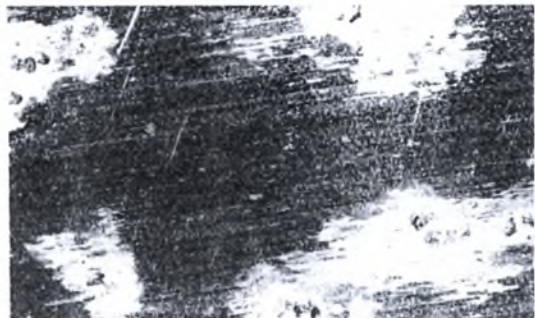
**Εικόνα Θ-37:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



**Εικόνα Θ-38:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.

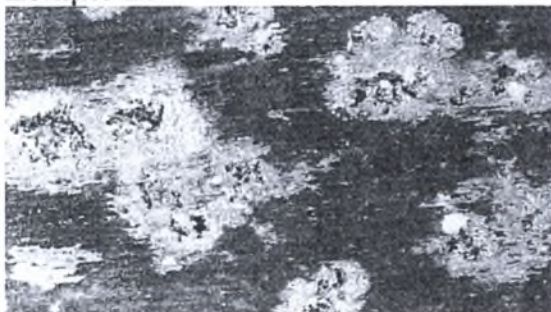


**Εικόνα Θ-39:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.



**Εικόνα Θ-40:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.

#### Δοκίμιο Δ5



**Εικόνα Θ-41:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



**Εικόνα Θ-42:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



**Εικόνα Θ-43:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες. Θραύση φιλμ και έναρξη pitting.



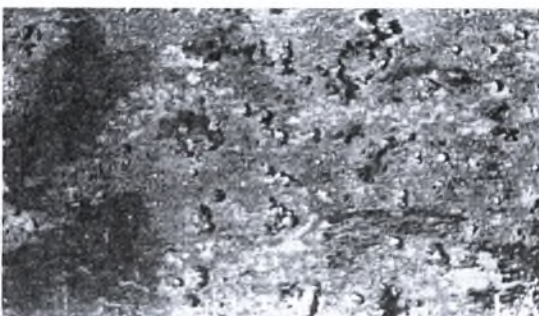
**Εικόνα Θ-44:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες. Θραύση φιλμ και επιφάνεια pit.



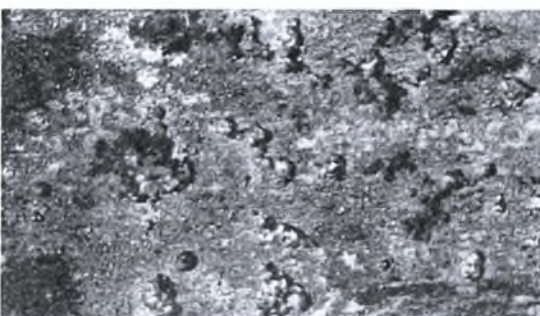
**Εικόνα Θ-45:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



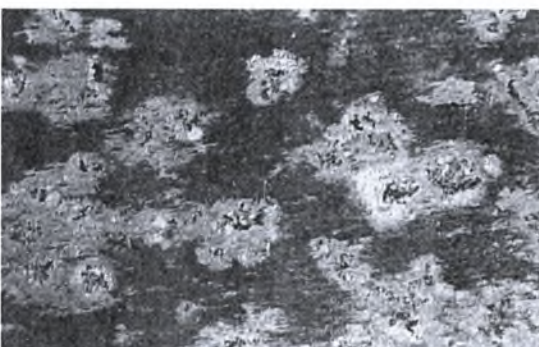
**Εικόνα Θ-46:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



**Εικόνα Θ-47:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



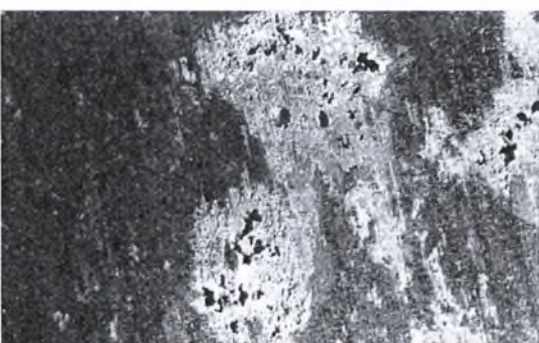
**Εικόνα Θ-48:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



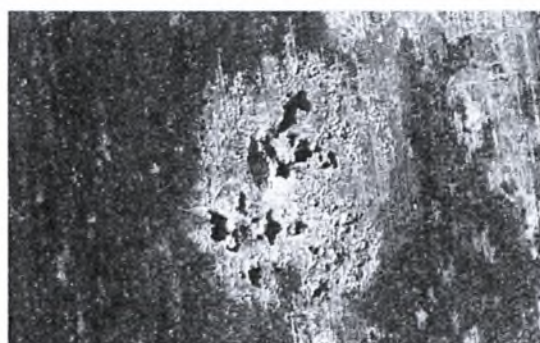
**Εικόνα Θ-49:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



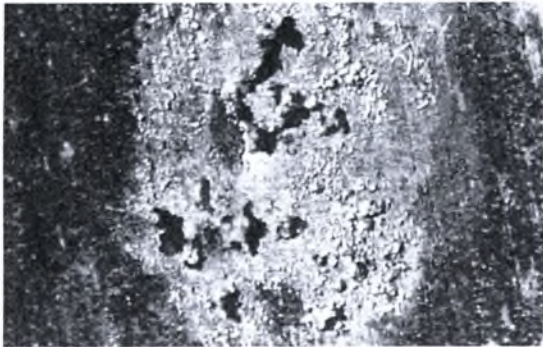
**Εικόνα Θ-50:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



**Εικόνα Θ-51:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



**Εικόνα Θ-52:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες. Exfoliation.

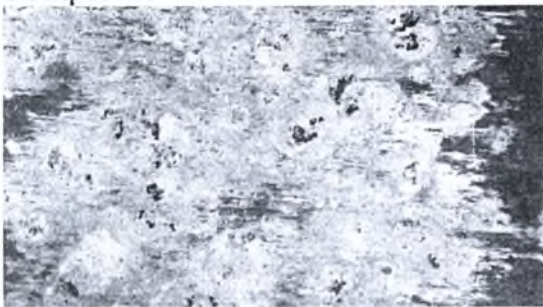


**Εικόνα Θ-53:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες. Exfoliation.

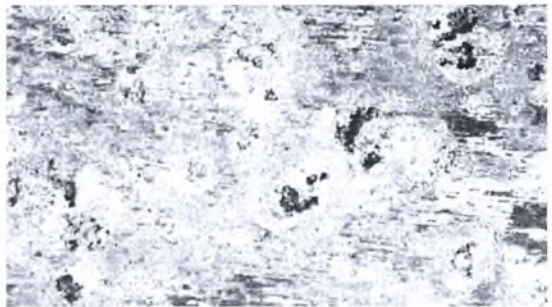


**Εικόνα Θ-54:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες. Exfoliation.

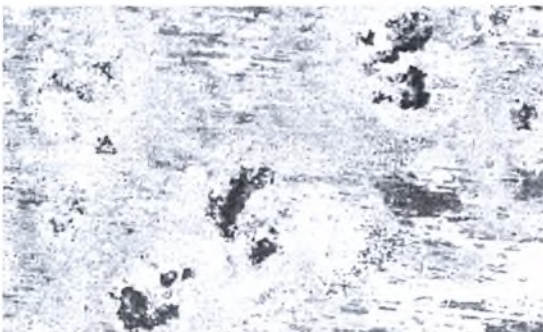
### Δοκίμιο Δ6



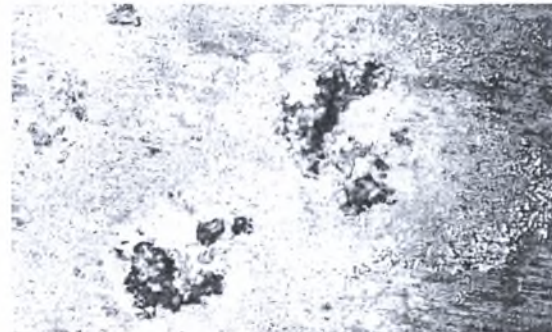
**Εικόνα Θ-55:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



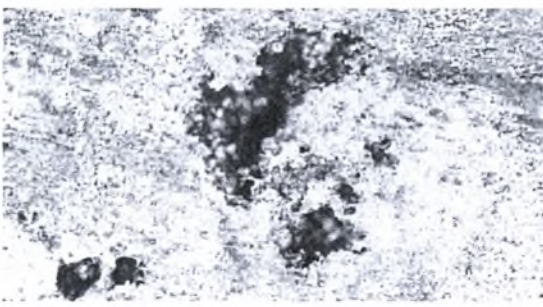
**Εικόνα Θ-56:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



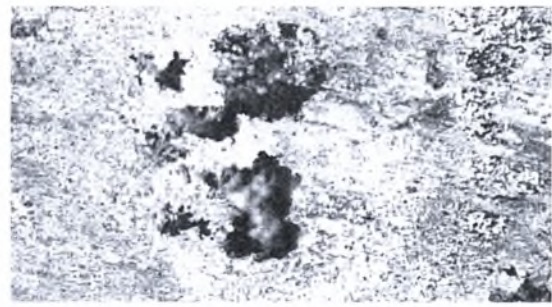
**Εικόνα Θ-57:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



**Εικόνα Θ-58:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



**Εικόνα Θ-59:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



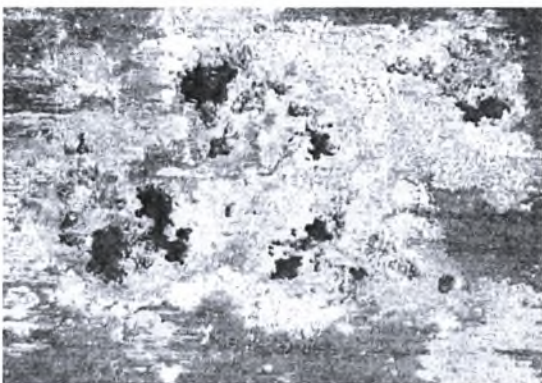
**Εικόνα Θ-60:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



**Εικόνα Θ-61:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



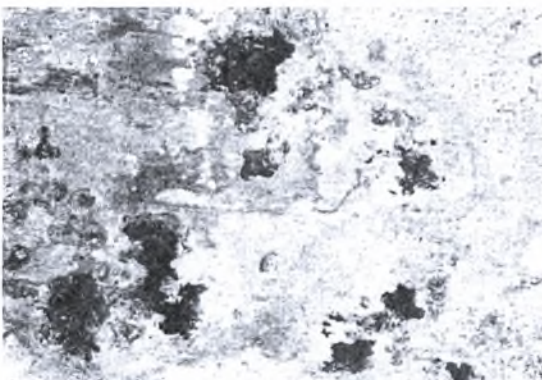
**Εικόνα Θ-62:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



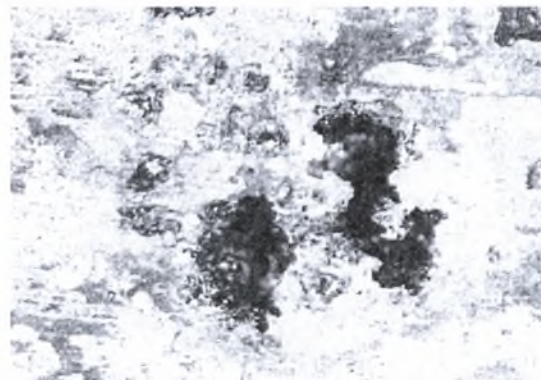
**Εικόνα Θ-63:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.



**Εικόνα Θ-64:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.

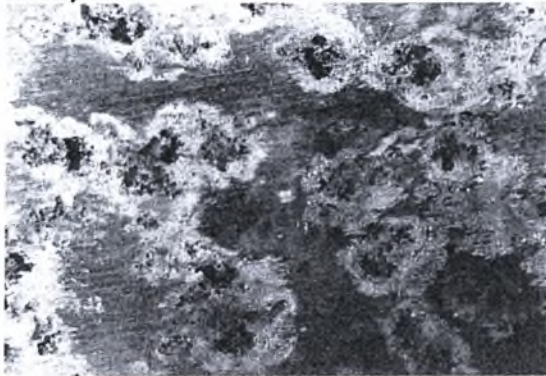


**Εικόνα Θ-65:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.

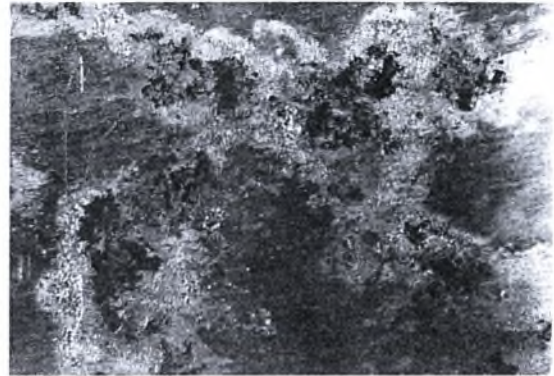


**Εικόνα Θ-66:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.

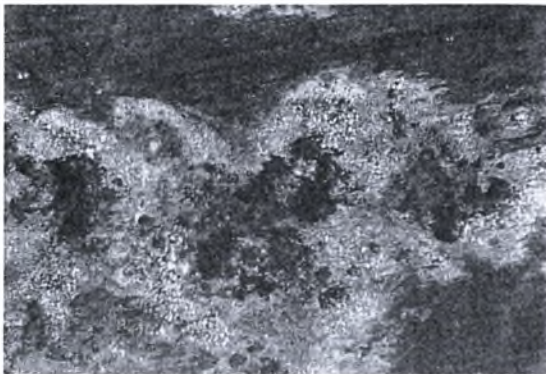
## Δοκίμιο Δ7



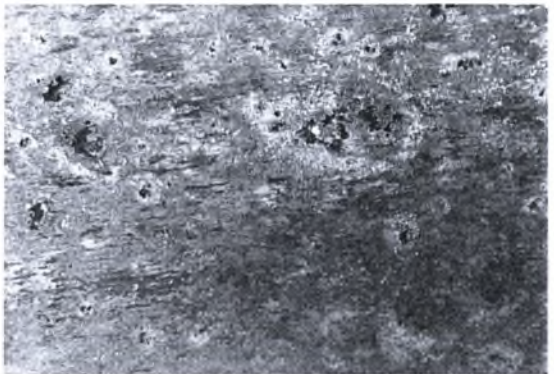
**Εικόνα Θ-67:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες. Pitting και απώλεια υλικού.



**Εικόνα Θ-68:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες. Pitting και απώλεια υλικού.



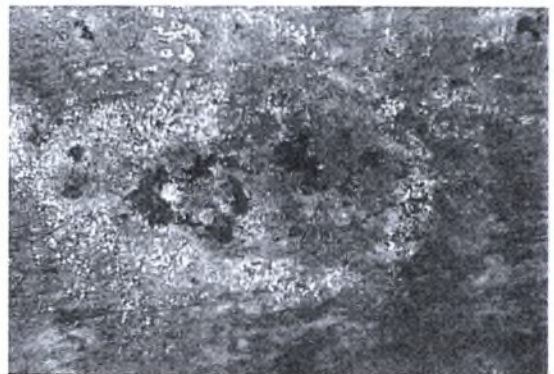
**Εικόνα Θ-69:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες. Pitting και απώλεια υλικού.



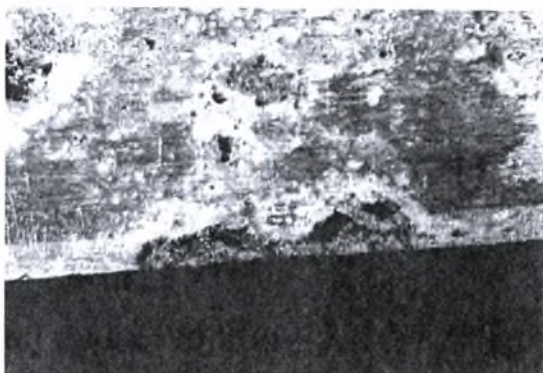
**Εικόνα Θ-70:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες. Pitting και απώλεια υλικού.



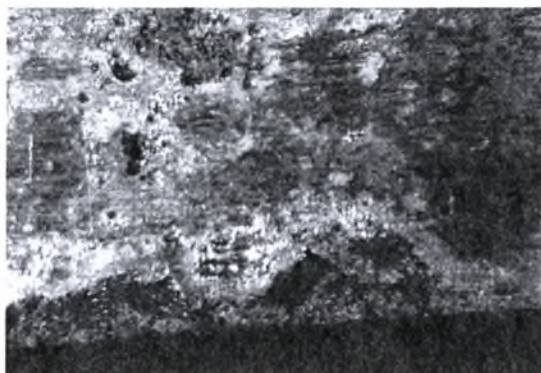
**Εικόνα Θ-71:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες.



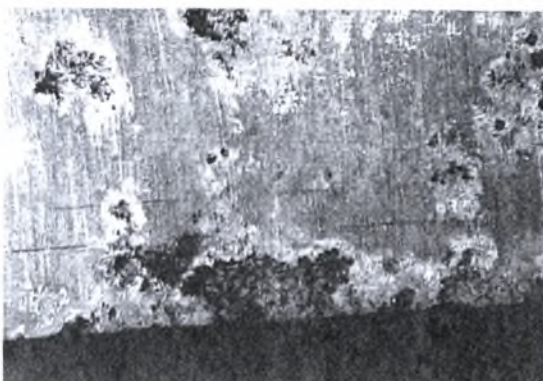
**Εικόνα Θ-72:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες.



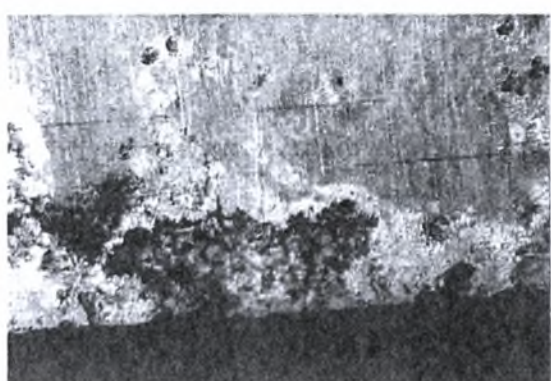
**Εικόνα Θ-73:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες. Ακμή δοκιμίου.



**Εικόνα Θ-74:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες. Ακμή δοκιμίου.

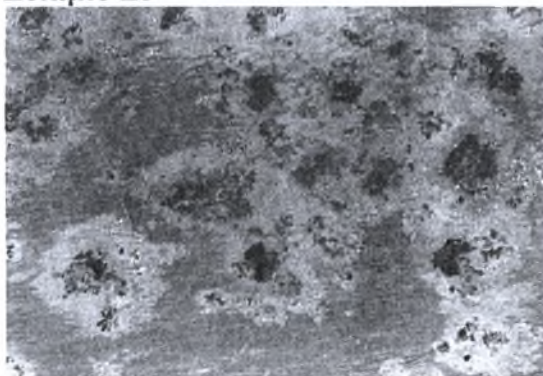


**Εικόνα Θ-75:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες. Ακμή δοκιμίου.

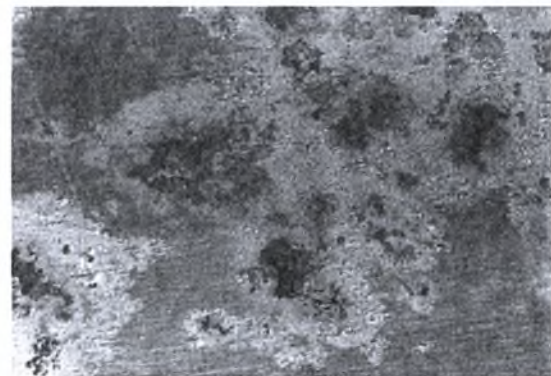


**Εικόνα Θ-76:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες. Ακμή δοκιμίου.

#### **Δοκίμιο Δ8**

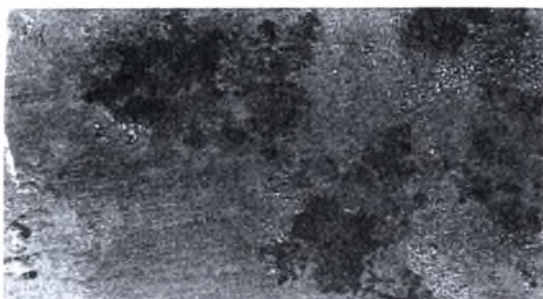


**Εικόνα Θ-77:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-78:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.

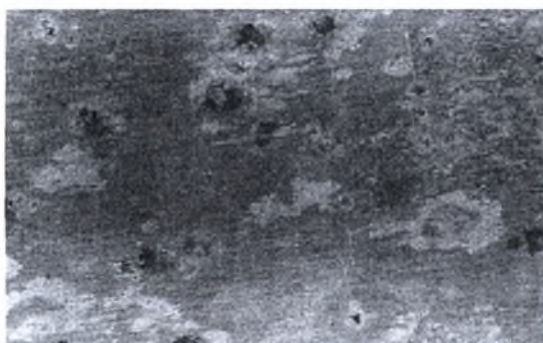




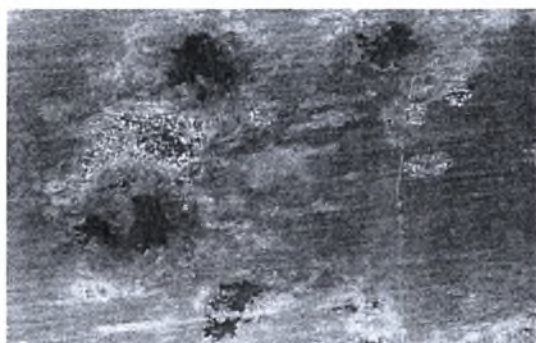
**Εικόνα Θ-79:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-80:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-81:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



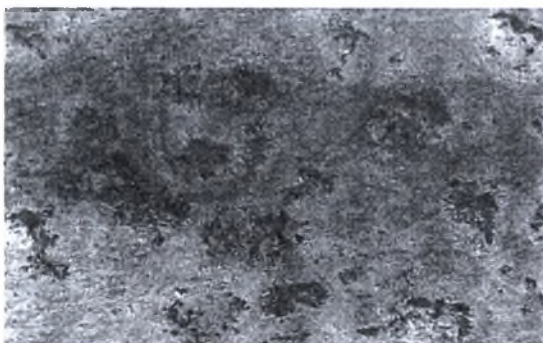
**Εικόνα Θ-82:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-83:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-84:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-85:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



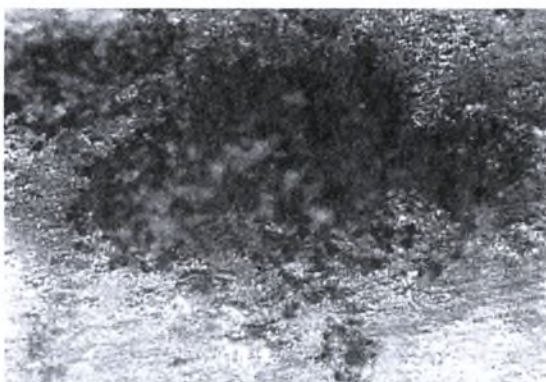
**Εικόνα Θ-86:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



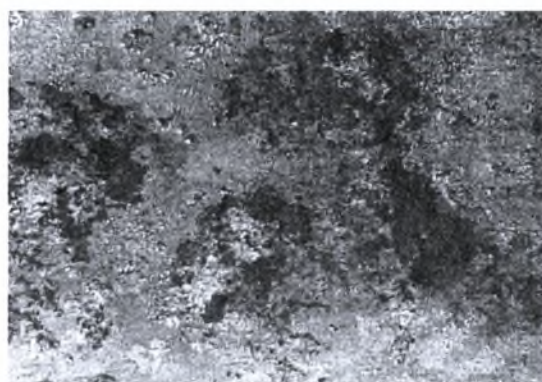
**Εικόνα Θ-87:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-88:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.

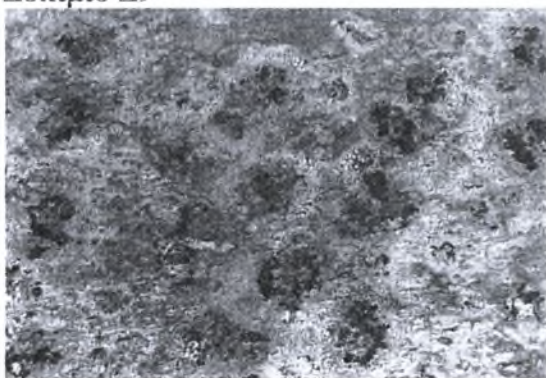


**Εικόνα Θ-89:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 40$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-90:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.

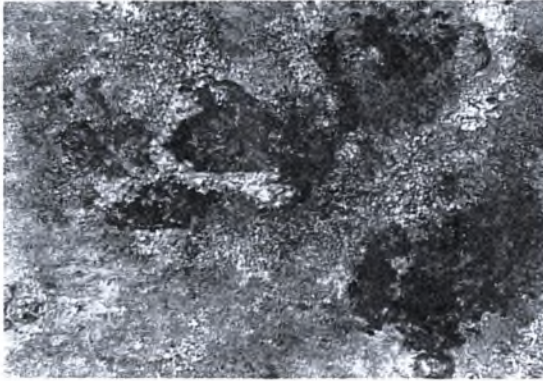
### Δοκίμιο Δ9



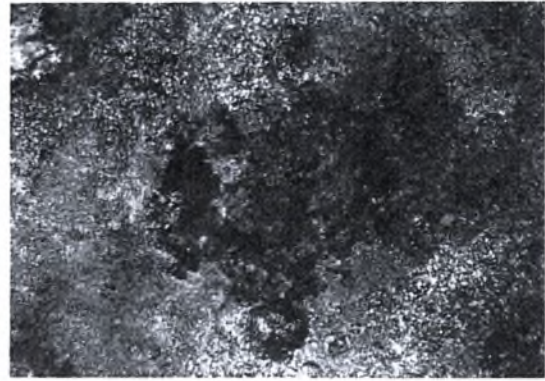
**Εικόνα Θ-91:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



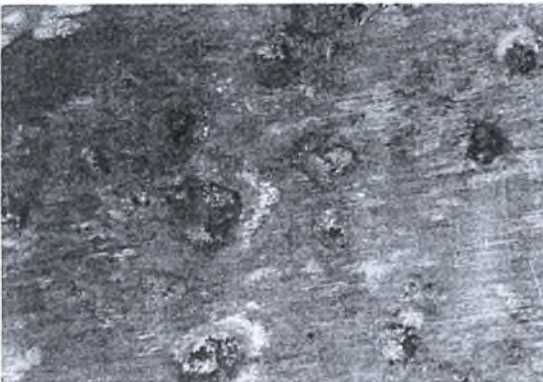
**Εικόνα Θ-92:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



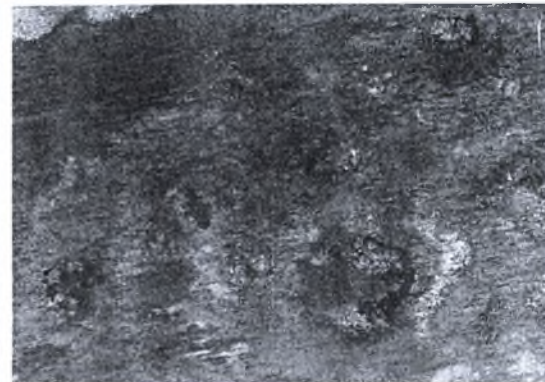
**Εικόνα Θ-93:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



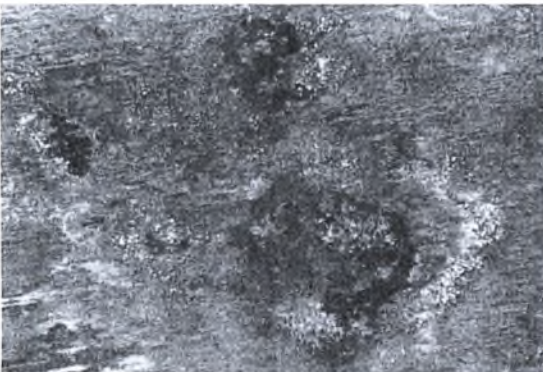
**Εικόνα Θ-94:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



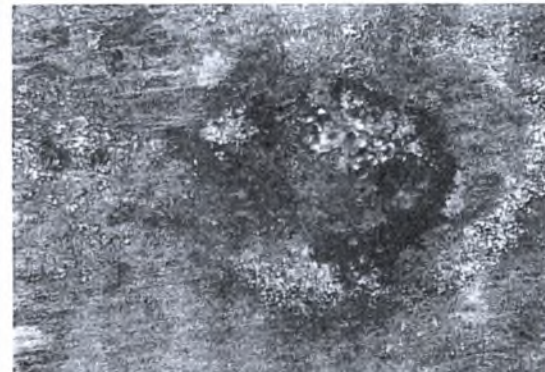
**Εικόνα Θ-95:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 6,5$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



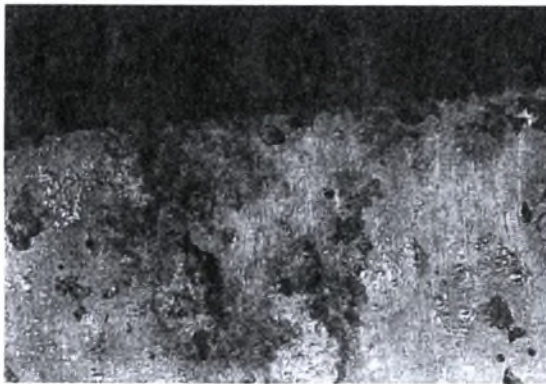
**Εικόνα Θ-96:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



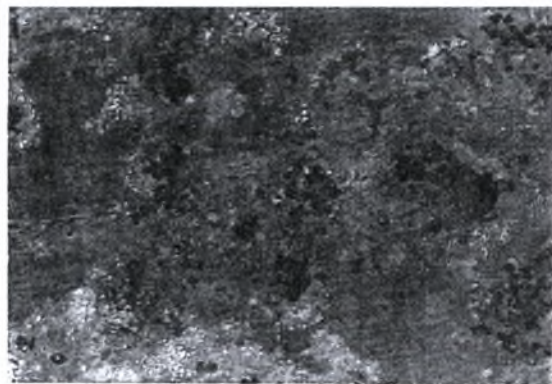
**Εικόνα Θ-97:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



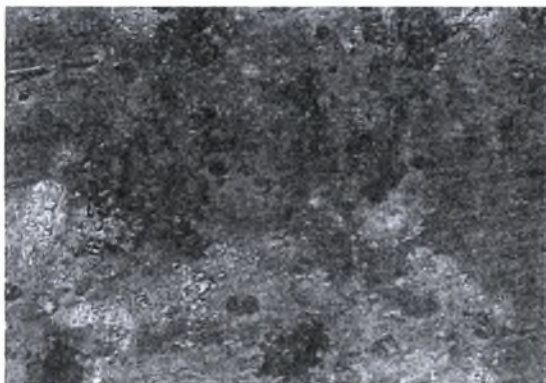
**Εικόνα Θ-98:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



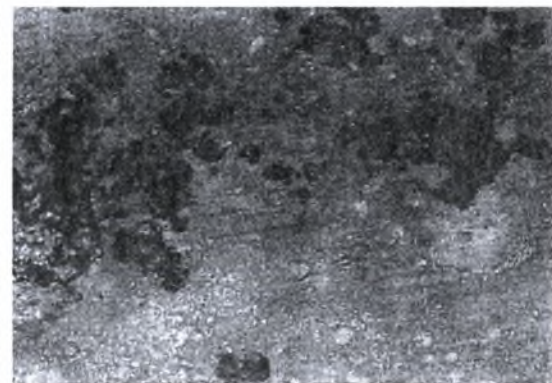
**Εικόνα Θ-99:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες. Ακμή δοκιμίου.



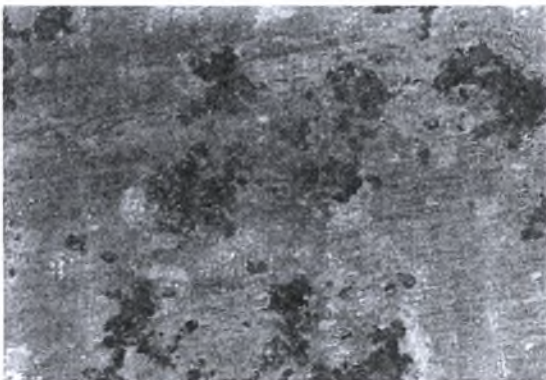
**Εικόνα Θ-100:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



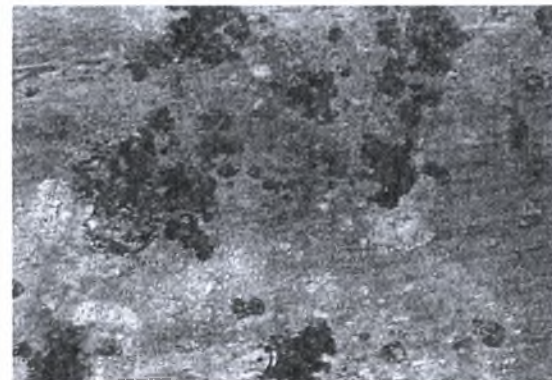
**Εικόνα Θ-101:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



**Εικόνα Θ-102:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 25$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



**Εικόνα Θ-103:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



**Εικόνα Θ-104:** Στερεοσκοπία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 16$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.

**ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΙ 2024-T3 ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ  
ΜΕ ALTERNATE IMMERSION TEST**

**Δοκίμιο Δ1**



**Εικόνα Θ-105:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.

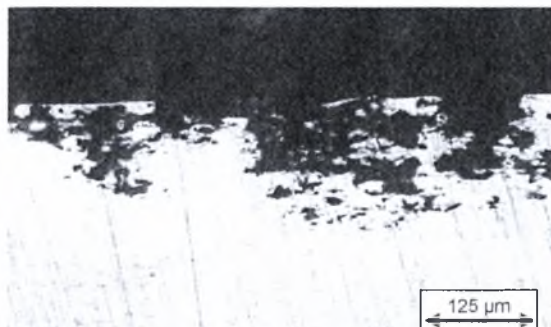


**Εικόνα Θ-106:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ1 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 2 ημέρες.

**Δοκίμιο Δ2**

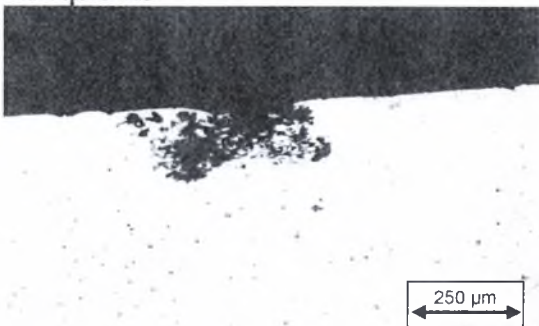


**Εικόνα Θ-107:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ2 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 5 ημέρες.

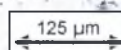
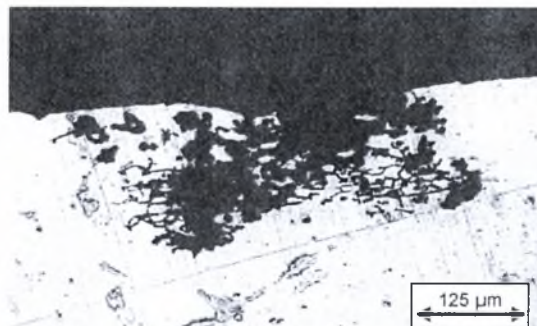


**Εικόνα Θ-108:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ2 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 5 ημέρες.

**Δοκίμιο Δ3**



**Εικόνα Θ-109:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.



**Εικόνα Θ-110:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ3 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 10 ημέρες.

#### Δοκίμιο Δ4

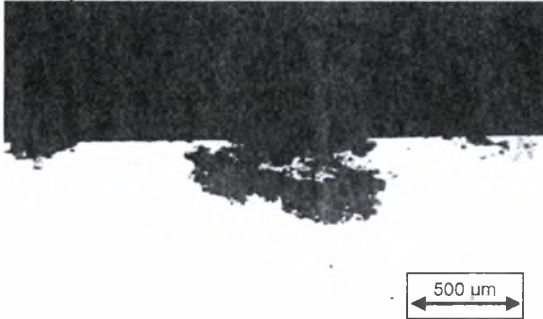


**Εικόνα Θ-111:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.

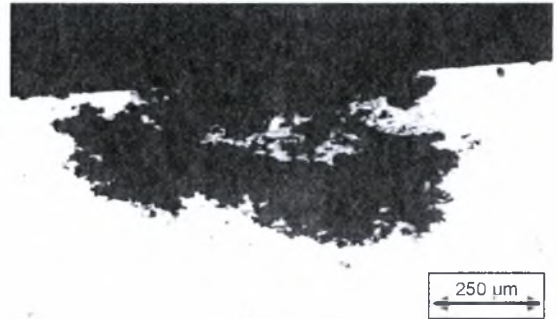


**Εικόνα Θ-112:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ4 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 15 ημέρες.

#### Δοκίμιο Δ5



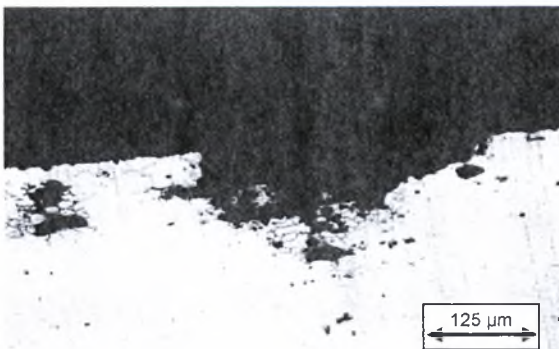
**Εικόνα Θ-113:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



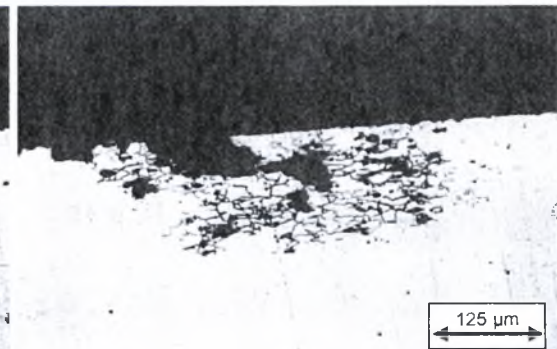
**Εικόνα Θ-114:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.



**Εικόνα Θ-115:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες.

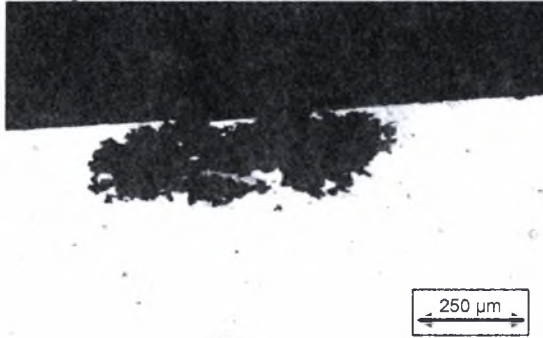


**Εικόνα Θ-116:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες. Περικρυσταλλική διάβρωση.

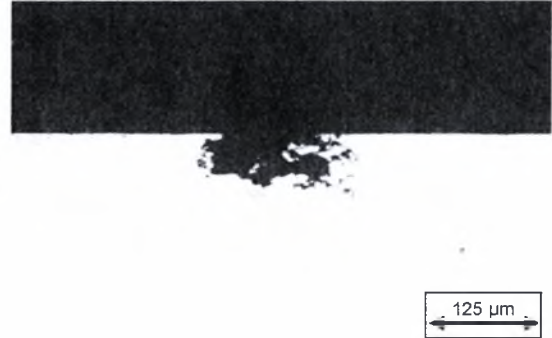


**Εικόνα Θ-117:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ5 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 30 ημέρες. Περικρυσταλλική διάβρωση.

### Δοκίμιο Δ6

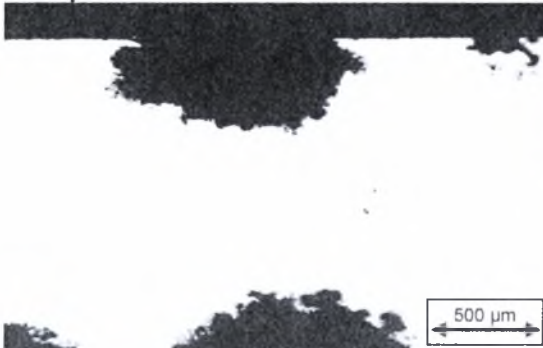


**Εικόνα Θ-118:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες.

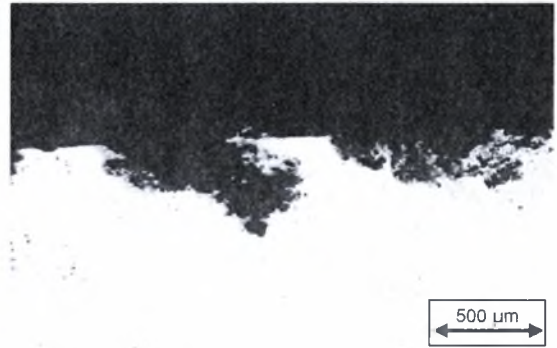


**Εικόνα Θ-119:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ6 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 20$ . Χρόνος έκθεσης 45 ημέρες. Περικρυσταλλική διάβρωση.

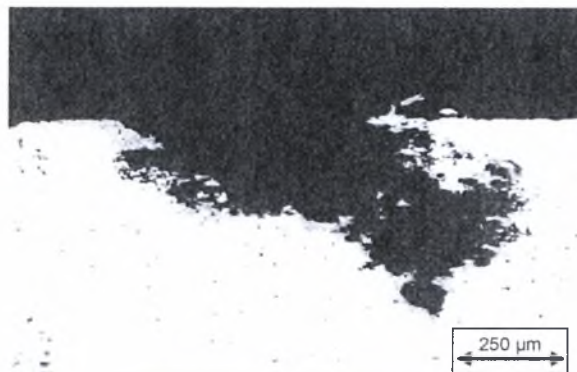
### Δοκίμιο Δ7



**Εικόνα Θ-120:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες.



**Εικόνα Θ-121:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες.



**Εικόνα Θ-122:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ7 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 60 ημέρες.

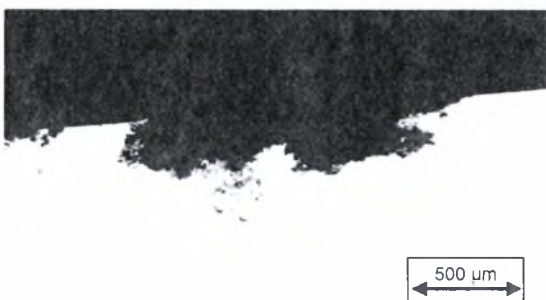
### Δοκίμιο Δ8



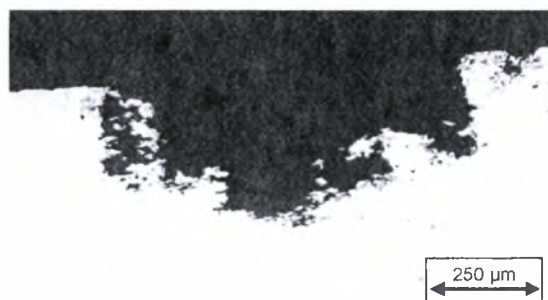
**Εικόνα Θ-123:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-124:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.



**Εικόνα Θ-125:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.

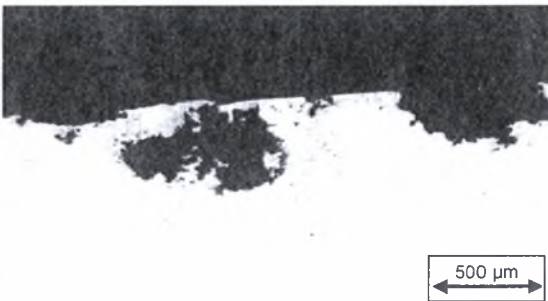


**Εικόνα Θ-126:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ8 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 75 ημέρες.

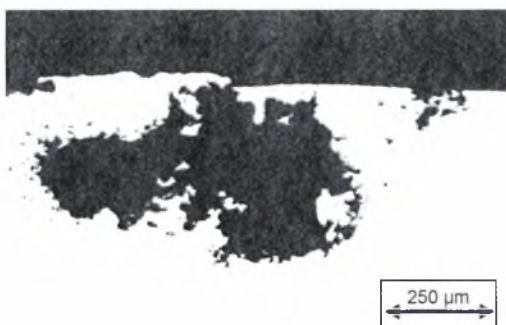
### Δοκίμιο Δ9



**Εικόνα Θ-127:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



**Εικόνα Θ-128:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 5$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.



**Εικόνα Θ-129:** Μεταλλογραφία δοκιμίου Δ9 πειράματος Alternate Immersion Test AI 2024-T3. Μεγέθυνση  $\times 10$ . Χρόνος έκθεσης 90 ημέρες.





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074673

