

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ **ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ** ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

# ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

# ΄΄ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ΄΄

# ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συμπεριφορά κραμάτων και σύνθετων Al σε διάβρωση αποφλοίωσης σε συνθήκες δεδομένης επιφανειακής τραχύτητας



# ΚΟΥΤΣΟΤΟΛΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Αναπληρώτρια καθηγήτρια κ. Αγγελική Λεκάτου

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2016

# <u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που με βοήθησαν και με στήριξαν συμβάλλοντας έτσι με τον δικό τους τρόπο στην επιτυχή ολοκλήρωση της. Πρωτίστως θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτρια της μεταπτυχιακής μου διατριβής κ. Αγγελική Λεκάτου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Εφαρμοσμένης Μεταλλουργίας του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων για την επιστημονική καθοδήγηση, την αμέριστη συμπαράσταση, αλλά και για όλες τις γνώσεις που έλαβα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αλέξανδρο Καράντζαλη, Επίκουρο Καθηγητή Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων συ Πανεπιστημίου Ιωαννίνων ο τυ παιθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αλέξανδρο Καράντζαλη, Επίκουρο Καθηγητή Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων συ Πανεπιστημίου Ιωαννίνων επιστήμης Επίστης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αλέξανδρο Καράντζαλη του παιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του μου μετέδωσε.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την πολύτιμη βοήθεια τους και την άριστη συνεργασία τον κ. Σπύρο Κλεφτάκη και Μανώλη Γεωργάτη (Διοικητική & Τεχνική Υποστήριξη Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μεταλλουργίας ) όπως επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Σφήκα Αθανάσιο.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ δικαιωματικά ανήκει στους γονείς μου και τον αδερφό μου, για την κάθε είδους συμπαράσταση και στήριξη όλα αυτά τα χρόνια και κυρίως για την εμπιστοσύνη τους η οποία μου δίνει δύναμη και κουράγιο στην επαγγελματική και προσωπική μου πορεία.

Ιωάννινα 2016

Κουτσοτόλης Αλέξανδρος

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ПЕРІЛНΨН	6
1. ΔΙΑΒΡΩΣΗ	9
1.1 FENIKA	9
2. KPAMATA AAOYMINIOY	12
2.1 FENIKA	12
2.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑL	12
2.2.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)	12
2.2.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ (CASTING ALLOYS)	13
2.3 KPAMATA AL ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΩ	13
2.3.1 1XXX КАΘАРО АЛОУМINIO	13
2.3.2 2XXX KPAMATA AL-CU	14
2.3.3 7XXX KPAMATA AL-ZN	16
2.3.4 AL – TIC	17
2.3.4.1 МЕТАЛЛІКН МНТРА	17
2.3.4.2 ΤΟ ΚΑΡΒΙΔΙΟ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ (TIC)	17
2.3.4.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ, ΜΕ ΧΡΗΣΙ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	H 18
2.3.4.4 AL-TIC 0,7% VOL, 1% VOL	18
2.3.5 AL - WC	20
2.3.5.1 ΚΕΡΑΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ – WC	20
3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	22
3.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	22
3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ AL 1050	22
3.2.1 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	23
3.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ AL 2024	24
3.3.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΥ ΦΙΛΜ ΟΤΕΙ ΔΙΟΝ	24
	24 54
2.2.2 EMAPER TERMINIATING ALADESCER	
5.5.5 ΕΝΑΡΞΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΙ ΣΕ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ	בה. 28

3.3.4 ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟ	NOY
3.4 MHXANIΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ AL 7075	
3.4.1 KPAMA AL /0/5	ـ ۱ د ۲۹
3.4.2 MOPPES ENTOTIESMENHS ALABPASHS AL 7075	
3.5 MHXANI $\Sigma$ MO $\Sigma$ $\Delta$ IABP $\Omega\Sigma$ H $\Sigma$ AL - TIC	
3.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ AL - WC	35
3.6.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ	35
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	
4.1 ΑΝΟΔΙΩΣΗ	
4.2 ΑΝΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	42
4.2.1 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΠΑΘΗΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	42
4.2.2 ΚΑΜΙΤΥΛΗ ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΟΔΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ	43
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	47
5.1 FENIKA	47
5.2 AELANEH	50
5.3 ΣΤΙΛΒΩΣΗ	50
5.4 OTTTIKH MIKPOZKOTIIA	51
5.5 AOKIMIA	54
5.6 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ	57
5.7 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	
5.8 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ	60
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	61
6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ	61
6.1.1 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΩΝ ΟΠΩΝ – ΤΟΜΗ	61
6.2 AL 1050	62
6.2.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΡΑΜΑ AL 1050	65
6.3 AL 2024	66
6.3.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΡΑΜΑ AL 2024	75
6.4 AL 7075	77
6.4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΡΑΜΑ ΑL 7075	86
6.5 AL-TIC 0,7% VOL	88
6.5.1 SYMTEPASMATA FIA TA SYN®ETA AL-TIC 0,7% VOL	
6.6 AL-TIC 1% VOL	97
6.6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ AL-TIC 1% VOL	104

6.7 AL-WC 0,5% VOL	106
6.7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΘΕΤΟ AL-WC 0,5% VOL	113
6.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	116
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ	122
7.1 ΕΙΣΑΓΩΣΗ	122
7.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ	124
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ	128
7.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	129
7.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	131
7.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	132
7.7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	133
7.7.1 ITEIPAMA 1	134
7.7.2 ПЕІРАМА 2	136
7.7.3 ПЕІРАМА 3	138
7.7.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	140
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	141
Βιβλιογραφία	153
Παράρτημα	157
Κατάλογος Εικόνων	167
Κατάλογος Σχημάτων	173
Κατάλογος Πινάκων	174
Κατάλογος Διαγραμμάτων	176

# <u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετάται η συμπεριφορά διαφόρων τύπων κραμάτων αλουμινίου σε διάβρωση αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η συμπεριφορά σε διάβρωση αποφλοίωσης των κραμάτων αλουμινίου 1050, 2024, 7075 και οι μηχανισμοί διάβρωσης αυτών των δομών, καθώς και των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας καθαρού Al 1050 τα οποία ενισχύθηκαν με κεραμικά σωματίδια TiC, σε κατάσταση λειασμένης επιφάνειας για προσομοίωση υποβαθμισμένης επιφάνειας λόγω έκθεσης σε συνθήκες φθοράς.

Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τη μεταλλογραφική προετοιμασία των δοκιμίων, κεφάλαιο πολύ σημαντικό για την ακρίβεια των πειραματικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν στη συνέχεια.

Ακολουθεί το πειραματικό σκέλος το οποίο ασχολείται με την εκτενή μεταλλογραφική μελέτη της βλάβης διάβρωσης και την μελέτη των επιφανειών για την αναγνώριση των φυσικών μηχανισμών της βλάβης σε δοκίμια λειασμένα για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον. Διαδικασία που περιγράφεται εκτενώς στα πρότυπα ASTM – G34, ASTM – G46 και ASTM – G67.

Επιπλέον παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας από τα οποία συμπεραίνουμε ότι η βλάβη διάβρωσης συσσωρεύεται βαθμιαία και εξελίσσεται σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης από τρημματική σε διάβρωση αποφλοίωσης. Παρατηρείται στις επιφάνειες που μελετώνται η ύπαρξη ψαθυροποιημένων περιοχών κάτω από το στρώμα διάβρωσης κάτι το οποίο αποδίδεται στην προσρόφηση υδρογόνου στις ψαθυροποιημένες αυτές ζώνες που παράγεται κατά τη διαδικασία της διάβρωσης. Όσο αναφορά τη συμπεριφορά σε φθορά των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας παρατηρείται η μείωση του ρυθμού φθοράς με αύξηση του ποσοστού ενίσχυσης.

Αναφέρεται ότι η μελέτη που πραγματοποιήθηκε συνοδεύεται από μελέτη των αποτελεσμάτων με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου.

Η μεταλλογραφική ανάλυση της άνω επιφάνειας των δοκιμίων, έδειξε ότι η βλάβη διάβρωσης στους πρώτους χρόνους έκθεσης έχει την μορφή τρημμάτων, ενώ μετά την ανάπτυξη της περικρυσταλλικής προσβολής ξεκινά η διάβρωση αποφλοίωσης. Η βλάβη διάβρωσης γίνεται πιο έντονη με την πάροδο του χρόνου έκθεσης. Πιο συγκεκριμένα η βλάβη διάβρωσης στην άνω επιφάνεια των δοκιμίων, μετά από 2ώρες είναι ήπια τρημματική διάβρωση, 8ώρες είναι έντονη τρημματική διάβρωση, ενώ μετά από 16 ώρες και 24 ώρες έκθεσης ξεκινάει η διάβρωση αποφλοίωσης.

Οι τομές που πραγματοποιήθηκαν στην άνω επιφάνεια, ανέδειξαν ότι το σχήμα των τρημμάτων ήταν γενικώς ακανόνιστο, αλλά παρατηρήθηκε ότι μετά από 8 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης τα βαθύτερα τρήμματα ήταν υποσκαμμένα. Η διάβρωση εξελίχθηκε από τρημματική σε αποφλοίωση σε χρόνο έκθεσης μεταξύ 12 και 16 ωρών στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε περικρυσταλλική προσβολή στο κάτω μέρος της βλάβης. Μετά από 24 ώρες έκθεσης η αποφλοίωση και η περικρυσταλλική προσβολή ήταν πιο έντονη.

Για όλες τις περιπτώσεις έκθεσης, μετρήθηκε το μέσο βάθος όλων των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης, το μέγιστο βάθος τους, η διάμετρος αλλά και η πυκνότητά τους.

Με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Όταν το υλικό εκτέθηκε για 12 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε όμως ιδιαίτερη αύξηση της διαμέτρου των τρημμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την συνένωση τους. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η πυκνότητα των τρημμάτων.
- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.
- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της διάβρωσης μετά από 16 και 24 ώρες έκθεσης. Η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.

Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.

Τέλος η μελέτη μας περιλαμβάνει το διάγραμμα κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης για το καθαρό Al 1050.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή (μεταλλογραφική προετοιμασία δοκιμίων – πειραματικό μέρος – διάβρωση αποφλοίωσης – χρήση οπτικού μικροσκοπίου – εξαγωγή συμπερασμάτων) οδηγεί στην ασφαλέστερη εκτίμηση των διαβρωμένων δομών και στην αναγκαιότητα ύπαρξης μιας διαδικασίας ελέγχου [1], [2], [3], [4], [5] προς αποφυγή τέτοιων επιθετικών μορφών διάβρωσης.

Ιωάννινα 2016

Κουτσοτόλης Αλέξανδρος

# 1. ΔΙΑΒΡΩΣΗ

# 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Διάβρωση ονομάζεται η κατάρρευση ενός υλικού ή των ιδιοτήτων του λόγω αντίδρασης με το διαβρωτικό περιβάλλον. Συνήθως μία ηλεκτροχημική αντίδραση όπως είναι η διάβρωση, μπορεί να εκδηλωθεί με απώλεια βάρους ή υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Η διάβρωση ενός υλικού [6], [7], [8] πραγματοποιείται όταν υπάρχει ροή ηλεκτρονίων από το ένα αντιδρών στο άλλο. Η ανταλλαγή ηλεκτρονίων γίνεται με τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, όπου ένα άτομο ή ιόν χάνει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια (οξείδωση) και ένα άλλο άτομο ή ιόν λαμβάνει αυτά τα ηλεκτρόνια (αναγωγή). Δυστυχώς, σχεδόν όλα τα διαβρωτικά περιβάλλοντα που υπάρχουν στη φύση προξενούν φαινόμενα διάβρωσης όπως ο αέρας, η υγρασία, το θαλασσινό νερό, τα οξέα κ.α.

Υπάρχουν πολλά είδη διαβρώσεων όπως η γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση, η διάβρωση υψηλών θερμοκρασιών, η γαλβανική διάβρωση, η διάβρωση οπών, η εργοδιάβρωση, η διάβρωση με κόπωση, η διάβρωση λόγω υδρογόνου, η διάβρωση οπών κ.α[6], [8], [9], [10].



Εικόνα 1.1: Περίπτωση ηλεκτροχημικής ή γαλβανικής διάβρωσης σωληνώσεων σε εγκαταστάσεις θέρμανσης

Παρακάτω θα περιγράψουμε τις περιπτώσεις διάβρωσης που θα συναντήσουμε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή:

- Ομοιόμορφη διάβρωση: προσβολή ολόκληρης της επιφάνειας του υλικού η οποία χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφη μείωση πάχους του. Η ομοιόμορφη προσβολή, είναι δυνατόν να αποφευχθεί με διάφορες μεθόδους, από τις οποίες οι πιο σημαντικές είναι η ανοδίωση, η χρωμάτωση, η καθοδική προστασία.
- Διάβρωση οπών κοιλοτήτων (Crevice corrosion): είναι μία μορφή εντοπισμένης διάβρωσης στην οποία σχηματίζονται μικρές κοιλότητες οπές. Είναι μια μορφή έντονης τοπικής διάβρωσης, κυμαινόμενη από μικρές κοιλότητες έως σημαντική έκταση. Οι αιτίες δημιουργίας αυτής της διάβρωσης είναι πολλαπλές, με κυρίαρχη τη δημιουργία οξέων μέσα σε κοιλότητες (ίσως και τυπικής γεωμετρίας της αλουμινοκατασκευής), που όμως δεν αερίζονται,

ενώ παράλληλα συσσωρεύουν και αρκετή βρωμιά. Το περιβάλλον υγρασίας θεωρείται και εδώ απαραίτητο για την ανάπτυξη και διάδοση της διάβρωσης. Η διάβρωση οπών είναι η πιο επικίνδυνη μορφή διάβρωσης διότι πολλές φορές δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή πριν την αστοχία του υλικού.

- Η μικρο-διάβρωση (Pitting corrosion):είναι μία μορφή εντοπισμένης • διάβρωσης, που εμφανίζεται σαν νέφος πολλών μικρών σκουρόχρωμων στιγμάτων στην επιφάνεια. Τα στίγματα αυτά έγουν μικρές εσογές, γεμάτες με οξείδια. Τα τοιχώματα των εσοχών - σε μεγέθυνση μικροσκοπίου - φαίνονται να έχουν ανώμαλη επιφάνεια. Μερικές φορές η μικρο-διάβρωση οδηγεί σε μορφές διάβρωσης κοιλοτήτων. Η υγρασία ή η συνεχής επαφή με επιθετικό υγρό περιβάλλον (NaCl) καθώς και κάποιοι μικροτραυματισμοί της επιφάνειας, καταλήγουν στη μικρο-διάβρωση. Υπενθυμίζεται ότι η ελεύθερη επιφάνεια του αλουμινίου προστατεύεται γενικά σε ικανοποιητικό βαθμό από την ανάπτυξη του λεπτού στρώματος οξειδίου του αλουμινίου. Η παθητική αυτή προστασία λειτουργεί καλά σε περιβάλλον pH μεταξύ 4 και 8. Εάν για κάποιους λόγους, σε κάποια σημεία της επιφάνειας, ο βαθμός προστασίας είναι μικρότερος από την υπόλοιπη επιφάνεια, τότε επιθετικά ιόντα - π.χ. χλωριόντα - προσβάλλουν αυτά τα σημεία δημιουργώντας τις μικρές εσοχές. Στα τοιχώματα των εσοχών το μέταλλο αποσυντίθεται γρήγορα, προκαλώντας νέα εισροή χλωριόντων στην εσογή. Έτσι, παρουσιάζεται υψηλή συγκέντρωση γλωριδίων αλουμινίου, με παράλληλη αύξηση ιόντων υδρογόνου λόγω υδρολύσεως. Το pitting είναι ίσως η συνηθέστερη μορφή οξείδωσης αλουμινίου[6], [8], [9], [11].
- Ηλεκτροχημική ή γαλβανική διάβρωση: αποτελεί μία ηλεκτροχημική δράση η οποία λαμβάνει χώρα όταν ένα μέταλλο έρχεται σε ηλεκτρική επαφή με ένα άλλο ευγενέστερο μέταλλο, όταν αυτά βυθίζονται στο ίδιο διαβρωτικό μέσο (ηλεκτρολύτη). Τότε το λιγότερο ευγενές (χημικά ενεργό) υλικό, η άνοδος υφίσταται έντονη διάβρωση ενώ το περισσότερο ευγενές (χημικά αδρανές) υλικό, η κάθοδος παραμένει αλώβητη. Παράγοντες που επηρεάζουν τη φάση της γαλβανικής διάβρωσης είναι η διαφορά στην ευγένεια των δύο μετάλλων, η αναλογία της επιφάνειας μεταξύ τους και η αγωγιμότητα του διαλύματος ηλεκτρολύτη. Όσο πιο κοντά βρίσκονται τα δύο μέταλλα αναφορικά με την ενέργειά τους (δηλαδή όσο πιο κοντά βρίσκονται στη σειρά δραστικότητας των μετάλλων) τόσο μικρότερη η πιθανότητα ανάπτυξης γαλβανικής προσβολής. Όταν η επιφάνεια του μετάλλου που καθιστά την άνοδο είναι πολύ μικρή σε σχέση με αυτή της καθόδου προκαλείται εντονότερη διάβρωση του πρώτου και για αυτό θα πρέπει να αποφεύγονται μεγάλες διαφοροποιήσεις στην αναλογία των χρησιμοποιούνται.
- Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion): συμβαίνει στα όρια των κόκκων του μετάλλου και οφείλεται στην ηλεκτροχημική προσβολή σωματιδίων κατακρημνίσεων στα όρια των κόκκων. Τα σωματίδια αυτά (χημικές ενώσεις αλουμινίου με μέταλλα) μπορεί να συμπεριφέρονται είτε ανοδικά ως προς τους τριγύρω κόκκους μετάλλου, είτε καθοδικά. Στην

περίπτωση της ανοδικής συμπεριφοράς, όπως π.χ. με κατακρήμνιση Mg5Al8, ακολουθεί γρήγορη προσβολή της ανοδικής κατακρήμνισης,[6], [9], [11] ενώ με κατακρήμνιση CuAl<sub>2</sub> (καθοδικό ως προς τον περιβάλλοντα χώρο) έχουμε διάβρωση στους γειτονικούς κόκκους. Το πόσο ευαίσθητο είναι ένα κράμα αλουμινίου σε περικρυσταλλική διάβρωση, εξαρτάται από την ποιότητα της κρυσταλλικής δομής του, που με τη σειρά της διαμορφώνεται από τη μεταλλουργική και θερμική ιστορία του μετάλλου. Κατάλληλες διεργασίες προστατεύουν το μέταλλο αυτού του είδους τη διάβρωση, που πλήττει συνήθως κράματα Al - Mg - Cu.

- Σπηλαιώδης διάβρωση: Η σπηλαιώδης διάβρωση μπορεί να θεωρηθεί ως μια μεγέθυνση της τρημματικής διάβρωσης. Εμφανίζεται σε περιοχές που η κίνηση του διαβρωτικού διαλύματος είναι περιορισμένη, αλλάζοντας έτσι την σύσταση του σε σχέση με το κυρίως διάλυμα. Η αποτίμηση της σπηλαιώδους διάβρωσης γίνεται μέσω μετρήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κοιλοτήτων που σχηματίζονται, καθώς και υπολογίζοντας τον λόγο του ανοίγματος της οπής προς την κοιλότητα.
- Διάβρωση αποφλοίωσης (Exfoliation corrosion): είναι μία μορφή περικρυσταλλικής διάβρωσης η οποία περιλαμβάνει την επιλεκτική επίθεση ενός μετάλλου σε ή δίπλα σε όρια κόκκων. Σε αυτή τη διαδικασία τα προϊόντα διάβρωσης σχηματίζονται από μεταλλικές δυνάμεις για να κινηθούν μακριά από το σώμα του υλικού δίνοντας αφορμή για μία πολυεπίπεδη διάβρωση. Παρουσιάζεται στα εκτεταμένα όρια κόκκων. Τα προϊόντα της διάβρωσης αναγκάζουν το υλικό να κινηθεί μακριά από το σώμα, ώστε τα προϊόντα αυτά να καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο από τον όγκο του μητρικού μετάλλου, προκαλώντας έτσι στο μέταλλο απολέπιση ή αποφλοίωση. Τα κράματα αλουμινίου ειδικά αυτά που περιέχουν χαλκό ψευδάργυρο-μαγνήσιο-χαλκό ως συστατικά είναι ευαίσθητα σε αυτού του είδους τη διάβρωση[6], [8], [9].

#### 2. ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

#### **2.1 ГЕNIKA**

Το αλουμίνιο είναι σχετικά μη ανθεκτικό αλλά πολύ όλκιμο μέταλλο. Το μέτρο ελαστικότητας του είναι περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι το αλουμίνιο παραμορφώνεται ελαστικά τρείς φορές περισσότερο από τον χάλυβα, κάτω από αντίστοιχη φόρτιση. Αυτή η ιδιότητα δεν βελτιώνεται σημαντικά με την κραμάτωση. Επίσης το αλουμίνιο και τα κράματα του κρατούν την ολκιμότητα τους και δεν γίνονται ψαθυρά ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που δεν συμβαίνει με τον χάλυβα και το τιτάνιο. Σαν τα περισσότερα μέταλλα ενισχύεται με ψυχρηλασία. Ακόμη περισσότερο δε, ενισχύεται με κραμάτωση με διάφορα στοιχεία. Το καθαρό αλουμίνιο χρησιμοποιείται για ηλεκτρικούς αγωγούς, χημικό εξοπλισμό και σα φύλλο με διάφορες εφαρμογές. Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο γαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ ειδικούς σκοπούς (εκλέπτυνση κόκκου, μετασχηματισμό). Ο πίνακας 4.1 δείχνει τη μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιγείων καθώς και τη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται. Οι τιμές δίνονται για διμερή συστήματα, και η παρουσία και άλλων στοιχείων στο κράμα επηρρεάζει την διαλυτότητα. Προσθήκες μεγαλύτερες από τη μέγιστη διαλυτότητα πολλές φορές γίνονται, ειδικά με το πυρίτιο και αυτό έχει σα συνέπεια τη παρουσία ετερογενών σωματιδίων στο στερεό διάλυμα[9], [10], [12], [13].

Προσθήκη	% κ/β	%άτομα	Θερμοκρασία °C
Cu	5,6	2,5	745
Mg	14,9	16,3	569
Mn	1,8	0,9	944
Si	1,6	1,6	798
Zn	82,8	66,4	447
Mg <sub>2</sub> Si	1,8	1,9	740
MgZn <sub>2</sub>	16,9	9,6	614

Πίνακας 2.1: Μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων στο Al

#### 2.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑL

# 2.2.1 KPAMATA $\triangle$ IAMOP $\Phi$ $\Omega\Sigma$ H $\Sigma$ (WROUGHT ALLOYS)

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου: Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία. Το δεύτερο ψηφίο δείχνει τις διάφορες μορφές του αρχικού κράματος Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο τις διαφορετικές μορφές του κάθε κράματος[12], [13].

1xxx Καθαρό Al (Al >99,00%) 2xxx Κράματα Al-Cu 3xxx Κράματα Al-Mn
4xxx Κράματα Al-Si
5xxx Κράματα Al-Mg
6xxx Κράματα Al-Mg-Si
7xxx Κράματα Al-Zn
8xxx Κράματα Al με άλλα στοιχεία
9xxx Μη χρησιμοποιούμενη σειρά.

#### 2.2.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ (CASTING ALLOYS)

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων χύτευσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου: Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία. Το δεύτερο και τρίτο ψηφία δείχνουν τις διάφορες μορφές του κράματος. Το τέταρτο ψηφίο δείχνει αν είναι χυτό (casting) (0) η χελώνα (ingot) (1,2) [12], [13]

- 1xx.x Καθαρό Al (Al >99,00%)
- 2xx.x Κράματα Al-Cu
- 3xx.x Κράματα Al-Si + Cu και / η Mg.
- 4xx.x Κράματα Al-Si
- 5xx.x Κράματα Al-Mg
- 6xx.x Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
- 7xx.x Κράματα Al-Zn
- 8xx.x Κράματα Al-Sn με άλλα στοιχεία
- 9xx.x Κράματα Al-με άλλα στοιχεία

#### 2.3 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑL ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΩ

#### 2.3.1 ΙΧΧΧ ΚΑΘΑΡΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

- Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ηλεκτρικές και χημικές εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικές σειρές: 1100, 1350
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 69- 186 Mpa

Η σειρά 1xxx αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99,00% min. Al) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% min. Al) και 1175 (99,75% min. Al) . Μερικοί τύποι , σαν το 1350 που χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η σειρά 1xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι το βασικό στοιχείο σχεδιασμού. Περισσότερη έμφαση πρέπει να δίνεται σε εφαρομγές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, καλή ολκιμότητα και/ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως φύλλα για συσκευασία, χημικό

εξοπλισμό, σασί αυτοκινήτων η φορτηγών και όπου απαιτείται χρήση λαμαρίνας[12], [13].



Εικόνα 2.3.1.1: Καθαρό αλουμίνιο 1050



Εικόνα 2.3.1.2: 12 δοκίμια καθαρού αλουμινίου 1050 τα οποία χρησιμοποιούνται στο πειραματικό μέρος

# 2.3.2 2XXX KPAMATA AL-CU

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Εφαρμογές σε μεταφορές (αεροπλάνα τραίνα)
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 2014, 2017, 2024, 2219, 2195
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 186- 427 Mpa

Η σειρά 2xxx υφίσταται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις καλή

συγκολλησιμότητα. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση[12], [13], [14], [15], [16], [17], [18] σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι βάφεται η επενδύεται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014). Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που συνδέονται με σπειρώματα η πριτσίνια. Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ 2219 και 2048) συγκολλούνται, και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται. Το κράμα 2195 είναι νέο σχετικά κράμα με Li για διαστημικές εφαρμογές, έχοντας πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και παρουσιάζοντας καλή συγκολησιμότητα. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι κραμάτων (π.χ. 2124, 2324, 2419) με υψηλή ακαμψία και στους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για την μείωση της αντοχής, και αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία αεροσκαφών. Τα κράματα 2011, 2017 και 2117 χρησιμοποιούνται ευρέως για βίδες και ροδέλες[12], [13], [14], [15].



Εικόνα 2.3.2.1: Κράμα αλουμινίου 2024



Εικόνα 2.3.2.2: 12 δοκίμια κράματος αλουμινίου 2024 τα οποία χρησιμοποιούνται στο πειραματικό μέρος

### 2.3.3 7XXX KPAMATA AL-ZN

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Πολύ μεγάλη αντοχή, τύποι εξαιρετικής ακαμψίας.
- Εφαρμογές αυτοκινήτων και αεροδιαστημικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 7005,7075,7475,7150
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 220-605 Mpa

Τα κράματα της σειράς 7xxx 7xxx υφίστανται θερμική κατεργασία και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα κράματα της σειράς που παράγονται για την εξαιρετική τους ακαμψία, κυρίως τα 7150 και 7475 που με πολύ καλό έλεγχο του επιπέδου των ακαθαρσιών μεγιστοποιούν τον συνδυασμό αντοχής και ακαμψίας. Η μεγαλύτερη εφαρμογή των σειρών 7xxx ιστορικά είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας. Τα κράματα αυτά δεν θεωρούνται συγκολλήσιμα με τις κοινές μεθόδους και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με πριτσίνια. Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7xxx δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5xxx και 6xxx, έτσι σε τέτοιες συνθήκες συνήθως επενδύονται η αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα[12], [13], [17], [18].



Εικόνα 2.3.3.1: Κράμα αλουμινίου 7075



Εικόνα 2.3.3.2: 12 δοκίμια κράματος αλουμινίου 7075 τα οποία χρησιμοποιούνται στο πειραματικό μέρος

### 2.3.4 AL – TIC

## 2.3.4.1 ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΜΗΤΡΑ

Τα μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο αλλά και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρας προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μητρών, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μητρών είναι πολύ χαμηλή (~300 °C), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500 °C.

Οι ενισχύσεις των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας μπορεί να είναι σε μορφή κόκκων, ινών και φυλλιδίων. Επίσης μπορεί να είναι είτε συνεχείς είτε ασυνεχείς. Στις συνεχείς ενισχύσεις, περιλαμβάνονται οι ίνες των οξειδίων αλούμινας, οι ίνες βορίου, οι ίνες άνθρακα και το καρβίδιο του πυριτίου και χρησιμοποιούνται συνήθως στην αεροναυπηγική. Από την άλλη πλευρά οι συνεχείς ενισχύσεις αποτελούνται από κόκκους καρβιδίου του πυριτίου, κόκκους καρβιδίου του βορίου, κόκκους αλούμινα αλλά και καρβιδίου του τιτανίου και χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία της χύτευσης καθώς επίσης και σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Η επιλογή της κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου[19].

# 2.3.4.2 ΤΟ ΚΑΡΒΙΔΙΟ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ (ΤΙC)

Το καρβίδιο του τιτανίου TiC είναι ένα εξαιρετικά σκληρό και πυρίμαχο κεραμικό υλικό το οποίο εμφανίζει παρόμοιες ιδιότητες με το καρβίδιο του βολφραμίου. Εμφανίζει υψηλή αντοχή στην τριβή και στα θερμικά σοκ. Επίσης εμφανίζει εξαιρετική θερμική και χημική σταθερότητα, υψηλό σημείο τήξης, χαμηλή πυκνότητα, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Λόγω των ιδιοτήτων του χρησιμοποιείται ευρέως στα εργαλεία κοπής και διάτρησης αλλά και για επιφανειακές επιστρώσεις ώστε να προστατεύεται η εκάστοτε μήτρα από τα διάφορα φαινόμενα φθοράς. Στη συνηθέστερη μορφή του εμφανίζεται ως μία λεπτόκοκκη γκρι σκόνη η οποία έχει την τάση να συσσωματώνεται. Η έκθεση της σκόνης του καρβιδίου του τιτανίου στην ατμόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα την αντίδραση της με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα να οξειδώνεται[19], [20].

Φυσικές ιδιότητες ΤiC
Μοριακό βάρος: 59.89 g/mol
Πυκνότητα: 4.93 g/cm <sup>3</sup>
Σημείο τήξης: 3160 °C, 3453 Κ
Σημείο βρασμού: Κυβική οκταεδρική
Κρυσταλλογραφική δομή: 9+
Σκληρότητα στην κλίμακα
Αδιάλυτο στο νερό
Θερμική αγωγιμότητα στους 20 °C: 0.041 (cal/ s*cm* °C)

Πίνακας 2.3.4.2: Φυσικές ιδιότητες ΤΙC

## 2.3.4.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Για να ενισχύσουμε σύνθετα μεταλλικής μήτρας, χρησιμοποιούμε συνήθως κεραμικά σωματίδια όπως οξείδια, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, κ.α. Επίσης ως ενίσχυση μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυμερικές ή κεραμικές ίνες. Όμως τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται ανόργανα μη μεταλλικά υλικά.

Οι κεραμικές ενισχύσεις οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των ανόργανων μη μεταλλικών υλικών και χαρακτηρίζονται από το υψηλό μέτρο ελαστικότητας, την υψηλή σκληρότητα, το υψηλό σημείο τήξης, θερμική και χημική σταθερότητα, χρησιμοποιούνται ευρέως ως μέσα ενίσχυσης σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών.

Στα σύνθετα μεταλλικής μήτρας αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως τα μεταλλικά καρβίδια, λόγω του υψηλού σημείου τήξης τους και της αντοχής τους, Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ως ενισχύσεις καρβίδια του πυριτίου (SiC), το καρβίδιο του βολφραμίου (WC) και το καρβίδιο του τιτανίου (TiC)[19], [20].

#### 2.3.4.4 AL-TIC 0,7% VOL, 1% VOL

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας αλουμινίου με τη μέθοδο της χύτευσης υπό ανάδευση, όπου χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες καθαρό αλουμίνιο Al 1050, και σκόνη υπό του μικρού καρβιδίου του τιτανίου (TiC) μαζί με παράγοντες διαβροχής (K2TiF6), έτσι ώστε να ενισχυθεί η ενσωμάτωση των σωματιδίων μέσα στην τηγμένη μήτρα αλουμινίου. Οι συστάσεις των σύνθετων μήτρας αλουμινίου ήταν Al-TiC 0,7 % vol και Al-TiC 1% vol.

Τα σύνθετα Al-TiC χαρακτηρίζονται από καλή ενσωμάτωση και διαβροχή των σωματιδίων TiC μέσα στη μήτρα του αλουμινίου. Η κατανομή των σωματιδίων ενίσχυσης χαρακτηρίζεται σχετικά ομοιογενής αποτελούμενη τόσο από μεμονωμένα σωματίδια όσο και από συσσωματώματα TiC. Η προσθήκη των σωματιδίων TiC προκάλεσε σημαντική εκλέπτυνση των πρωτογενών κόκκων αλουμινίου. Ο κύριος λόγος των υπομικροσκοπικών σωματιδίων ενίσχυσης έγκειται στην ενίσχυση της αντιδραστικότητας μεταξύ μήτρας και ενίσχυσης[19], [20].



Εικόνα 2.3.4.4.1: Al-TiC O,7% vol



Εικόνα 2.3.4.4.2 : 12 δοκίμια Al-TiC O,7% vol τα οποία χρησιμοποιούνται στο πειραματικό μέρος



Εικόνα 2.3.4.4.3 : Al-TiC 1% vol



Εικόνα 2.3.4.4.4: 12 δοκίμια Al-TiC 1% vol τα οποία χρησιμοποιούνται στο πειραματικό μέρος

#### 2.3.5 AL - WC

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας καθαρού Al 1050 τα οποία ενισχύθηκαν με σωματίδια υπό του μικρού WC σε σύσταση 0,5 % vol. Η Παρασκευή του πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της χύτευσης υπό ανάδευση με τη βοήθεια του άλατος αλογονιδίου  $K_2 TiF_6$  ως παράγοντα διαβροχής για καλύτερη ενσωμάτωση των σωματιδίων στο τήγμα[21].

#### 2.3.5.1 ΚΕΡΑΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ – WC

Γενικά οι κεραμικές ενισχύσεις στα σύνθετα μεταλλικής μήτρας χρησιμοποιούνται κυρίως για αύξηση της σκληρότητας, αντίστασης σε φθορά κ.α. Οι κεραμικές ενισχύσεις από μόνες τους αποτελούν υλικά με υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή ελαστικότητα και αντοχή στον εφελκυσμό. Στην εργασία μας χρησιμοποιείται καρβίδιο του βολφραμίου WC σαν κεραμική ενίσχυση σε μήτρα αλουμινίου.

Γενικά το καρβίδιο του βολφραμίου είναι μία ανόργανη χημική ένωση που στη βασική της μορφή εμφανίζεται ως λεπτόκοκκη γκρι σκόνη[21].



Εικόνα 2.3.5.1.1 : Al-WC O,5% vol



Εικόνα 2.3.5.1.2 : 12 δοκίμια Al-WC O,5% vol τα οποία χρησιμοποιούνται στο πειραματικό μέρος

#### 3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

#### 3.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο και τα κράματα του, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στην διάβρωση, και αυτό οφείλεται στο λεπτό στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του υλικού. Το οξείδιο αυτό έχει την ιδιότητα να σχηματίζεται ταχύτατα μόλις το υλικό έρθει σε επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον. Επίσης εάν αυτό το προστατευτικό οξείδιο καταστραφεί, εύκολα αναγεννάται. Το πάχος του οξειδίου είναι της τάξεως του 1 nm, αλλά παρά το γεγονός ότι είναι αρκετά λεπτό, παρέχει αποτελεσματική προστασία από την διάβρωση. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται όταν το αλουμίνιο είναι σε κανονική ατμόσφαιρα, έχει αρκετά μεγαλύτερο πάχος. Αυτό αποτελείται από δύο ζώνες. Η πρώτη ζώνη, αυτή που βρίσκεται σε επαφή με το μέταλλο, έχει άμορφη κρυσταλλική δομή και πάχος το οποίο καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τη θερμοκρασία. Η δεύτερη ή εξωτερική ζώνη, έχει μεγαλύτερο πάχος και αυξημένο πορώδες και αποτελείται από ένυδρα οξείδια[10], [22], [23], [24], [25], [26].

Το προστατευτικό στρώμα χαρακτηρίζεται σαν μια λεπτή ισορροπία μεταξύ των δύο αντικρουόμενων δυνάμεων, εκείνων που τείνουν να σχηματίσουν την πρώτη συμπυκνωμένη ζώνη οξειδίου και αυτών που θέλουν να την καταστρέψουν. Εάν δεν υπάρχουν καταστρεπτικές δυνάμεις, όπως όταν το υλικό βρίσκεται σε θερμό αέρα, θα σχηματιστεί μόνο η εξωτερική ζώνη των οξειδίων που γρήγορα θα φτάσει το μέγιστο πάχος. Αντιθέτως εάν οι καταστροφικές δυνάμεις είναι πολύ υψηλές τότε η προστατευτική ζώνη των οξειδίων, θα ενυδατώνεται πολύ πιο γρήγορα απ' ότι θα σχηματίζεται, με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή του. Στις περισσότερες περιπτώσεις που συναντούμε, υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα σε αυτές τις δύο τάσεις, που καθορίζονται πάντα από το διαβρωτικό περιβάλλον[22], [23], [24], [25], [26].

#### **3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ AL 1050**

Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι κυρίως ηλεκτροχημικό και προκύπτει όταν τα άτομα των μετάλλων οξειδώνονται και φεύγουν απ' το υλικό, με τη μορφή ιόντων. Κατά την διαδικασία αυτή έχουμε την μεταφορά ηλεκτρονίων από τα άτομα του υλικού προς το διάλυμα του ηλεκτρολύτη και στην συνέχεια την αποχώρηση των ατόμων από το υλικό με την μορφή θετικά φορτισμένων ιόντων. Οπότε η άνοδος είναι το αλουμίνιο αφού από αυτό φεύγουν τα ηλεκτρόνια και έχουμε διάβρωση και η κάθοδος είναι το ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Παρακάτω δίνονται οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο κατά την διάβρωση ενός μετάλλου[9].

Στην άνοδο έχουμε :  $\{M\} => M^{+n} + ne^{-} (1)$ 

Στην κάθοδο όταν δεν υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο έχουμε :  $\eta H^+ + ne^- => (\eta/2) H_2 (2)$ 

το άθροισμα των δύο παραπάνω αντιδράσεων δίνει:

 $\begin{array}{l} \{M\} => M^{+n} + ne^{-} (\acute{\alpha}vo\delta o\varsigma) \\ \underline{+ \eta H^{+} + ne^{-} => (n/2) H_{2} (\kappa\acute{\alpha}\theta o\delta o\varsigma)} \\ \{M\} + \eta H^{+} => M^{+\eta} + (\eta/2) H_{2} (3) \end{array}$ 

Opóte gia to aloumínio écoume :  $2\{AI\}{+}6H^{+}{=}{>}\,2A1^{+3}+3H_2$ 

Όπως φαίνεται από την αντίδραση 2 άτομα αλουμινίου δίνουν τα τρία ηλεκτρόνια της εξωτερικής τους στοιβάδας (ηλεκτρόνια σθένους) και μετατρέπονται σε ιόντα A1+3. Τα ιόντα υδρογόνου H<sup>+</sup>, προσλαμβάνουν τα έξι ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται και σχηματίζουν τρία άτομα υδρογόνου.

Αν το διάλυμα περιέχει διαλυμένο οξυγόνο, ναι μεν η ανοδική αντίδραση παραμένει ίδιο, αλλά η καθοδική μετασχηματίζεται στην ακόλουθη: (η/2)  $02 + 2\eta H^+ + 2ne^- => \eta H_2 0$ 

Επομένως παίρνουμε: 2{AI) +  $(3/2)02 + 6H^+ => 2AI + 3 + 2H_2O$ 

Τέλος στην περίπτωση που το διάλυμα είναι ουδέτερο (pH = 7) τότε η διαδικασία της διάβρωσης του μετάλλου θα αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:

 $\{M\} => M+n + ne$ -

 $(n/4) O_2 + (n/2) H_2O + ne - => nOH^-$ 

 $M^{+n} + n O H^{-} \Longrightarrow M(OH)n$ 

Επομένως παίρνουμε :

 $\{M\} + (\eta/4)0_2 + (\eta/2)H_20 => M(OH)\eta$ 

 $2{AI} + (3/2)0_2 + 3H_20 \implies 2AI(OH)3$ 

#### 3.2.1 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Όπως αναφέραμε παραπάνω, κατά την διάβρωση έχουμε στην άνοδο περίσσεια ηλεκτρονίων και στην κάθοδο έλλειμμα ηλεκτρονίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού. Όσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό της διάβρωσης, το υλικό έχει τη τάση να μην διαβρώνεται, αντίθετα όσο μικρότερο είναι το δυναμικό διάβρωσης, το υλικό έχει την τάση να διαβρώνεται ευκολότερα[9].

Συνήθως το δυναμικό της διάβρωσης σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς, που είναι το ηλεκτρόδιο καλομέλανα ( calomel half-cell reference electrode ). Η χρήση του παραπάνω ηλεκτροδίου σαν σημείου αναφοράς μας δίνει την δυνατότητα να συγκρίνουμε τα δυναμικά διάβρωσης διαφορετικών υλικών μεταξύ τους και να εξάγουμε συμπεράσματα για την τάση που έχουν να διαβρωθούν.

#### 3.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ AL 2024

# 3.3.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΥ ΦΙΛΜ ΟΞΕΙΔΙΩΝ

Το προστατευτικό φιλμ οξειδίων δημιουργείται τη στιγμή που το αλουμίνιο έρθει σε επαφή με το διαβρωτικό μέσο και είναι αποτέλεσμα της οξείδωσης που λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και ηλεκτρολύτη. Ο σχηματισμός του οξειδίου του αλουμινίου περιγράφεται από την αντίδραση οξείδωσης:  $2AI + (3/2) O_2 \rightarrow Al_2O_3$ 

Γενικά αυτό το φιλμ είναι άμορφο, μπορεί όμως να αναπτύξει και κάποιες κρυσταλλικές δομές (γ- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, α Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> κ.α.). Η δομή αλλά και το πάχος του προστατευτικού φιλμ εξαρτάται από παράγοντες όπως: η χημική σύνθεση του κράματος, η παρουσία και η κατανομή ατελειών (κενές θέσεις, σωματίδια δευτερογενούς δομής), η σύσταση και η θερμοκρασία του διαβρωτικού μέσου. Οι παραπάνω παράγοντες αλλά κυρίως η μικροδομή του μετάλλου και η σύσταση του διαβρωτικού μέσου παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην κατάρρευση του προστατευτικού φιλμ του αλουμινίου και των κραμάτων του.

Στο αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας, η κατάρρευση του προστατευτικού φιλμ οξειδίων μπορεί να προέλθει από έναν από τους εξής παράγοντες, ή από τον συνδυασμό αυτών: i) την εισχώρηση ιόντων χλωρίου από τον διαλύτη στο προστατευτικό φιλμ ii) τη μείωση του πάχους του φιλμ λόγω της παρουσίας χλωριόντων και iii) την ύπαρξη ατελειών στο προστατευτικό φιλμ. Στα κράματα όμως του αλουμινίου, η παρουσία των κραματικών στοιχείων, τα σωματίδια δευτερεύουσας δομής και τα γαλβανικά κελιά που αυτά δημιουργούν με το μητρικό αλουμίνιο, ευνοούν την κατάρρευση του προστατευτικού φιλμ και την επακόλουθη επαφή του κράματος με τον διαλύτη, ξεκινώντας με αυτόν τον τρόπο την τρημματική διάβρωση. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία βρέθηκε ότι η παρουσία S-φάσης (Al<sub>2</sub>CuMg) στο κράμα αλουμινίου 2024 αλλάζει τις τοπικές ιδιότητες του προστατευτικού φιλμ και την εισχώρηση χλωριόντων στο φιλμ και την έισχώρηση χλωριόντων στο φιλμ και την έισχώρηση του προστατευτικό φιλμ το ξειδίων, δημιουργώντας ευνοϊκά σημεία για την εισχώρηση χλωριόντων στο φιλμ και την έισχώρηση του κράματος φιλμ οξειδίων, δημιουργώντας ευνοϊκά σημεία για την εισχώρηση χλωριόντων στο φιλμ και την έισχώρηση του προστατευτικού φιλμ το διαλύτη, ξεκινώντας με αυτόν τον τρόπο την τρημματική διάβρωση. Πιο συγκεκριμένα, στην ευνογασία βρέθηκε ότι η παρουσία S-φάσης (Al<sub>2</sub>CuMg) στο κράμα αλουμινίου 2024 αλλάζει τις τοπικές ιδιότητες του προστατευτικού φιλμ οξειδίων, δημιουργώντας ευνοϊκά σημεία για την εισχώρηση χλωριόντων στο φιλμ και την έναρξη της διάβρωσης στο κράμα[10], [22], [23], [24], [25], [26].

#### 3.3.2 ΕΝΑΡΞΗ ΤΡΗΜΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Η χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 2024 παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3.2. Τα κραματικά στοιχεία χαλκός και μαγνήσιο, προστίθενται στο αλουμίνιο προκειμένου να αυξηθούν οι ιδιότητες της αντοχής του, ενώ ταυτόχρονα η μικροδομή που σχηματίζουν με το μητρικό αλουμίνιο είναι υπεύθυνη για την ευαισθησία του κράματος στην τρημματική διάβρωση[27].

	Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 2024									
Κραματικά στοιχεία	Al	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Si	Άλλα
Περιεκτικότητα (wt%)	90.7-94.7	≤ 0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	≤ 0.1	≤0.25	≤0.15	≤0.5	≤0.15

Πίνακας 3.3.2: Χημική σύσταση ΑΙ 2024

Μετά τη κατάρρευση του προστατευτικού φιλμ, το κράμα έρχεται σε επαφή με το διαβρωτικό μέσο και ξεκινά η ηλεκτροχημική αλληλεπίδραση των κραματικών στοιχείων και του διαλύτη ξεκινώντας από τη διεπιφάνειά τους.

Η ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης περιγράφεται από ανοδικές και καθοδικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη ηλεκτροχημική διάβρωση είναι η ύπαρξη δύο ηλεκτροδίων (μιας ανόδου και μιας καθόδου) και ενός ηλεκτρολύτη. Στα κράματα αλουμινίου συνήθως ως άνοδος λειτουργεί το ίδιο το αλουμίνιο, ενώ ως κάθοδος ενώσεις άλλων κραματικών στοιχείων, κυρίως του χαλκού, ο οποίος είναι σημαντικά ηλεκτροθετικότερος του αλουμινίου. Ως ηλεκτρολύτης δρα το νερό ή η υγρασία της ατμόσφαιρας [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Γενικά η ηλεκτροχημική διάβρωση μπορεί να παρασταθεί σαν ένα ηλεκτροχημικό κελί στο οποίο λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις οξείδωσης στο ένα ηλεκτρόδιο και αναγωγής στο άλλο. Από τα επιφανειακά στρώματα του αλουμινίου δημιουργούνται ορισμένα ιόντα αλουμινίου, λόγω της μεγάλης τάση του μετάλλου να οξειδωθεί. Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η εξής: Al → Al<sup>3</sup> + 3e<sup>-</sup>

Τα ιόντα αυτά διαλύονται στο νερό. Λόγω της περίσσειας ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην επιφάνεια του μετάλλου, τα θετικά φορτισμένα ιόντα αλουμινίου θα μείνουν πολύ κοντά στην αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια του αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού μεταξύ του μετάλλου και του υδατικού διαλύματος που περιέχει τα ιόντα αλουμινίου. Το ίδιο συμβαίνει και με το ηλεκτρόδιο του Cu, με τη διαφορά ότι το ηλεκτροστατικό δυναμικό που δημιουργείται έχει διαφορετική τιμή. Αν, με τη βοήθεια του ηλεκτρολύτη γίνει δυνατή η συνεχής παραγωγή και μεταφορά ηλεκτρονίων, τότε το ηλεκτρόδιο με την μικρότερη τιμή ηλεκτροστατικού δυναμικού λειτουργεί ως άνοδος ενώ το ηλεκτρόδιο με την μεγαλύτερη τιμή ηλεκτροστατικού δυναμικού ως κάθοδος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την συνεχή μεταφορά και επομένως κατανάλωση ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο όπου λαμβάνει χώρα, σε ισχυρά όξινα περιβάλλοντα,[22] η αναγωγή:  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ 

Αυτοί οι ηλεκτροχημικής φύσεως μηχανισμοί αναπτύσσονται στην μικροδομή του κράματος αλουμινίου 2024, η οποία χαρακτηρίζεται από φάσεις διαφορετικής χημικής σύστασης, με τις πιο χαρακτηριστικές από αυτές να είναι η S-φάση (Al<sub>2</sub>CuMg), η θφάση (Al<sub>2</sub>Cu) και η α-φάση (AlCuFeMn), καθώς και τα συμπλέγματα αυτών ( Σχήμα 3.3.2).



(a)





Σχήμα 3.3.2: Φάσεις του κράματος 2024 α) S-φάση, β) θ-φάση, γ) α-φάση, δ) σύμπλεγμα S και  $\theta$  φάσης[22], [28]

Κάθε φάση από αυτές αποτελεί πιθανό σημείο έναρξης της διάβρωσης με διαφορετικό μηχανισμό η καθεμιά. Το δυναμικό της S-φάσης είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του κράματος 2024, ενώ αντίθετα το δυναμικό της α-φάσης και θ-φάσης είναι μεγαλύτερο. Σο καθαρό αλουμίνιο λειτουργεί ως άνοδος και έχει το χαμηλότερο δυναμικό. Ο χαλκός ο οποίος είναι πιο ηλεκτροθετικός και λειτουργεί ως κάθοδος, δεν διαλύεται, αλλά λόγω της γαλβανικής διάβρωσης υπόκειται σε διάλυση το περιβάλλον αλουμίνιο.

Η επίδραση του δυναμικού συντελεί στο να υπάρχει διαφορετικός μηχανισμός διάβρωσης για κάθε φάση. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται[22] ως εξής:

Μηχανισμός διάβρωσης της S-φάσης (Al<sub>2</sub>CuMg) : Η χημική της σύνθεση την καθιστά την πιο ενεργή από τις υπόλοιπες φάσεις, αποτελώντας την κύρια αιτία της τρημματικής διάβρωσης του κράματος 2024. Επίσης, το ποσοστό της μέσα στο κράμα υπερτερεί του ποσοστού των υπολοίπων φάσεων. Το δυναμικό της είναι μικρότερο από αυτό του κράματος, για αυτό και συμπεριφέρεται ανοδικά. Αρχικά λαμβάνει χώρα η επιλεκτική διάβρωση μέσα στην S-φάση, με τα πιο ηλεκτροαρνητικά στοιχεία της (Al και Mg) να διαλύονται πρώτα. Αυτό έχει ως συνέπεια να παραμένει περίσσεια χαλκού (Cu), ο οποίος λόγω της θέσης του στην ηλεκτροαρνητική σειρά λειτουργεί ως κάθοδος, με αποτέλεσμα να διαλύεται το μητρικό αλουμίνιο γύρω του. Στην εργασία μετρήθηκε η χημική σύσταση της S-φάσης πριν και μετά την έκθεση του κράματος σε διαβρωτικό διάλυμα. Βρέθηκε ότι η περιεκτικότητα σε Mg μειώθηκε δραματικά (από 10.3% σε 1.8%) ενώ η περιεκτικότητα σε Cu παρέμεινε σταθερή. Η περιεκτικότητας σε Ο, φαινόμενο που αποδόθηκε στην εναπόθεση των προϊόντων διάβρωσης μέσα στο κράμα[10], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Μηχανισμός διάβρωσης της θ-φάσης (Al<sub>2</sub>Cu): Η θ-φάση συμπεριφέρεται εξ αρχής καθοδικά απέναντι στο περιβάλλον κράμα αλουμινίου. Η περιεκτικότητά της σε χαλκό (54% Cu και 46% Al), χαρακτηρίζει το δυναμικό της που είναι υψηλότερο από αυτό του κράματος Al 2024 και συνεπώς μεγαλύτερο και από αυτό της S - φάσης. Όταν η φάση αυτή εκτίθεται στο διαβρωτικό διάλυμα, δεν διαλύεται, αλλά παρατηρείται διάβρωση στην περίμετρό της, αφού διαβρώνεται το ηλεκτροαρνητικότερο μητρικό αλουμίνιο γύρω της.

Μηχανισμός διάβρωσης της α-φάσης (AlCuFeMn): Η α-φάση παραμένει αδρανής κατά την διάβρωση. Η διάλυση κάποιων στοιχείων της, γίνεται αν αυτή βρίσκεται σε επαφή με το διαβρωτικό διάλυμα, ή αν υπάρχουν ατέλειες στην περίμετρό της λόγω της μηχανουργικής κατεργασίας, ή λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων μεταξύ της αφάσης και του μητρικού αλουμινίου. Γενικά θεωρείται καθοδικό έναντι του περιβάλλοντος κράματος, και σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται διάλυση του μητρικού αλουμινίου. Ενδεικτικά στην εργασία μας παρατηρήθηκε ότι για μικρούς γρόνους έκθεσης το μητρικό υλικό δεν υπέστη διάλυση, αλλά με την πάροδο του χρόνου έκθεσης παρατηρήθηκαν μικρορωγμές περιμετρικά της α-φάσης, που πιθανόν να οφείλονται στην διάβρωση του περιβάλλοντος αλουμινίου. Επίσης, πραγματοποιείται μέσα στην α-φάση επιλεκτική διάβρωση, και ενώ μειώνεται η περιεκτικότητά της σε Al, αυξάνεται η περιεκτικότητα της σε Cu[28].

#### 3.3.3 ΕΝΑΡΞΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΣΕ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ

Περικρυσταλλική διάβρωση είναι η επιλεκτική διάβρωση των ορίων των κόκκων, χωρίς να προσβάλλονται σημαντικά οι ίδιοι οι κόκκοι. Η περικρυσταλλική διάβρωση συχνά αναπτύσσεται στα κράματα της σειράς 2xxx, τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία. Όταν τα κράματα ψύχονται αργά, σχηματίζονται σωματίδια [22], [26]πλούσια σε Cu (CuAl<sub>3</sub> και CuMgAl<sub>3</sub>) στα όρια των κόκκων. Η κατακρήμνιση αυτών των σωματιδίων πραγματοποιείται στα όρια των κόκκων και δημιουργούνται γειτονικά των ορίων περιοχές φτωχές σε Cu, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.3. Τα σωματίδια πλούσια σε Cu λειτουργούν ως κάθοδοι και οι φτωχές σε Cu περιοχές ως άνοδοι, με αποτέλεσμα οι δεύτερες να υπόκεινται σε διάλυση.



Σχήμα 3.3.3: Κατανομή Cu στην περιοχή στα όρια των κόκκων

Στην εργασία βρέθηκε ότι η περικρυσταλλική διάβρωση στο κράμα αλουμινίου 2024 ξεκίνησε από το κάτω μέρος ενός διαβρωμένου συμπλέγματος S-φάσης[28] και θφάσης, και προχώρησε μέχρι την επιφάνεια του υλικού, μακριά από το σημείο έναρξής της.

Σε παλαιότερη έρευνα βρέθηκε ότι στο κράμα αλουμινίου που έχει υποστεί τεχνητή γήρανση, αναπτύχθηκε μόνο τρημματική διάβρωση, ενώ στο κράμα 2024 την δημιουργία τρημμάτων ακολούθησε η ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης. Επιπλέον, με την αύξηση του χρόνου γήρανσης στο κράμα αλουμινίου 2024 αυξήθηκε η περιεκτικότητα του σε θ-φάση, η οποία με την σειρά της δημιούργησε πιο ενεργές ανοδικές περιοχές φτωχές σε Cu, η παρουσία των οποίων ευνοεί την ανάπτυξη της περικρυσταλλικής διάβρωσης.

Η διάβρωση αποφλοίωσης, είναι ένα είδος έντονης περικρυσταλλικής διάβρωσης, που αναπτύσσεται κατά μήκος των επιμηκυμένων, μετά από διεργασίες, ορίων των κόκκων, παράλληλα στην επιφάνεια του υλικού. Δεν αναπτύσσεται όμως σε όλα τα υλικά που παρουσιάζουν περικρυσταλλική διάβρωση, αλλά η ύπαρξή της είναι συνάρτηση του πάχους του υλικού, καθώς και του βαθμού επιμήκυνσης των κόκκων του. Ο μηχανισμός της διάβρωσης αποφλοίωσης είναι ίδιος με αυτόν της περικρυσταλλικής, ενώ είναι χαρακτηριστική η διόγκωση των στρωμάτων κοντά στην επιφάνεια του υλικού λόγω της συσσώρευσης των προϊόντων διάβρωσης στα όρια των κόκκων[22]. Επίσης, με την αύξηση του χρόνου γήρανσης, αυξάνεται και η ευαισθησία του κράματος 2024 στην διάβρωση αποφλοίωσης. Η πιθανότητα ανάπτυξης της διάβρωσης αποφλοίωσης είναι επίσης συνάρτηση των διαβρωσης αποφλοίωσης δυλαγια του κράματος 2024 στην διάβρωση αποφλοίωσης.

# 3.3.4 ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Τα σωματίδια διασποράς και οι κατακρημνίσεις τους, διαδραματίζουν τον κύριο ρόλο στην ανάπτυξη της τρημματικής διάβρωσης, στην εξέλιξή της σε περικρυσταλλική προσβολή και πιθανόν σε αποφλοίωση, επιπλέον όμως παίζουν ρόλο και στην ανάπτυξη ενός άλλου μηχανισμού της βλάβης διάβρωσης, αυτόν της προσρόφησης υδρογόνου και την επερχόμενη ψαθυροποίηση του υλικού[29], [30], [31], [32], [33], [34]. Εκτός λοιπόν από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την διάβρωση του κράματος αλουμινίου (καθοδικές και ανοδικές), πραγματοποιούνται και επιπλέον καθοδικές αντιδράσεις, όπως[22]:

- Η αναγωγή των ιόντων υδρογόνου  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
- Η αναγωγή οξυγόνου διαλυμένου στο Η2Ο (σε όξινα περιβάλλοντα)  $O_2$  +4H^+ +4e^-  $\rightarrow$  2H\_2O
- Η αναγωγή οξυγόνου διαλυμένου στο Η2Ο (σε βασικά περιβάλλοντα)  $O_2 + 2H_2O + 4e^- → 4OH^-$
- Και τέλος η διάσπαση του νερού:  $H_2O + e^- → OH^- + H$

Ένα μέρος του υδρογόνου που παράγεται στην επιφάνεια του υλικού εισέρχεται στο υλικό υπό ατομικό μορφή. Αρχικά, αναγνωρίστηκαν οι ενεργειακές ''παγίδες'' μέσα στις οποίες αποθηκεύεται το διαχεόμενο στο υλικό υδρογόνο. Τις παγίδες αυτές αποτελούν ατέλειες του υλικού: οι κενές θέσεις, οι καταναγκασμού, τα όρια των κόκκων καθώς και οι φάσεις σκλήρυνσης της μικροδομής. Ανάλογα με την ενέργεια που απαιτείται για να απελευθερωθεί το υδρογόνου κατηγοριοποιήθηκαν σε αντιστρεπτές και

μη αντιστρεπτές παγίδες. Για να απελευθερωθεί το υδρογόνο από τις μη αντιστρεπτές παγίδες, το υλικό θα πρέπει να θερμανθεί σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, διαφορετική για κάθε παγίδα, ενώ αντίθετα οι αντιστρεπτές παγίδες απελευθερώνουν το υδρογόνο συνεχώς. Σε παλαιότερες εργασίες ερευνήθηκε η συμπεριφορά του διαχεόμενου υδρογόνου στο κράμα αλουμινίου 2024. Βρέθηκε ότι το υδρογόνο αποθηκεύεται σε διάφορες ενεργειακές παγίδες, οι οποίες αντιστοιγούν σε διαφορετικά σημεία της μικροδομής, όπως στα όρια των κόκκων, στα κενά στην μικροδομή, στις γραμμοαταξίες και στην θ-φάση. Οι παγίδες αυτές απελευθερώνουν το υδρογόνο τους σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, ως  $\Sigma 1$  ορίστηκε η κατάσταση[22] η οποία σχετίζεται με τις θέσεις παρεμβολής του υδρογόνου στο πλέγμα, η Σ2 σχετίζεται με την διεπιφάνεια των σωματιδίων δεύτερης φάσης και του μητρικού υλικού, η Σ3 με το υδρύδιο που σχηματίζεται από την περίσσεια Mg στο υλικό και η Σ4 με τις φάσεις σκλήρυνσης της μικροδομής[29], [30], [31], [32], [33], [34]. Σε μια πρόσφατη εργασία αποδείχθηκε ότι η ενεργειακή παγίδα Σ4 σχετίζεται με την ύπαρξη της S-φάσης στο κράμα, ενώ η Σ3 με τους καταναγκασμούς που βρίσκονται στο υλικό. Οι ενεργειακές παγίδες Σ2, Σ3 και Σ4 χαρακτηρίζονται ως μη αντιστρεπτές, ενώ η Σ4 βρέθηκε να είναι η πιο ισχυρή, αφού απαιτείται υψηλότερη θερμοκρασία προκειμένου να απελευθερωθεί το παγιδευμένο υδρογόνο. Αντίθετα, η Σ1 χαρακτηρίστηκε αντιστρεπτή, αφού απελευθέρωνε το υδρογόνο ήδη από γαμηλές θερμοκρασίες κατά τη θέρμανση του υλικού. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η ποσότητα της έκλυσης υδρογόνου σε δοκίμια του κράματος αλουμινίου 2024 Σ3 για συνεχή θέρμανση έως τους 600°C. Οι θερμοκρασίες Σ1 έως Σ4 αντιστοιχούν στη θερμοκρασία που απαιτείται προκειμένου να απελευθερωθεί το υδρογόνο από τις ενεργειακές παγίδες[22], [29], [30], [31], [32], [33], [34].



Σχήμα 3.3.4: Ποσότητα της έκλυσης υδρογόνου σε δοκίμια του κράματος αλουμινίου 2024 Σ3 για συνεχής θέρμανση έως τους 600°C[22].

Στην εργασία, βρέθηκε ότι το υδρογόνο συγκεντρώνεται στα σημεία κάτω από την βλάβη διάβρωσης και εισχωρεί ακόμα περισσότερο στο βάθος του μη διαβρωμένου υλικού κάτω από το στρώμα διάβρωσης, μέσω της περικρυσταλλικής προσβολής. Όταν το υδρογόνο διαχέεται στο εσωτερικό του υλικού, δημιουργείται μια ψαθυροποιημένη ζώνη ακριβώς κάτω από την επιφανειακή βλάβη διάβρωσης[22], [29], [30], [31], [32], [33], [34].

# **3.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ AL 7075**

# 3.4.1 KPAMA AL 7075

Το κράμα αλουμινίου 7075 υφίσταται σκλήρυνση με θερμική κατεργασία. Τα κράματα αλουμινίου 7075 διαθέτουν ικανοποιητικά υψηλή αντοχή, δυσθραυστότητα και αντιδιαβρωτική αντοχή υπό μηχανική καταπόνηση ως προς το βάρος τους.

Είναι γνωστό ότι η μηχανική αντοχή των κραμάτων αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ποσοστό του Zn και Mg στο στερεό διάλυμα, καθώς από το υπέρκορο στερεό διάλυμα σχηματίζεται ομοιόμορφη και λεπτομερής διασπορά κατακρημνισμάτων της φάσεως MgZn2 κατά τη τεχνητή γήρανση, σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

Υπέρκορο στερεό διάλυμα  $\rightarrow$  ζώνες GP  $\rightarrow$  n' (μετασταθής φάση)  $\rightarrow$  n (MgZn2).

Ο Cu προστίθεται στα κράματα αλουμινίου 7075 προκειμένου να αυξήσει τη διαβρωτική αντοχή υπό μηχανική καταπόνηση. Η προσθήκη Cu στα κράματα αυτά έχει ως συνέπεια την κατακρήμνιση χονδρομερών φάσεων όπως Al<sub>2</sub>CuMg (S φάση) με τάξη μεγέθους ~3-6μm και σωματίδια Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe συσσωματωμένα σε επιμηκυμένους σχηματισμούς με τάξη μεγέθους ~ 15 μm, οι οποίες υποβαθμίζουν τη δυσθραυστότητα και την αποτελεσματική σκλήρυνση λόγω κατακρήμνισης. Επίσης, κατά τη τεχνητή γήρανση του κράματος σχηματίζονται ενώσεις του τύπου Al2Cu και Mg(ZnCu)<sub>2</sub> στα όρια των κόκκων του κράματος που επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες και τη διαβρωτική συμπεριφορά του κράματος[23], [24], [25].

Η κατανομή των διαλυμένων στοιχείων κατά την ομογενοποίηση του κράματος αλουμινίου 7075 οδηγεί σε μικροδιαφορισμό και στο σχηματισμό χονδρομερών ενδομεταλλικών ενώσεων τάξεως μm, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του κράματος. Οι ενδομεταλλικές ενώσεις μεγέθους μεγαλύτερου του 1 μm είναι αυτές που καθορίζουν ιδιότητες του κράματος όπως δυσθραυστότητα και αντοχή στη κόπωση.

#### 3.4.2 ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑL 7075

Οι μορφές εντοπισμένης διάβρωσης των κραμάτων αλουμινίου 7075 είναι οι ακόλουθες: α) εντοπισμένη διάβρωση σε θέσεις ενδομεταλλικών ενώσεων (τρηματική

διάβρωση, ΤΔ) β) Περικρυσταλλική διάβρωση (ΠΔ) και διάβρωση αποφλοίωσης (ΔΑ). γ) Άλλες μορφές εντοπισμένης διάβρωσης όπως η διάβρωση σχισμής (Crevice corrosion) και η δυναμοδιάβρωση

<u>Τρηματική διάβρωση (pitting corrosion)</u>: Στα κράμα αλουμινίου 7075 οι ενδομεταλλκές ενώσεις είναι οι περιοχές που αρχίζει η τρηματική διάβρωση διότι αυτές σχηματίζουν τοπικά γαλβανικά κελιά με την μήτρα. Η ύπαρξη διαφοράς δυναμικού μεταξύ ενδομεταλλικών ενώσεων και μήτρας είναι η κινούσα δύναμη για την εκδήλωση της τρηματικής διάβρωσης. Η διαδρομή του ρεύματος περιλαμβάνει ανταλλαγή ιόντων μέσω του ηλεκτρολύτη και ανταλλαγή ηλεκτρονίων μέσω μεταλλικής αγωγιμότητας κάθετα στη διεπιφάνεια ενδομεταλλικής ένωσης/μήτρας. Η επίθεση στη διεπιφάνεια αυτή προκαλείται από το τοπικό σπάσιμο του παθητικού στρώματος οξειδίου. Επιπλέον το σπάσιμο του στρώματος αυτού στις συγκεκριμένες θέσεις ευνοείται από την ύπαρξη μικροατελειών μέσα στο στρώμα οξειδίου και στις θέσεις αυτές. Επίσης οι ενδομεταλλικές ενώσεις συμβάλουν και στην έναρξη άλλων μορφών εντοπισμένης διάβρωσης[27], [23], [24], [25], [35], [36].

Πιο συγκεκριμένα στο κράμα Al 7075 οι ενώσεις Al7Cu2Fe και (Al, Cu)6 (Fe, Cu) προκαλούν σημαντική διάλυση της περιβάλλουσας μήτρας. Οι ενώσεις αυτές δρουν ως καθοδικές και παραμένουν αμετάβλητες ενώ η μήτρα δρα ως άνοδος και υπόκειται σε διάλυση. Οι ΕΕ παραμένουν σε ηλεκτρική επαφή με τη μήτρα, το ρεύμα λόγω γαλβανικού ζεύγους εξαρτάται από το εμβαδό τους, λόγος καθόδου προς άνοδο, και το όριο ανοδικής και καθοδικής πυκνότητας ρεύματος. Επειδή η περιοχή των ΕΕ είναι μικρή σε σχέση με την μήτρα ο λόγος των εμβαδών καθόδου προς άνοδο είναι μικρός, οπότε το ρεύμα γαλβανικού ζεύγους καθορίζεται από το συς μβαδών καθόδου προς άνοδο τους μικρός του εινέρους των εμβαδών καθόδου προς άνοδο είναι μικρός, οπότε το ρεύμα γαλβανικού ζεύγους καθορίζεται από το όριο καθοδικής πυκνότητας ρεύματος. Επομένως ο ρυθμός διάλυσης της μήτρας αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους των ΕΕ και του ορίου καθοδικό ρεύματος.

Η εντοπισμένη επίθεση στη μήτρα περιορίζεται στη περιοχή γύρω από τις ΕΕ και σε ακτίνα περίπου ίση με το πενταπλάσιο του μεγέθους τους, περίπου 100μm. Αυτό αντικατοπτρίζει την κατανομή του δυναμικού γύρω από τις ΕΕ το οποίο φαίνεται να μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης από την διεπιφάνεια ΕΕ/μήτρας. Δεδομένου ότι οι ΕΕ συχνά εμφανίζονται ως συσσωματώματα προσβολή σε μία ένωση μπορεί να εκθέσει και άλλες προκαλώντας σοβαρή τρηματική διάβρωση.

Στο κράμα Al7075 η ένωση Al<sub>2</sub>CuMg εμφανίζει καθοδική συμπεριφορά σε σχέση με τη μήτρα σε διάλυμα NaCl προκαλώντας τοπική διάλυση της μήτρας. Αυτές οι ενώσεις υφίστανται επιλεκτική διάλυση του Mg αμέσως μετά τη βύθιση τους σε επιθετικό διάλυμα και γίνονται πλούσιες σε Cu.

<u>Περικρυσταλλική διάβρωση και διάβρωση αποφλοίωσης</u>: Στο κράμα αλουμινίου 7075 η ευαισθησία σε ΠΔ και ΔΑ εξαρτάται από: α) τις καθιζήσεις σκληρυμένων σωματιδίων στα όρια των κόκκων, β) τον σχηματισμό ζωνών ελεύθερων από καθιζήσεις (PFZ), γ) τον διαφορισμό διαλυτών ατόμων στα όρια των κόκκων.

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί που περιγράφουν την ΔΑ. Στο κράμα Al 7075 τα κατακρημνίσματα MgZn<sub>2</sub> είναι ανοδικότερα σε σχέση με τη μήτρα. Ως εκ τούτου οι καθιζήσεις αυτών των σωματιδίων στα όρια των κόκκων κατά τη γήρανση καθιστά τα όρια των κόκκων ανοδικότερα σε σχέση με τη μήτρα. Αυτό παρέχει μια ανοδική

διαδρομή για εντοπισμένη διάβρωση κατά μήκος των ορίων των κόκκων και ευθύνεται για την ευαισθησία των κραμάτων αυτών σε ΠΔ.

Η ύπαρξη πολύ μικρών καθιζήσεων στα όρια των κόκκων με μικρή μεταξύ τους απόσταση προκαλεί ευαισθησία σε ΠΔ σε κράματα υπογηρασμένα καθώς και με κατεργασία μέγιστης αντοχής Τ6. Σε κατεργασία υπεργήρανσης το μέγεθος και η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα μεγαλύτερη αντοχή σε ΠΔ[23], [24], [25].

Η καθίζηση σωματιδίων στα όρια των κόκκων σχετίζεται και με το σχηματισμό ζωνών ελευθέρων από καθιζήσεις (PFZ), κατά μήκος των ορίων των κόκκων. Αυτό οφείλεται στην απογύμνωση από διαλυτά άτομα Zn και Mg του διαλύματος στερεάς διαλυτότητας στις περιοχές που πρόσκεινται στα όρια των κόκκων λόγω της διάχυσης των διαλυτών ατόμων στα όρια των κόκκων κατά την σκλήρυνση με καθίζηση.

Δεδομένου ότι οι ελεύθερες από καθιζήσεις ζώνες έχουν απογυμνωθεί από διαλυτά άτομα έχουν διαφορετική ηλεκτροχημική συμπεριφορά από τα όρια των κόκκων και την μήτρα. Αυτό συμβάλει στην εντοπισμένη διάβρωση κατά μήκος των ορίων των κόκκων, Ωστόσο η επίδραση της σύστασης και του μεγέθους των ελευθέρων ζωνών στην ΠΔ δεν είναι ξεκάθαρη. Το πλάτος των ελευθέρων ζωνών κυμαίνεται μεταξύ μερικών nm έως 50nm.

Ο διαφορισμός των διαλυτών ατόμων στα όρια των κόκκων συμβαίνει κατά τη διάρκεια της κατεργασίας διαλυτοποίησης και κατά τη διάρκεια της γρήγορης ψύξης σε θερμοκρασίες δωματίου. Ο ρυθμός ψύξης από τη θερμοκρασία διαλυτοποίησης επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό των διαλυτών ατόμων που διαφορίζονται στα όρια των κόκκων. Ο διαφορισμός των διαλυτών ατόμων Ζη και Mg στα όρια των κόκκων αποτελεί προνομιακή ανοδική διαδρομή για ΠΔ. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξηγηθεί η υψηλή ευαισθησία σε ΠΔ και ΔΑ της κατεργασίας διαλυτοποίησης. Η έκταση του διαφορισμού στα όρια των κόκκων μειώνεται μερικώς από τις καθιζήσεις των σκληρυμένων σωματιδίων.

Η διάβρωση αποφλοίωσης λαμβάνει χώρα σε κράματα με επιμηκυμένους κόκκους κατά μήκος της διεύθυνσης κατεργασίας. Τα κράματα με μεγάλη ευαισθησία σε ΠΔ υφίστανται διάβρωση αποφλοίωσης. Στην περίπτωση της ΔΑ η ανοδική διαδρομή βρίσκεται σε παράλληλα επίπεδα κατά μήκος της διεύθυνσης κατεργασίας. Η ΠΔ κατά μήκος αυτών των διαδρομών δημιουργεί ένα πολυεπίπεδο τύπο διάβρωσης όπου στρώματα μη διαβρωμένου υλικού αφαιρούνται λόγω δυνάμεων που δημιουργούνται από τα προϊόντα διάβρωσης. Η ύπαρξη ενδομεταλλικών ενώσεων πλούσιων σε Fe και Cu κατά μήκος αυτών των ανοδικών διαδρομών συμβάλει στη ΔΑ.

#### 3.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ AL - ΤΙΟ

Από την παρατήρηση των μικροδομών των συνθέτων που παράχθηκαν με τη μέθοδο της χύτευσης υπό ανάδευση υπό τη παρουσία άλατος  $K_2 TiF_6$  προκύπτει καλή κατανομή και ενσωμάτωση των σωματιδίων της ενίσχυσης του TiC με τη μήτρα του αλουμινίου. Η κατανομή των σωματιδίων της ενίσχυσης χαρακτηρίζεται από μεμονωμένα

σωματίδια και συσσωματώματα αυτών εντοπισμένα κυρίως στα όρια των κόκκων. Η κατανομή αυτή των σωματιδίων της ενίσχυσης είναι αποτέλεσμα των φαινομένων απώθησης από τους στερεοποιημένους κόκκους. Στα συγκεκριμένα σύνθετα εμφανίζεται επίσης και μία ενδομεταλλική φάση η οποία είναι προϊόν της αντίδρασης του άλατος  $K_2 TiF_6$  με τη μήτρα του αλουμινίου[19], [20].

Από τη μελέτη των δοκιμίων μας παρατηρούμε ότι η ενδομεταλλική φάση Al<sub>3</sub>Ti εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή απομονωμένων κρυστάλλων αλλά και με τη μορφή λεπτών ιζημάτων τα οποία συνδέονται άμεσα με την υπό του μικρού κεραμική ενίσχυση TiC. Η φάση Al<sub>3</sub>Ti δημιουργείται λόγω της αντίδρασης του τηγμένου αλουμινίου με το άλας K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> ή λόγω της αντίδρασης του τηγμένου αλουμινίου με τα σωματίδια του TiC στην περίπτωση όπου τα σύνθετα ενισχύονται με TiC. Η πρώτη περίπτωση σχηματισμού της φάσης Al<sub>3</sub>Ti πραγματοποιείται μεταξύ του τήγματος Al και του άλατος K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> με την αντίδραση[19], [20]:

 $3K_2TiF_6(s) + 13Al(l) \rightarrow 3Al_3Ti(s) + 3KAlF_4 + K_3AlF_6(l)$ 

Το πρώτο προϊόν της συγκεκριμένης αντίδρασης είναι το Al<sub>3</sub>Ti ενώ τα υπόλοιπα προϊόντα είναι η ρευστή σκωρία η οποία επιπλέει στην επιφάνεια του τήγματος.

Η δεύτερη περίπτωση σχηματισμού του Al<sub>3</sub>Ti η οποία είναι θερμοδυναμικά δυσμενής είναι επιτεύζιμη όταν τα σωματίδια της ενίσχυσης του TiC σε υπό του μικρού μεγέθη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων επιταχυνόμενης αντιδραστικότητας του TiC με τη τηγμένη μήτρα του αλουμινίου σύμφωνα με την αντίδραση:

 $13Al(l) + 3 TiC(s) \rightarrow 3Al_3Ti(s) + Al_4C_3(s)$ 

Ανεξάρτητα από την έκταση του προϊόντος Al<sub>3</sub>Ti της αντίδρασης παρατηρείται ότι η ενσωμάτωση των σωματιδίων της ενίσχυσης του TiC είναι επιτυχημένη και οφείλεται κυρίως στον παράγοντα διαβροχής K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>. Η αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου άλατος στην ενσωμάτωση των σωματιδίων οφείλεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο άλας απελευθερώνει Ti στο μίγμα του Al το οποίο μειώνει την επιφανειακή τάση του Al, βελτιώνοντας έτσι τα διαβροχικά χαρακτηριστικά του συστήματος Al-TiC και ενισχύοντας έτσι την ενσωμάτωση την ενσωμάτωση των σωματιδίων στο τήγμα του αλουμινίου. Τα σωματίδια Al<sub>3</sub>Ti και TiC εμφανίζονται κυρίως στα όρια των κόκκων ενώ επίσης εμφανίζονται και κάποια συσσωματώματα της ενίσχυσης λόγω της αρχικής συσσωμάτωσης που είχε η σκόνη του TiC πριν εισαχθεί στο τήγμα του αλουμινίου[19].

Από την ανάλυση των δοκιμίων μας παρατηρείται ότι η απώλεια μάζας αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης, ενώ για τα ενισχυμένα υλικά με TiC η απώλεια μάζας είναι μικρότερη σε σύγκριση με το αντίστοιχο μονολιθικό κράμα. Ανεξάρτητα από τους μηχανισμούς φθοράς, η ευεργετική δράση των σωματιδίων ενίσχυσης αλλά κυρίως του Al<sub>3</sub>Ti στη μείωση του ρυθμού φθοράς έγκειται κυρίως στην απορρόφηση του φορτίου που μεταφέρεται στη μήτρα, εμποδίζοντας/καθυστερώντας με αυτόν τον τρόπο την ανάπτυξη ρωγμών λόγω πλαστικής παραμόρφωσης. Επίσης τα σωματίδια της ενίσχυσης συμβάλλουν στη μείωση της πραγματικής περιοχής επαφής της μήτρας με την αντιμαχόμενη επιφάνεια και στη συνέχεια αναβάλλουν/καθυστερούν τη δημιουργία ρωγμών και ελαττωμάτων λόγω της εκτενούς πλαστικής παραμόρφωσης και τέλος προσδίδουν θερμική σταθερότητα στη μήτρα (αναβάλλοντας φαινόμενα αποσκλήρυνσης λόγω θέρμανσης) ειδικότερα σε συνθήκες έντονης φθοράς.

Αν κοιτάξουμε την επιφάνεια των δοκιμίων παρατηρείται η χαρακτηριστική μορφολογία <<λόφων – κοιλάδων>>. Οι λόφοι συνήθως χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερου πλάτους ίχνους σε σχέση με τις κοιλάδες πράγμα το οποίο δηλώνει ότι υπάρχει σημαντική μετακίνηση υλικού προς τους λόφους. Το φαινόμενο της δημιουργίας λόφων-κοιλάδων παρατηρείται αφού κατά τη διάρκεια της φθοράς συμβαίνει εντατική πλαστική παραμόρφωση της μαλακής μήτρας μπροστά από το αντιμαχόμενο υλικό, προκαλώντας σημαντική ροή του υλικού σε όλες τις διευθύνσεις, παράλληλες και κάθετες στη διεύθυνση ολίσθησης. Το αποτέλεσμα της ροής του υλικού είναι η δημιουργία ενός λόφου και όταν η κίνηση του αντιμαχόμενου υλικού δεν μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω ροή του υλικού στον λόφο τον προσπερνάει τον προσπερνάει και συνεχίζει στην επόμενη επιφάνεια. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η μορφολογία <<λόφων-κοιλάδων>>[19], [20].

Σε ορισμένες περιοχές λόφων παρατηρείται η ύπαρξη οξειδίων του αλουμινίου καθώς και τιτανίου. Η παρουσία τους οφείλεται στην αντίδραση της επιφάνειας με το οξυγόνο της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την επαφή δύο αντιμαχόμενων επιφανειών. Ο σχηματισμός αυτών των οξειδίων καθυστερεί τη μετάβαση από καθεστώς ήπιας φθοράς σε καθεστώς έντονης φθοράς στα σύνθετα μήτρας αλουμινίου.

Επιπλέον παρατηρώντας την επιφάνεια των δοκιμίων αποκαλύπτεται η παρουσία ρωγμών-ατελειών στη διεύθυνση της φθοράς ολίσθησης. Η ανάπτυξη και ο πολλαπλασιασμός των συγκεκριμένων ρωγμών διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στο μηχανισμό της φθοράς διότι, οι συγκεκριμένες επιφανειακές ατέλειες οδηγούν σε μεγάλη αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια της φθοράς του συνθέτου. Ο μηχανισμός της δημιουργίας και της ανάπτυξης των ρωγμών βασίζεται στα φαινόμενα θερμικής κόπωσης που επικρατούν στα λεπτά σχηματιζόμενα στρώματα των οξειδίων του αλουμινίου αλλά και στην επιφάνεια της μαλακής όλκιμης μήτρας του αλουμινίου.

Η κύρια μορφή διάβρωσης που αναπτύσσεται είναι η περικρυσταλλική λόγω του αρχικού σχηματισμού γαλβανικού κελιού μεταξύ ευτηκτικού μικροσυστατικού Al/Al-Fe-Si και Al ή μεταξύ Al και Al-Fe-Si στο ευτητκτικό μικροσυστατικό. Η διάβρωση ξεκινά με το σχηματισμό οπών στη διεπιφάνεια Al/Al-Fe-Si ή μήτρας Al και ευτηκτικού μικροσυστατικού και συνεχίζεται με περικρυσταλλική συνένωση των οπών. Η περικρυσταλλική διάβρωση δεν ήταν γενική αλλά εντοπισμένη σε περιοχές υψηλής συγκέντρωσης AlFeSi[19], [20].

#### 3.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑL - WC

#### 3.6.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Οι μορφές διάβρωσης που παρουσιάζονται στα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας αλουμινίου είναι κυρίως δύο, η περικρυσταλλική και η διάβρωση οπών.
Η περικρυσταλλική διάβρωση είναι η διάβρωση που λαμβάνει χώρα στα όρια των κόκκων λόγω διαφοράς δυναμικού μεταξύ μίας φάσης κατακρήμνισης και του εσωτερικού του κόκκου με τις παράπλευρες πλευρές των κόκκων λόγω απογύμνωσης των κραματικών στοιχείων. Το χειρότερο σενάριο της περικρυσταλλικής διάβρωσης είναι η κατάρρευση των κόκκων και η αστοχία του υλικού.

Η διάβρωση οπών είναι μία τοπική μορφή διάβρωσης που εμφανίζεται με τη μορφή οπών ή κοιλωμάτων. Συμβαίνει σε μέταλλα που παθητικοποιούνται όταν αυτά βρεθούν σε περιβάλλον αλογονιδίων. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι η διάβρωση οπών ξεκινάει μόνο όταν το δυναμικό διάβρωσης του μετάλλου ξεπεράσει το δυναμικό οπών[21].

Η διάβρωση οπών ξεκινάει με τοπική κατάρρευση του παθητικού επιστρώματος οξειδίων στα σημεία που παρουσιάζει ασυνέχεια. Παράδειγμα ασυνέχειας παρουσιάζουν οι καθοδικές ενδομεταλλικές ενώσεις (που μπορούν να προκαλέσουν και περικρυσταλλική διάβρωση) που δημιουργούνται στο αλουμίνιο λόγω ακαθαρσιών Fe,Si όπου εκεί το παθητικό επίστρωνα θα εμφανίζεται λεπτό ή μη συνεκτικό.

Έπειτα λόγω διαφοράς δυναμικού δημιουργείται γαλβανικό κελί σύστασης, όπου στην κάθοδο (επιφάνεια ενδομεταλλικού κατακρημνίσματος σιδήρου) συμβαίνει αναγωγή του οξυγόνου:  $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-(1)$ 

Στην άνοδο ( μήτρα αλουμινίου ) λαμβάνει χώρα η αντίδραση: Al + 3H<sub>2</sub>O → Al(OH)<sub>3</sub> + 3H<sup>+</sup> + 3e<sup>-</sup>(2)

Λόγω παραγωγής H+ στην άνοδο, το pH του ηλεκτρολύτη μειώνεται και λαμβάνει χώρα η αντίδραση: Al  $\rightarrow$  Al<sup>3+</sup> + 3e<sup>-</sup> (3)

Τα ευκίνητα Cl- μετακινούνται στη θέση διάλυσης του Al για να αποκαταστήσουν την ηλεκτρική ουδετερότητα, παράλληλα όμως διευκολύνουν τις αντιδράσεις υδρόλυσης (4) και (5) που μειώνουν ακόμη περισσότερο το pH επιταχύνοντας τη διάλυση του Al.

 $Al^{3+} + 3H_2O + 3Cl^{-} \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+ + 3Cl^{-}(4)$  $Al^{3+} + H_2O + Cl^{-} \rightarrow Al(OH)^{2+} + H^+ + Cl^{-}(5)$ 

Παράλληλα οι καθοδικές αντιδράσεις που συμβαίνουν είναι οι εξής[21]:

 $H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$  (6) O<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O + 4e<sup>-</sup> → 4OH<sup>-</sup> (7)

Καθώς η οπή βαθαίνει η διείσδυση του O<sub>2</sub> δυσχεραίνει δημιουργώντας κελί διαφορικού αερισμού όπου η κάθοδος είναι οι εξωτερικές επιφάνειες άφθονες σε οξυγόνο και άνοδος το μέταλλο του πυθμένα της οπής. Όσο προχωρά η διάλυση του αλουμινίου μέσα στην οπή τόσο αυξάνει η συγκέντρωση του Cl. για να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα. Έπειτα λόγω αδυναμίας εξισορρόπησης του pH, τα υδροξείδια αναδιαλύονται και σχηματίζουν άλατα που είναι θερμοδυναμικά σταθερά σε χαμηλές τιμές pH. Τα στερεά άλατα καθιζάνουν λόγω υπερκορεσμού της συγκέντρωσης των ιόντων στο εσωτερικό της οπής με αποτέλεσμα να περιορίζουν την μεταφορά μάζας προς και από την οπή. Αποτέλεσμα του σχηματισμού των αλάτων είναι η δύσκολη παρατήρηση της διάβρωσης των οπών. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται σχηματικά η διάβρωση των οπών[21].



Εικόνα 3.6.1: Μηχανισμός διάβρωσης οπών. Στον πυθμένα της οπής διακρίνονται παραπροϊόντα διάβρωσης[21].

Εν κατακλείδι τα σύνθετα Al – WC χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων ενδομεταλλικών φάσεων και συστάδων νανοσωματιδίων ή πυρήνων WC και σωματιδίων ενδομεταλλικών φάσεων. Η κύρια μορφή διάβρωσης που εμφανίζεται είναι η περικρυσταλλική λόγω σχηματισμού γαλβανικού κελιού μεταξύ ευτυκτικού μικροσυστατικού Al/Al-Fe-Si και Al ή μεταξύ Al και Al-Fe-Si στο ευτηκτικό μικροσυστατικό. Οι διεπιφάνειες της μήτρας με τα σωματίδια διασποράς WC, Al<sub>3</sub>Ti, Al<sub>5</sub>W, Al<sub>12</sub>W και Al<sub>4</sub>W έμειναν ανέπαφες στην διάβρωση, όπως και η μήτρα στην γειτνίαση με συστάδες και συσσωματώματα. Τα σωματίδια ενδομεταλλικών φάσεων καθώς και τα συσσωματώματα σωματιδίων/συστάδων καρβιδίων/ενδομεταλλικών φάσεων δρουν συχνά σαν φράγματα της προόδου της περικρυσταλλικής διάβρωσης. Δεν παρατηρείται καθοδική δράση των ευμεγεθών σωματιδίων Al<sub>12</sub>W και των συσσωματωμάτων των δεσμών Al<sub>5</sub>W, και των συσσωματωμάτων/συστάδων Al<sub>3</sub>Ti[21].

# 4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

# 4.1 ΑΝΟΔΙΩΣΗ

Με την ανοδίωση μετασχηματίζεται η επιφάνεια του αλουμινίου και δημιουργείται, τεχνητά, ένα στρώμα αλουμινίου του οξειδίου. Επειδή η διαδικασία γίνεται με απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες, αυτό το στρώμα οξειδίου γίνεται πολύ συνεκτικό και σκληρό. Το στρώμα αυτό, όταν εκτίθεται στην ατμόσφαιρα δεν επιτρέπει τη διάβρωση του Al σε βάθος και έτσι το προστατεύει. Το ανοδικό επίστρωμα είναι διαφανές και η δομή του φέρει πόρους, οι οποίοι επιτρέπουν την ενσωμάτωση χρωστικών υλών και έτσι σχηματίζουν την επιφάνειά του[9], [37], [38], [39].

Μερικά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ανοδίωσης είναι[40]:

- Το στρώμα ανοδίωσης δημιουργείται από το ίδιο το μέταλλο, είναι πλήρως ενσωματωμένο σε αυτό και έτσι δεν υπάρχουν προβλήματα πρόσφησης.
- Η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά της ανοδίωσης είναι πάρα πολύ καλή, αφού τηρηθούν όλοι οι κανόνες της παραγωγικής διαδικασίας, παραγωγής και χρήσης.
- Τα ανοδιωμένα προϊόντα αλουμινίου έχουν μεταλλική εμφάνιση.
- Υπάρχει περιορισμός χρωμάτων.

Η ανοδίωση (anodizing) είναι μία ηλεκτροχημική διαδικασία, η οποία στοχεύει στην κατασκευή τεχνητού στρώματος πυκνής δομής οξειδίου, το οποίο είναι από 200 ως 2500 φορές πιο παχύ από το φυσικό οξείδιο. Το πάχος του εν λόγω οξειδίου κυμαίνεται πρακτικά από 20 μm ως 25 μm (για μέγιστη αντιδιαβρωτική προστασία).

Η ανοδίωση πραγματοποιείται θέτοντας το δοκίμιο του αλουμινίου ως άνοδο σε ηλεκτρολυτικό κελί [9], [37], [38], [39], [40] (ανοδική πόλωση του δοκιμίου) με ηλεκτρολύτη 1,5 M θειικό οξύ (συνήθως) και με κάθοδο από μόλυβδο ή από αλουμίνιου (counter electrode). Καθώς εφαρμόζεται σταθερή πυκνότητα ρεύματος στο κελί, το κομμάτι του αλουμινίου υπόκειται σε οξείδωση, αντιδρά με το νερό και δημιουργείται οξείδιο του αλουμινίου, ενώ στην κάθοδο δημιουργείται αέριο υδρογόνο, όπως φαίνεται και στις παρακάτω απλοποιημένες χημικές εξισώσεις:

1100 0000 00000000000000000000000000000	
Άνοδος	$2\mathrm{Al}_{(\mathrm{s})} + 3\mathrm{H}_2\mathrm{O}_{(\mathrm{l})} \rightarrow \mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3 + 6\mathrm{H}^+ + 6\mathrm{e}^-$
Κάθοδος	$6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_{2(g)}$

#### Πίνακας 4.1.1: Ανοδίωση αλουμινίου

Αρχικά αναπτύσσεται ένα ανθεκτικό και πυκνό φιλμ οξειδίου, το οποίο όμως είναι ιδιαίτερα πορώδες στην εξωτερική του πλευρά. Το πορώδες, δημιουργείται εξαιτίας του ηλεκτρολύτη, ο οποίος έχει τη τάση να επαναδιαλύει μερικώς το οξείδιο του αλουμινίου. Το εξωτερικό αυτό είναι κατά 99% πορώδες, ενώ η απόσταση των πόρων από την επιφάνεια του καθαρού ανοξείδωτου μετάλλου πλησιάζει τα 20 nm. Το πορώδες αυτό οξείδιο <<σφραγίζεται>> (sealing) με εμβάπτιση με θερμό νερό ή διάλυμα NaOH. Κατ' άλλους η μορφή (Al(OH)<sub>3</sub>) χαρακτηρίζεται ως βοημιτική (boehmite structure), αλλά κατά πολλούς είναι ορθότερη η άποψη της δημιουργίας μονοΰδρίτη του οξειδίου του αλουμινίου  $Al_2O_3$ ,  $H_2O$ , ή γ-AlOOH.

Το πάχος του οξειδίου εξαρτάται από την επιβαλλόμενη πυκνότητα ρεύματος, την διαφορά δυναμικού στο κελί καθώς επίσης και από το χρόνο της ηλεκτροχημικής αυτής διεργασίας.

Οι ιδιότητες και οι ποιότητα του προστατευτικού στρώματος εξαρτώνται από τη σύσταση και το είδος του ηλεκτρολύτη, από τις συνθήκες οξείδωσης (θερμοκρασία, πυκνότητα ρεύματος, χρόνος διεργασίας) καθώς και από τον τύπο του κράματος[9]. Πάντως το ηλεκτροχημικά παραχθέν αυτό στρώμα του οξειδίου παρέχει εξαιρετικά αντιδιαβρωτική προστασία, μειώνοντας κατά πολλές τάξεις μεγέθους την πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης icorr[37], [38], [39], [40].

Με την ανοδίωση μπορούν να παραχθούν διαφανείς, γκρι, καφεκίτρινες (bronze) ή και μαύρες επιφάνειες, ανάλογα με το είδος του αλουμινίου, την σύσταση του ηλεκτρολύτη καθώς και τις συνθήκες της ανοδίωσης. Τα δοκίμια που μόλις έχουν υποστεί ανοδίωση χωρίς σφράγιση, είναι ιδιαίτερα απορροφητικά εξαιτίας του μεγάλου πορώδους και ως εκ τούτου μπορούν εύκολα να χρωματιστούν, ακόμη και να υποστούν ηλεκτροστατική βαφή (powder coating). Από την στιγμή, όμως, κατά την οποία σφραγιστεί το οξείδιο δεν είναι δυνατή καμία μετατροπή του χρώματός του, καθώς επίσης καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη η δυνατότητα επιτυχούς πρόσφυσης οργανικών επικαλυπτικών.



Στην βιομηχανική πρακτική (βλέπε Σχήμα 4.1) [37], [38], [39], [40], για την διεργασία της ανοδίωσης του αλουμινίου, αρχικά γίνεται μηχανική προεργασία της επιφάνειας με στόχο τη βελτίωσή της με τη βοήθεια λειαντικών ταινιών, τροχών, αμμοβολής κ.α. Στην συνέχεια απομακρύνονται από την επιφάνεια λίπη ή και άλλες ακαθαρσίες σε όξινα ή αλκαλικά λουτρά (γημική προεργασία). Ακολουθεί η στίλβωση της επιφάνειας η οποία μπορεί να γίνει με γημικό ή ηλεκτρογημικό τρόπο, ο οποίος δίνει και τα καλύτερα αποτελέσματα. Με την στίλβωση απομακρύνεται εκλεκτικά ένα μέρος του μετάλλου, στις γεωμετρικές προεξοχές, μειώνοντας έτσι, την τραχύτητα της επιφάνειας και κατά συνέπεια αυξάνοντας την στιλπνότητα (ανακλαστικότητα). Η αναγκαιότητα της στίλβωσης προκύπτει από το γεγονός ότι η ανοδική οξείδωση οδηγεί σε μείωση της στιλπνότητας. Γενικά απαιτείται να έχει γίνει καλή μηχανική λείανση και απολίπανση της επιφάνειας, ενώ οι συνθήκες της τόσο για τη χημική όσο και για την ηλεκτροχημική στίλβωση εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους.

Η ανοδική οξείδωση αποτελεί το κυρίως στάδιο της όλης διεργασίας της ανοδίωσης και μπορεί να γίνει σε διάλυμα θειικού, χρωμικού, φωσφορικού ή οξαλικού οξέος. Οι συνθήκες ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του λουτρού και ανάλογα με τις επιδιωκόμενες ιδιότητες (σκληρότητα, πάχος, στρώμα κ.α.)

Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής βιομηχανικής ανοδίωσης[40]

Για την βαφή η οποία πρέπει να γίνεται ευθύς αμέσως μετά την ανοδική οξείδωση (πριν από τη σφράγιση) υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες τεχνολογίες με πολλές παραλλαγές. Η απλή εμβάπτιση (dipping) σε διάλυμα χρωστικής αποτελεί την πιο απλή και λιγότερο απαιτητική σε μηχανολογικό εξοπλισμό. Επίσης, είναι δυνατή η χρήση ηλεκτροστατικής βαφής.

Πάντως η επιφάνεια του αλουμινίου μπορεί να χρωματισθεί και κατά την διάρκεια της ανοδικής οξείδωσης αν προστεθούν στο λουτρό κατάλληλα χρωμοφόρα αντιδραστήρια.



Εικόνα 4.1: (1) Οξείδιο του αλουμινίου μετά την ανοδίωση, (2) Σχηματισμός Al(OH)<sub>3</sub> με την εμβάπτιση σε θερμό νερό ή σε διάλυμα NaOH, (3) Σφράγισμα των πόρων λόγω μεγαλύτερου μοριακού όγκου του Al(OH)<sub>3</sub>H σφράγιση της πορώδους ταινίας εντούτοις μειώνει την σκληρότητα ταινιών και την αντίσταση στην τριβή[37], [38], [39], [40].

Όπως προαναφέρθηκε, με το <<σφράγισμα>> επέρχεται κλείσιμο των πόρων του οξειδίου, μέσω της ενυδάτωσης του σε μόριο με μεγαλύτερο μοριακό όγκο. Επιπλέον, στην περίπτωση, που έχει προηγηθεί η διεργασία του ηλεκτρολυτικού χρωματισμού, οι χρωστικές ύλες εγκλωβίζονται μέσα στους πόρους και εξασφαλίζεται, έτσι η σταθερότητα του χρώματος στον χρόνο. Η <<σφράγιση>> επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

Ζεστό σφράγισμα γίνεται με απιονισμένο νερό ή ατμό κοντά στο σημείο ζέσεως του για 2 min για κάθε μικρό ανοδίωσης.[Πίνακας 5.1.2]

Κρύο σφράγισμα γίνεται με εμβάπτιση σε λουτρό θερμοκρασίας 25 – 30 °C, το οποίο περιέχει άλατα φθοριούχου νικελίου κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες συγκεντρώσεων των συστατικών, του pH, της θερμοκρασίας κ.λπ. Η ολοκλήρωση του σφραγίσματος επιτυγχάνεται με την παραμονή των τεμαχίων σε λουτρό θειικού νικελίου 60 °C, και για χρόνο 0,8 – 1,2 min για κάθε μικρό ανοδίωσης.

Συνήθως χρησιμοποιούνται και διαλύματα αλάτων, τα οποία βελτιώνουν τις ιδιότητες της σφράγισης (άλατα νικελίου μόνα τους ή σε συνδυασμό με άλατα κοβαλτίου και διχρωμικά άλατα) [37], [38], [39], [40].

Πίνακας 4.1.2: Ανάλογα με την περιοχή στην οποία πρόκειται να τοποθετηθούν τα αλουμίνια εφαρμόζεται διαφορετικό πάχος ανοδίωσης[38], [40]

Κατηγορία	Πάχος
Εσωτερικοί χώροι	10 µm
Εζωτερικοί χώροι σε κοινό αστικό περιβάλλον	15 µm
Εζωτερικοί χώροι σε διαβρωτικό περιβάλλον (θαλάσσιο, βιομηχανικό)	20 µm

Η διαδικασία της σφράγισης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη καθ' ότι με τυχόν ανεπαρκή σφράγιση δεν μπορεί να προστατευθεί το αλουμίνιο από οξείδωση. Αυτό, συμβαίνει διότι οι διαβρωτικοί παράγοντες θα εισέρχονται μέσω των πόρων του οξειδίου του αλουμινίου και θα προσβάλουν το υπόστρωμα, δεδομένου ότι στο στρώμα φραγής είναι πολύ μικρό. Επιπλέον στα έγχρωμα ανοδικά επιστρώματα, οι χρωστικές ουσίες εγκλωβίζονται στο εσωτερικό των πόρων και έτσι εξασφαλίζεται μακροχρόνια σταθερότητα χρωματισμού.

Πίνακας 4.1.3: Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα ανοδίωσης

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αντιδιαβρωτική ικανότητα παρόμοια με την	Απαιτούνται ειδικές διατάζεις (πηγή ρεύματος)
χρωμικοποίηση	Δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με ψεκασμό
Δυνατότητα πλήρους ελέγχου και ρύθμισης	Η πρόσφυση είναι σαφώς χαμηλότερη από του
της διεργασίας και της τελικής ποιότητας	στρώματος με χρωμικοποίηση
ΑC: Λιγότερα στάδια	

Εκτός από την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος, υπάρχει και η τεχνολογία της ανοδίωσης με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC anodizing). Με αυτή τη διαδικασία, το δοκίμιο του αλουμινίου καθίσταται περιοδικά άνοδος και κάθοδος. Όταν αποτελεί την άνοδο του κελιού αναπτύσσεται το προστατευτικό οξείδιο, όπως κατά την συμβατική τεχνολογία (DC anodizing). Όταν όμως το δοκίμιο καθίσταται κάθοδος του κελιού, τότε επί της επιφάνειας δημιουργείται αέριο υδρογόνο, το οποίο απολιπαίνει την επιφάνεια. Ως εκ τούτου, με την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας δεν απαιτείται να προηγηθεί στάδιο απολίπανσης. Μειονέκτημα της εν λόγω μεθόδου είναι η απαίτηση για υψηλότερη θερμοκρασία κατά την διεργασία (80 °C ) [28], [37], [38], [39].

#### 4.2 ΑΝΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

### 4.2.1 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΠΑΘΗΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Η μέθοδος της ανοδικής προστασίας βασίζεται στην ικανότητα παθητικοποίησης ορισμένων μετάλλων. Ορισμένα υλικά σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα (π.χ. ανοξείδωτος χάλυβας σε θειϊκό οξύ) και σε συγκεκριμένα εύρη ανοδικών δυναμικών, παθητικοποιούνται σχηματίζοντας πολύ ισχυρά προστατευτικά στρώματα. Συνεπώς η μέθοδος της παθητικοποίησης εφαρμόζεται μόνο στα μέταλλα/κράματα που έχουν τη δυνατότητα παθητικοποίησης στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Στα δομικά μέταλλα (δηλαδή στα μέταλλα που απαντώνται σε εφαρμογές που φέρουν φορτίο),[9], [37], [38], [39], [40] η ευκολία παθητικοποίησης κατά ελάσσονα σειρά δίνεται στον Πίνακα 4.2.1.

Τιτάνιο	Υψηλή ικανότητα παθητικοποίησης
Αλουμίνιο	$\rightarrow$
Ανοξείδωτος χάλυβας	$\downarrow$
Νικέλιο	$\downarrow$
Ανθρακούχοι χάλυβες	$\downarrow$
Χαλκός	Χαμηλή ικανότητα παθητικοποίησης

Πίνακας 4.2.1: Σειρά παθητικοποίησης δομικών μετάλλων

Η παθητικοποίηση μπορεί να προκληθεί με έκθεση του μετάλλου σε πυκνά οξειδωτικά διαλύματα. Για παράδειγμα, η προσβολή του σιδήρου από πυκνό νιτρικό οξύ οδηγεί στον άμεσο σχηματισμό ενός λεπτού προστατευτικού φιλμ υδροξειδίου του σιδήρου που προστατεύει το μέταλλο από περαιτέρω διάβρωση.

Η παθητικοποίηση μπορεί επίσης να προκληθεί με την εσκεμμένη αύξηση του δυναμικού του μετάλλου ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς σε συγκεκριμένο επίπεδο. Αυτό γίνεται με εφαρμογή ανοδικού ρεύματος στην επιφάνεια του μετάλλου. Μόλις σχηματισθεί το προστατευτικό φιλμ με την οξείδωση της ανόδου, η πυκνότητα του ρεύματος από την άνοδο στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη, μειώνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας του επιφανειακού οξειδίου. Η μείωση και όχι ο μηδενισμός του ρεύματος που άγεται στο κελί διάβρωσης (και συνεπώς η μείωση και όχι ο μηδενισμός του ρεύματος που άνεται στο γαλβανικού στοιχείου) δείχνει ότι το παθητικοποιημένο μέταλλο συνεχίζει να διαβρώνεται αλλά με πολύ μικρή ταχύτητα. Η ανοδική προστασία σκοπό έχει να κρατά το δυναμικό του μετάλλου στις τιμές όπου συμβαίνει η παθητικοποίηση[9], [37], [38], [39], [40].

#### 4.2.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΟΔΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

Το φαινόμενο της παθητικοποίησης μπορεί να εξηγηθεί με βάση τις καμπύλες πόλωσης. Είναι γνωστό ότι για να προχωρήσει η διάβρωση ενός μετάλλου πρέπει να περνάει ρεύμα μέσα από γαλβανικό κελί (καθότι η διάβρωση είναι ηλεκτροχημική αντίδραση που περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρονίων και ιόντων δηλαδή ρεύματος). Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι οι τιμές Ε° (πρότυπο δυναμικό κελιού) και οι τιμές Ε (ηλεκτρεγερτική δύναμη κελιού σύμφωνα με την εξίσωση του Nernst[38], [39], [40]:

Eκελιού =  $E^{o} - (RT/nF) \ln (προϊόντων οξειδοαναγωγής/αντιδρώντων οξειδοαναγωγής)$ 

που δείχνουν την τάση αυθόρμητης όδευσης της ηλεκτροχημικής αντίδρασης, μετρούνται με βολτόμετρο <<άπειρης>> αντίστασης (i →0). Εάν περάσει ρεύμα στο γαλβανικό στοιγείο (για παράδειγμα αν τα δύο ηλεκτρόδια συνδεθούν μεταξύ τους χωρίς την παρεμβολή του βολτομέτρου άπειρης αντίστασης), τα δυναμικά των ηλεκτροδίων παίρνουν τιμές διαφορετικές από τις τιμές στο ανοιχτό κύκλωμα. Η απόκλιση του κάθε ηλεκτροδίου από το δυναμικό του ανοιχτού κυκλώματος  $(i \rightarrow 0)$  με την αύξηση ή μείωση της πυκνότητας του ρεύματος ονομάζεται πόλωση (polarization) και το μέγεθος της απόκλισης ονομάζεται υπέρταση (overpotential). Οι μεταβολές των δυναμικών των μετάλλων σε συνάρτηση με την πυκνότητα του ρεύματος παρουσιάζονται στα διαγράμματα πόλωσης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η γενική μορφή της καμπύλης ανοδικής πόλωσης ενός μετάλλου που παθητικοποιείται. Στις γαμηλές τιμές δυναμικού και πάνω από το δυναμικό του ανοικτού κυκλώματος  $(E(M^{y+}/M))$ , η πυκνότητα του ρεύματος αυξάνει γραμμικά και το μέταλλο διαβρώνεται, δηλαδή βρίσκεται στην ενεργή περιοχή δυναμικών (τμήμα AB). Αύξηση του δυναμικού σε μία συγκεκριμένη τιμή (Ecp: κρίσιμο δυναμικό παθητικοποίησης critical passivation potential) οδηγεί σε απότομη μείωση της πυκνότητας του ρεύματος, λόγω σχηματισμού προστατευτικού επιστρώματος χαμηλής αγωγιμότητας, με την αντίδραση της οξείδωσης[9], [38], [39], [40]:



Σχήμα 4.2.2: Τυπική καμπύλη πόλωσης για μέταλλο που παθητικοποιείται[9]  $xM + yH2O \rightarrow MxOy + 2yH^+ + 2ye^-$ 

Κατά τη μείωση της πυκνότητας του ρεύματος (ΒΓ: μεταβατική περιοχή των δυναμικών), το οξείδιο βαθμιαία επεκτείνεται σε όλη την επιφάνεια του μετάλλου για να σχηματιστεί ένα λεπτό φιλμ. Η διέλευση των μεταλλικών ιόντων διαμέσου του φιλμ οξειδίου συμβαίνει όλο και πιο αργά και έτσι το ρεύμα των μεταλλικών ιόντων που αφήνουν το μέταλλο για το οξείδιο μειώνεται μέχρι που γίνεται τελικά πολύ μικρό όταν η επιφάνεια καλυφθεί πλήρως από το φιλμ του οξειδίου. Ο σχηματισμός του οξειδίου ξεκινά κοντά στο σημείο Β (κρίσιμο δυναμικό παθητικοποίησης). Η τιμή icp (κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος παθητικοποίησης – critical passivation density) αποτελεί το μέτρο ευκολίας της παθητικοποίησης. Όσο πιο μικρή είναι τόσο πιο εύκολα γίνεται η παθητικοποίηση. Όταν η επιφάνεια του μετάλλου καλυφθεί πλήρως με το παθητικό

φιλμ, το πάχος του φιλμ αυξάνει μέχρι μία τιμή ισορροπίας και το ρεύμα των μεταλλικών ιόντων που περνάνε μέσα από το φιλμ γίνεται ανεξάρτητο του δυναμικού. Το κατώτερο δυναμικό που αντιστοιχεί στη νέα κατάσταση λέγεται δυναμικό Flade (Ef στο σημείο Γ). Το δυναμικό Flade είναι γενικά κοντά στο κρίσιμο δυναμικό παθητικοποίησης. Η πυκνότητα ρεύματος στο δυναμικό Flade λαμβάνει μία πολύ μικρή τιμή i<sub>p</sub>, η οποία παραμένει σχετικά σταθερή για ένα εύρος τιμών δυναμικών.

Σε αυτό το εύρος δυναμικών, λόγω πολύ μικρής πυκνότητας ρεύματος, η διάβρωση προχωράει με πολύ μικρή ταχύτητα και τότε λέγεται ότι το μέταλλο βρίσκεται στην παθητική περιοχή των δυναμικών. Η τιμή i<sub>p</sub> (πυκνότητα παθητικού ρεύματος) που περνάει μέσα από το παθητικό επίστρωμα αποτελεί μέτρο της προστατευτικότητας του οξειδίου. Όσο πιο χαμηλή είναι, τόσο πιο προστατευτικό είναι το φιλμ. Για να επιτευχθεί πραγματική παθητικοποίηση, δηλαδή σχηματισμός συμπαγούς και συνεκτικού επιφανειακού φιλμ οξειδίου, πρέπει η πυκνότητα παθητικού ρεύματος να είναι <100 μA/cm<sup>2</sup>. Όταν οι πυκνότητες ρεύματος είναι μεγαλύτερες από αυτή την τιμή, τότε η κατάσταση της επιφάνειας του μετάλλου χαρακτηρίζεται ως ψευδοπαθητική και μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως: σχηματισμός ένυδρων ημιαγώγιμων επιφανειακών οξειδίων, τα οποία μπορούν να προστατεψουν λόγω πάχους ή ακόμη και δράση ενεργών διεργασιών που συμβαίνουν παράλληλα με την πραγματική παθητικοποίηση στην περίπτωση περίπλοκων μικροδομών[9], [38], [39], [40].

Περαιτέρω αύξηση του δυναμικού άνω μίας τιμής Eb (δυναμικό κατάρρευσηςbreakdown potential ή δυναμικό αποκοπής: breakaway potential), κοντά στο σημείο Z, οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος, η οποία αντιστοιχεί στη διεργασία της ματαπαθητικής διάλυσης (transpassive dissolution). Κατά το στάδιο αυτό (τμήμα ZH), Το παθητικό επίστρωμα αποβάλλει κατιόντα σε μία από τις κάτωθι διεργασίες:

Α) Εκλέπτυνση του φιλμ εάν η αλλαγή στην κατάσταση οξείδωσης είναι μεγάλη. Η διεργασία αυτή ονομάζεται μεταπαθητική διάλυση, με την έννοια της φυσικής κατάρρευσης (breakdown) του φιλμ, λόγω αύξησης δυναμικού άνω μίας κρίσιμης τιμής Eb. Έτσι, στους ανοξείδωτους χάλυβες (Cr>11% κ.β.), το φιλμ διαλύεται με την εξής αντίδραση:  $2Cr+7H_2O \rightarrow Cr2O7^{2-}+14H^++12e^{-}$ 

Η μεταπαθητική διάλυση είναι πολύ σημαντική σε ισχυρά όξινα και οξειδωτικά διαλύματα π.χ. ΗΝΟ3.

B) Η δεύτερη πιθανή διεργασία κατά το στάδιο της μεταπαθητικής διάλυσης ονομάζεται ηλεκτρο-στίλβωση (electropolishing). Κατά τη διεργασία αυτή συμβαίνει μικροσκοπική συμπύκνωση των κενών που προέκυψαν από τη διάλυση του μετάλλουοξειδίου, οδηγώντας σε αποκόλληση (breakaway) του φιλμ από το υπόστρωμα[9], [38], [39], [40].

Εάν η απότομη αύξηση του παθητικού ρεύματος συμβεί αρκετά χαμηλότερα από το δυναμικό  $E_b$ , τότε μάλλον οφείλεται σε τοπική κατάρρευση του παθητικού φιλμ λόγω διείσδυσης ανιόντων, κυρίως Cl<sup>-</sup>. Τα ανιόντα αυτά προκαλούν τοπική διάλυση του φιλμ σε αδύνατα σημεία της μεταλλικής επιφάνειας (όρια κόκκου, γραμμικές διαταραχές, εγκλείσματα, πόροι κλπ). Η τοπική κατάρρευση του φιλμ οδηγεί σε έκθεση του υποκείμενου μετάλλου και διάλυσή του, με συνέπεια αύξηση του ανοδικού ρεύματος. Συνεχιζόμενη η διάλυση οδηγεί σε σχηματισμό οπών. Η έναρξη του σχηματισμού οπών

(E<sub>p</sub>) κοντά στο σημείο Δ, απ' όπου η πυκνότητα ρεύματος αυξάνει γρήγορα με την αύξηση του δυναμικού. Η τιμή του δυναμικού οπών εξαρτάται από τις σχετικές συγκεντρώσεις των ανιόντων που σταθεροποιούν το παθητικό φιλμ (π.χ. O<sup>2-</sup>) και των ανιόντων που το αποσταθεροποιούν (π.χ. Cl<sup>2-</sup>). Εάν η συγκέντρωση των σταθεροποιητικών ανιόντων είναι αρκετά υψηλότερη, τότε η κατάρρευση του φιλμ μπορεί να καταστεί τελείως και να μην παρατηρηθεί δυναμικό οπών. Τότε, η απότομη αύξηση του ρεύματος θα γίνει σε αρκετά υψηλότερα δυναμικά (σημείο Z) και θα οφείλεται στη μεταπαθητική διάλυση. Όσο πιο χαμηλό είναι το δυναμικό οπών τόσο μεγαλύτερη είναι η επιδεκτικότητα του μετάλλου στη διάβρωση οπών.

Ακόμη μεγαλύτερη αύξηση του δυναμικού μετά από μία κρίσιμη τιμή E<sub>sp</sub> (κοντά στο σημείο Η), οδηγεί σε μείωση του ρεύματος λόγω δευτερογενούς παθητικοποίησης, διεργασίας που είναι πλημμελώς διασαφηνισμένη. Συχνά κατά τη δευτερογενή παθητικοποίηση σχηματίζονται στη μεταλλική επιφάνεια παχιά ημιαγώγιμα επιστρώματα ισχυρά ενυδατωμένων οξειδίων, τα οποία προστατεύουν λόγω πάχους και ομορφιάς. Η δευτερογενής παθητικοποίηση συμβαίνει σε πολύ μικρότερο εύρος δυναμικών από την πρωτογενή παθητικοποίηση.

Ακόμη μεγαλύτερη αύξηση υ δυναμικού μετά από το σημείο Θ, οδηγεί σε απότομη αύξηση του δυναμικού λόγω έκλυσης οξυγόνου με μία από τις αντιδράσεις[9], [38], [39], [40]:

 $4OH^{-} \rightarrow O2+2H_2O+4e^{-}$  $2H_2O \rightarrow O_2+4H^{+}+4e^{-}$ 

Πολλές φορές τα στάδια της μεταπαθητικής διάλυσης και της έκλυσης οξυγόνου συμβαίνουν ταυτόχρονα.

Η μέθοδος με την οποία λαμβάνεται η καμπύλη πόλωσης του σχήματος 5.2.2 ονομάζεται ποτενσιοδυναμική πόλωση. Με τη βοήθεια του γαλβανοστάτη/ ποτενσιοστάτη μεταβάλλεται διαρκώς το δυναμικό μετάλλου ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς (με προκαθορισμένο τρόπο), ενώ καταγράφεται η αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος. Με την ανοδική καμπύλη πόλωσης προσδιορίζεται το βέλτιστο δυναμικό προστασίας ενός μετάλλου. Το βέλτιστο δυναμικό για ανοδική προστασία είναι στο μέσον της παθητικής περιοχής, για να επιτρέπει ελαφριές μεταβολές στο ελεγχόμενο δυναμικό χωρίς να επηρεάσει αρνητικά τον ρυθμό διάβρωσης[9], [38], [39], [40].

(Στην καμπύλη πόλωσης, η τιμή io δεν σημαίνει την πυκνότητα ρεύματος που αντιστοιχεί στο δυναμικό του ανοικτού κυκλώματος διότι αυτή τείνει στο 0, αλλά είναι η πυκνότητα ρεύματος που βρίσκεται στην εξίσωση του Faraday, όταν το μέταλλο βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας δηλαδή όταν:  $r_{\alpha\nu\alpha\gamma}=r_{o\xi\epsilon\iota\delta}=i_0/(n*F)$ 

# 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

# **5.1 ГЕNIKA**

 Οποιοδήποτε κατάλληλο γυαλί ή πλαστικό ή παρόμοιο αδρανές δοχείο μπορεί να χρησιμοποιείται για να περιέχει διάλυμα και δείγματα κατά την δοκιμαστική περίοδο. Το δοχείο πρέπει να περιλαμβάνει κάλυμμα ώστε να μειωθεί το ποσοστό εξάτμισης του διαλύματος[22], [23], [24], [25], [26].



Εικόνα 5.1.1: Αδρανές δοχείο το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων

- Η λείανση των δοκιμίων αρχικά (πριν την πειραματική διαδικασία), είναι επιθυμητή (λείανση ακμών και επιφάνειάς τους) ώστε να έχουμε καλύτερα μεταλλογραφικά αποτελέσματα[41], [42], [43], [44]
- Το μέγεθος των δοκιμίων για τα κράματα Al 1050, 2024 και 7075 πρέπει να είναι: μήκος τουλάχιστον 50 mm, πλάτος τουλάχιστον 6 mm και πάχος ως 25 mm το μέγιστο ή μικρότερο
- Η πίσω και οι παράπλευρες επιφάνειες του δείγματος πρέπει να επικαλυφθούν με φυσικό κερί
- Τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + 3 °C και pH=0,4. Ο όγκος του διαλύματος προς την επιφάνεια των δοκιμίων πρέπει να είναι 20 ml / cm<sup>2</sup> (αποδεκτά όρια από 10 ως 30 ml / cm<sup>2</sup> βάσει προδιαγραφής ASTM G34 ). Οι συγκεντρώσεις του διαλύματος πρέπει να είναι 4 M NaCl, 0,5 M KNO<sub>3</sub>, και 0,1 M HNO<sub>3</sub>[11], [22], [23], [24], [25].





Εικόνα 5.1.2 – 5.1.3: ΗΝΟ<sub>3</sub> και ΚΝΟ<sub>3</sub> αντίστοιχα



Εικόνα 5.1.4 – 5.1.5: Απιονισμένο νερό και NaCl αντίστοιχα



Εικόνα 5.1.6: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος

- Βύθιση πολλών δειγμάτων στο ίδιο δοχείο είναι αποδεκτή
- Έκθεση δοκιμίων σε 6 διαφορετικούς χρόνους: 2, 4, 8, 12, 16, 24 ώρες. Η μέγιστη περίοδος έκθεσης για τα δοκίμια της σειράς 2XXX είναι 96 ώρες και για τα δοκίμια της σειράς 7XXX είναι 48 ώρες βάσει της προδιαγραφής ASTM G34[11], [22], [23], [24], [25]
- Απαιτείται χρήση φρέσκου διαλύματος κατά την έναρξη κάθε δοκιμής. Το διάλυμα δεν πρέπει να αλλάζεται ακόμη και αν κατά την διάρκεια της δοκιμής έχω αύξηση του pH. Είναι φυσιολογική η αύξηση του pH από 0,4 ακόμη και σε 3 κατά τις πρώτες ώρες
- Μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας απαιτείται καθαρισμός των δοκιμίων με νιτρικό οξύ, ή ξέπλυμα με ακετόνη και στέγνωμα με παροχή ζεστού αέρα
- Χρησιμοποιείστε το λιγότερο 2 δοκίμια σε κάθε δείγμα, ώστε να υπάρχει επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα (σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G67, μικρές τυπικές αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων) [11], [22], [23], [24], [25]

#### 5.2 ΛΕΙΑΝΣΗ

Κατά τη διαδικασία της λείανσης, τα δοκίμια υποβάλλονται σε μια διαδικασία αφαίρεσης της τραχύτητας και των ατελειών από την επιφάνειά τους. Η διαδικασία της λείανσης πραγματοποιήθηκε με την χρήση της συσκευής της Struers Rotopol 25. Η ταχύτητα περιστροφής των δίσκων λείανσης πάνω στους οποίους τοποθετούνταν τα λειαντικά χαρτιά κυμαίνονταν μεταξύ των 300 και 500 rpm. Η δύναμη που χρειάζονταν ώστε να εξαλειφθούν οι επιφανειακές ατέλειες ήταν περίπου 20 N και επιβάλλονταν από τον χειριστή της συσκευής. Κατά το στάδιο της λείανσης λαμβάνει χώρα απομάκρυνση του υλικού της επιφάνειας του δοκιμίου από λειαντικά χαρτιά τα οποία αποτελούνται από κόκκους SiC. Τα νούμερα των λειαντικών χαρτιών που χρησιμοποιήθηκαν ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων ανά τετραγωνική ίντσα ήταν τα εξής: 600, 800, 1000, 1200, 2400 grit. Όσο πιο πολλοί κόκκοι ανά τετραγωνική ίντσα τόσο πιο λείο είναι το αποτέλεσμα της επιφάνειας. Ο χρόνος παραμονής στο κάθε γυαλόχαρτο κυμαίνονταν μεταξύ των 3 και 5 λεπτών[19], [21], [41], [42], [43], [44].



Εικόνα 5.2.1: Χρησιμοποιημένο γυαλόχαρτο λείανσης δοκιμίων 1200 grit



Εικόνα 5.2.2: Μηχάνημα λείανσηςστίλβωσης Struers Rotopol 25

#### 5.3 ΣΤΙΛΒΩΣΗ

Κατά το στάδιο της στίλβωσης αφαιρούνται από την επιφάνεια ατέλειες πολύ πιο μικρές από αυτές που αφαιρούνται στο στάδιο της λείανσης με αποτέλεσμα η επιφάνεια του δοκιμίου να γίνει σαν καθρέφτης. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών υφασμάτων (ειδικά συνθετικά πανιά Dur, Dac και Nap) και ταυτοχρόνως σπρέι διαμαντιών ανάλογα με το ύφασμα που χρησιμοποιείται (ψεκασμός ανά τακτά χρονικά διαστήματα). Τα σπρέι διαμαντιών αποτελούνται από κόκκους 6,3 και 1 μm. Επίσης κατά το στάδιο της στίλβωσης χρησιμοποιείται λιπαντικό για την μείωση της τριβής μεταξύ υφάσματος και δοκιμίου, που αποτρέπει τον σχηματισμό περαιτέρω ρωγμών στο δοκίμιο[19], [21], [41], [42], [43], [44]. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε στη στίλβωση είναι το ίδιο με αυτό της λείανσης (βλέπε Εικόνα 5.2.2).



<text>

Εικόνα 5.3.1: Χρησιμοποιημένου πανί στίλβωσης τύπου Dac

Εικόνα 5.3.2: Σπρέι διαμαντιού κόκκων 3μm

# 5.4 ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Μετά τη μεταλλογραφική διαδικασία, ακολουθεί η οπτική μικροσκοπία η οποία είναι μία πολύ σημαντική μέθοδος παρατήρησης, ανάλυσης και ερμηνείας της μικροδομής του προς εξέταση υλικού. Η πηγή ακτινοβολίας που απαιτείται για τη λειτουργία του οπτικού μικροσκοπίου είναι το λευκό φως, ενώ η μέγιστη μεγεθυντική ικανότητα του είναι x1000. Το οπτικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση της μικροδομής και τη λήψη των φωτογραφιών ήταν της εταιρίας Leica, μοντέλο DM-4000, το οποίο έχει τη δυνατότητα πέντε διαφορετικών μεγεθύνσεων (x50, x100, x200, x500, x1000). Στα δοκίμια που πραγματοποιήθηκε η οπτική μικροσκοπία έγινε λήψη φωτογραφιών από λογισμικό το οποίο είναι εγκατεστημένο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος συνδέεται με το οπτικό μικροσκόπιο[15], [19], [21], [27], [37].



Εικόνες 5.4.1 – 5.4.2: Οπτικό μικροσκόπιο Leica DM – 4000 συνδεδεμένο με τον υπολογιστή που περιέχει το απαραίτητο λογισμικό



Εικόνα 5.4.4: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας A12024

Εικόνα 5.4.3: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας Al050



Εικόνα 5.4.5: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας Al 7075



<u>100 μm</u>

Εικόνα 5.4.6:Μικροδομή λειασμένης Εικά επιφάνειας Al-TiC 0,7% vol

Εικόνα 5.4.7:Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας Al-TiC 1% vol



Εικόνα 5.4.8: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας Al-WC 0,5% vol

# 5.5 ΔΟΚΙΜΙΑ

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αποτελούνταν από κράματα αλουμινίου 1050, 2024, 7075 και από σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας αλουμινίου Al-TiC, Al-WC.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη μεταλλογραφική ανάλυση των κραμάτων Al 1050, 2024 και 7075 ήταν ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Το πλάτος τους ήταν 50mm, ενώ το μήκος τους 100mm. Η μια πλευρά των δοκιμίων προστατεύθηκε με φυσικό κερί προκειμένου να μην διαβρωθεί. Στο διαβρωτικό περιβάλλον εκτέθηκε μόνο αυτή η μία πλευρά του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες προστατεύτηκαν με φυσικό κερί. Η γεωμετρία τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα[41], [42], [43], [44], [22], [23], [24], [25].



Σχήμα 5.5: Γεωμετρία δοκιμίου μεταλλογραφικής ανάλυσης



Εικόνα 5.5.1: Κερί το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην πίσω και στις παράπλευρες όψεις των δοκιμίων



Εικόνα 5.5.2: Επικαλυμμένη επιφάνεια κραμάτων αλουμινίου Al 1050, Al 2024 και Al 7075 με κερί (πίσω όψη)



Εικόνα 5.5.3: Επικαλυμμένη επιφάνεια κραμάτων αλουμινίου Al 1050, Al 2024 και Al 7075 με κερί (μπροστινή όψη)

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας αλουμινίου Al-TiC, Al-WC έχουν σχήμα στρόγγυλο και εμφανίζουν διάμετρο 16 mm και πάχος 5 mm.



Εικόνα 5.5.4: Επικαλυμμένη επιφάνεια κράματος Al-TiC, Al-WC με κερί (πίσω όψη)



Εικόνα 5.5.5: Επικαλυμμένη επιφάνεια κράματος Al-TiC, Al-WC με κερί (μπροστινή όψη)

# 5.6 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ

Για την διάβρωση των δοκιμίων επιλέχθηκε η επιταχυνθείσα εργαστηριακή δοκιμή της διάβρωσης αποφλοίωσης, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34-01. Σε παλαιότερες έρευνες, έχει βρεθεί ότι αυτή η δοκιμή προσομοιώνει στο εργαστήριο ικανοποιητικά την φυσική διάβρωση στα κράματα αλουμινίου[10], [22], [23], [24], [25], [26].

Σύμφωνα με την προδιαγραφή, το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει τις χημικές ενώσεις : χλωριούχο νάτριο (NaCl), νιτρικό κάλιο (KNO3) και νιτρικό οξύ (HNO3) αραιωμένες σε 1lt απιονισμένο νερό στις ακόλουθες αναλογίες: 234 gr NaCl, 50gr KNO3 και 6.3mL HNO3. Η θερμοκρασία του διαλύματος διατηρήθηκε σταθερή στους 25±3°C και η τιμή του pH ήταν 0.4. Ο όγκος του διαλύματος προς την επιφάνεια των δοκιμίων όταν 20mL/cm2. Μετά την έκθεση των δοκιμίων για 6 διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα (2, 4, 8, 12, 16 και 24 ώρες), ακολουθούσε καθαρισμός των δοκιμίων που περιλάμβανε τοποθέτηση των δοκιμίων σε νιτρικό οξύ, στη συνέχεια ξέπλυμα με ακετόνη και στέγνωμα με παροχή ζεστού αέρα. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνταν σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας στους -21°C μέχρι να πραγματοποιηθεί η μεταλλογραφική ανάλυση και οι μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού προκειμένου να μην διαβρωθεί περαιτέρω το υλικό) [22], [23], [24], [25], [26].

# 5.7 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Για την ποσοτικοποίηση της εξέλιξης της βλάβης διάβρωσης που αναπτύχθηκε στο υλικό μετά από την έκθεση του υλικού στις 6 διαφορετικές χρονικές περιόδους, μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης στα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα δοκίμια σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46[35], [36]. Μελετήθηκε η διάβρωση που αναπτύχθηκε στην άνω αλλά και στην παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Πιο συγκεκριμένα στην άνω επιφάνεια, επιλέχθηκαν τυχαία 2 περιοχές ίδιου εμβαδού (10x10mm) στις οποίες μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της βλάβης διάβρωσης[22], [23], [24], [25], [27].



Σχήμα 5.7: Επιφάνειες μελέτης για την ποσοτικοποίηση της βλάβης διάβρωσης



Εικόνα 5.7.1: Επιλογή 2 τυχαίων περιοχών ίδιου εμβαδού (10x10mm) στις οποίες μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της βλάβης διάβρωσης.



Εικόνα 5.7.2: Επιλογή 2 τυχαίων περιοχών ίδιου εμβαδού (10x10mm) στις οποίες μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της βλάβης διάβρωσης.

Για τις μετρήσεις της βλάβης διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο τύπου LEICA DM LM. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν και τομές στην άνω αλλά και στην παράπλευρη επιφάνεια με σκοπό τον πλήρη χαρακτηρισμό της διάβρωσης, ο οποίος στο σύνολό του περιλαμβάνει[27]:

- Μέτρηση του μέσου και μέγιστου βάθους των τρημμάτων/περιοχών αποφλοίωσης: Προσδιορίστηκε το μέσο βάθος των τρημμάτων που εντοπίστηκαν στις επιλεγμένες περιοχές. Ως μέγιστο βάθος προσδιορίστηκε το μέσο βάθος των 10 βαθύτερων τρημμάτων που εντοπίστηκαν στις περιοχές, αφού λόγω της τυχαίας επιλογής αυτών, το απολύτως μεγαλύτερο τρήμμα στο σύνολο της επιφάνειας ενδεχομένως να μην εντοπίστηκε.
- Μέτρηση της διαμέτρου των τρημμάτων/περιοχών αποφλοίωσης: Για κάθε τρήμμα που εντοπίστηκε, μετρήθηκαν οι δύο κάθετες διάμετροι του και εξήχθη ο μέσος όρος τους ο οποίος χαρακτήρισε την διάμετρο του τρήμματος.
- Μέτρηση της πυκνότητας των τρημμάτων / περιοχών αποφλοίωσης: Μετρήθηκε ο αριθμός των τρημμάτων σε κάθε τυχαία επιλεγμένη περιοχή.
- Χαρακτηρισμό του σχήματος των τρημμάτων: Οι τομές στο υλικό ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46[22], [23], [24], [25], [27], [35], [36].



Εικόνα 5.7.3: Τομές στο υλικό για ανάδειξη του σχήματος των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46[35], [36].



Εικόνα 5.7.4: Μικροτόμος

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αξιολογήθηκαν και για την περίπτωση της βλάβης διάβρωσης στην παράπλευρη επιφάνεια. Η μέτρηση αυτών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τομών, λειαίνοντας σταδιακά κατά το πάχος των δοκιμίων και καταγράφοντας κάθε φορά την παρατηρούμενη βλάβη.

## 5.8 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

ΚράμαΑL/ ΣύνθεταΑL	AL1050	AL 2024	AL7075	AL-TIC 0,7%VOL	AL-TIC 1%VOL	AL-WC 0,5%VOL
Τραχύτητα	0,178 μm	0,204 μm	0,269 μm	0,190 µm	0,236 μm	0,370 µm

Πίνακας 5.8: Τιμές επιφανειακής τραχύτητας κραμάτων Al/ σύνθετων Al

#### 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ

# 6.1.1 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΩΝ ΟΠΩΝ – ΤΟΜΗ



(f) Microstructural Orientation

Σχήμα 6.1.1: Παραλλαγές στο σχήμα διατομής των οπών[27], [35], [36]

## 6.2 AL 1050

Στο κράμα αλουμινίου 1050 και για τους χρόνους έκθεσης σε οξύ 2, 4, 8, 12, 16, και 24 ωρών δεν παρατηρείται διάβρωση στην επιφάνεια καθώς το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία.



Εικόνες 6.2.1 – 6.2.2: Δεν παρατηρείται διάβρωση αποφλίωσης στην επιφάνεια του Al 1050 στους 6 διαφορετικούς χρόνους έκθεσης, το αλουμίνιο έχει υποστεί ανοδίωση (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.2.3: Διαβρωμένη επιφάνεια Al 1050 μετά από την έκθεση του σε οξύ, δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη διαφορά στο Al 1050 πριν και μετά την διάβρωση, καθώς έχει υποστεί ανοδίωση (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.2.4 – 6.2.5: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 1050 μετά την έκθεση σε οξύ 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.2.6 – 6.2.7: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 1050 μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.2.8 – 6.2.9: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 1050 μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.2.10: Επιφάνεια υπό τομή κράματος αλουμινίου 1050 (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)

# 6.2.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΡΑΜΑ AL 1050

Στο κράμα αλουμινίου 1050 και για τους χρόνους έκθεσης σε οξύ 2, 4, 8, 12, 16, και 24 ωρών δεν παρατηρείται διάβρωση στην επιφάνεια καθώς το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία, έτσι δεν παρατηρώ κάτι στην άνω επιφάνεια.

Για το κράμα αλουμινίου 1050, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και πάρα πολλά εμφανίζουν τη μορφή d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b, και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής f και e, σχήματα της μορφής a και b εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και f, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής d και e εμφανίζονται μέτρια)

#### 6.3 AL 2024

Στο κράμα αλουμινίου 2024 [23], [24], [25] και για τους χρόνους έκθεσης σε οξύ 2, 4, 8 και 24 ωρών παρατηρείται διάβρωση στην επιφάνεια η οποία θα δοθεί παρακάτω σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων, ενώ για τους χρόνους 12 και 16 ωρών δεν παρατηρείται διάβρωση καθώς το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία.

Πίνακας 6.3.1 – Διάγραμμα 6.3.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης[22].

Χρόνος	έκθεσης	Μέσο βάθος (μm)	Μέση διάμετρος
(ώρες)			(μm)
2		23	30
4		25	50
8		35	90
12		-	-
16		-	-
24		230	1200



Πίνακας 6.3.2 – Διάγραμμα 6.3.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Μέσο βάθος 10 βαθύτερων τοριμιάτων (μm)	Μέση διάμετρος 10 βαθύτερων τοριμιάτων (μm)
2	50	50
4	65	70
8	160	170
12	-	-
16	-	-
24	270	1600



Πίνακας 6.3.3 – Διάγραμμα 6.3.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Τρήμματα / 100 mm <sup>2</sup>	Περιοχές αποφλοίωσης / 100 mm <sup>2</sup>
2	100	
4	140	
8	175	
12	-	
16		-
24		7



Πίνακας 6.3.4 – Διάγραμμα 6.3.4: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος	Ποσοστό	Βάθος	Μέση
έκθεσης	(%)	τρήμματος	διάμετρος
(ώρες)		(µm)	(µm)
2	82	10-20	30
2	12	21-30	43
2	3	31-40	65
2	3	>40	60



Πίνακας 6.3.5 – Διάγραμμα 6.3.5: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος	Ποσοστό	Βάθος	Μέση
έκθεσης	(%)	τρήμματος	διάμετρος
(ώρες)		(µm)	(µm)
4	70	10-20	38
4	20	21-30	45
4	7	31-40	63
4	2	41-50	81
4	1	>50	126



Πίνακας 6.3.6 – Διάγραμμα 6.3.6: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος	Ποσοστό	Βάθος	Μέση
έκθεσης	(%)	τρήμματος	διάμετρος
(ώρες)		(µm)	(µm)
8	22	10-20	47
8	38	21-30	58
8	17	31-40	78
8	7	41-50	98
8	5	51-60	119
8	5	61-70	137
8	2	71-80	174
8	2	81-90	194
8	1	91-100	240
8	1	>100	257





Εικόνες 6.3.1 – 6.3.2: Έκθεση Al 2024 σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.3.3 – 6.3.4: Έκθεση Al 2024 σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα, στις 12 ώρες το κράμα μας, έχει υποστεί ανοδίωση (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)
#### περιοχή αποφλοίωσης



Εικόνες 6.3.5 – 6.3.6: Έκθεση Al 2024 σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα, στις 16 ώρες το κράμα μας, έχει υποστεί ανοδίωση (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.3.7: Διαβρωμένη επιφάνεια Al 2024 μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.3.8 – 6.3.9: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 2024 μετά την έκθεση σε οξύ 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.3.10 – 6.3.11: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 2024 μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.3.12 – 6.3.13: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 2024 μετά την έκθεση σε οξύ 16 και 24 ώρες αντίστοιχα(τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.3.14: Επιφάνεια υπό τομή κράματος αλουμινίου 2024 (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)

## 6.3.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΡΑΜΑ AL 2024

Με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Στις 12 ώρες το κράμα έχει υποστεί ανοδική προστασία και δεν παρατηρείται κάτι στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου.
- Στις 16 ώρες το κράμα έχει υποστεί ανοδική προστασία και δεν παρατηρείται κάτι στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου.
- Στις 24 ώρες έκθεσης η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Γενικότερα στο κράμα αλουμινίου 2024 παρατηρούμε αρκετές οπές με σχετικά μεσσαίο βάθος και διάμετρο

Όπως παρατηρείται από τις κατανομές, σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ρηχών τρημμάτων υπερτερεί των βαθύτερων. Επιπλέον, ο αριθμός των βαθύτερων τρημμάτων αυξάνεται με τον χρόνο έκθεσης, τη στιγμή που τα πιο ρηχά τρήμματα λιγοστεύουν, ενώ η διάμετρος είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη του βάθους των τρημμάτων. Οι κατανομές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε μια προσπάθεια πλήρους απεικόνισης της τρημματικής διάβρωσης που αναπτύχθηκε στο υλικό, και επεξηγούν την σημαντική διαφορά μεταξύ του μέσου και του μέγιστου βάθους των τρημμάτων. Στις περιπτώςσεις όπου παρουσιάστηκε αποφλοίωση, λόγω της μικρής πυκνότητας των περιοχών αποφλούωσης, αλλά και της μικρής διαφοράς μεταξύ της τιμής του μέσου και του μέγιστου βάθους των κρίθηκε αναγκαία η

πραγματοποίηση κατανομών. Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση εύναι ότι η ανάπτυξη της διάβρωσης αποφλοίωσης φαίνεται να καθυστερεί σημαντικά με την ύπαρξη της ανοδίωσης[22], [23], [24], [25], [26].

Για το κράμα αλουμινίου 2024, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και πάρα πολλά εμφανίζουν τη μορφή d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b, και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής f και e, σχήματα της μορφής a και b εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και f, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής d και e εμφανίζονται μέτρια)

#### 6.4 AL 7075

Στο κράμα αλουμινίου 7075 και για τους χρόνους έκθεσης σε οξύ 2, 4, 8, και 16 ωρών παρατηρείται διάβρωση στην επιφάνεια η οποία θα δοθεί παρακάτω σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων, ενώ για τους χρόνους 12 και 24 ωρών δεν παρατηρείται διάβρωση καθώς το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία.

Πίνακας 6.4.1 – Διάγραμμα 6.4.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος	έκθεσης	Μέσο βάθος (μm)	Μέση διάμετρο	ς
(ώρες)			(µm)	
2		30	40	
4		35	70	
8		50	100	
12		-	-	
16		240	1000	
24		-	-	



Πίνακας 6.4.2 – Διάγραμμα 6.4.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Μέσο βάθος 10 βαθύτερων τοριμιάτων (μm)	Μέση διάμετρος 10 βαθύτερων τοριμιάτων (μm)
2	65	60
4	85	80
8	175	190
12	-	-
16	250	1200
24	-	-



Πίνακας 6.4.3 – Διάγραμμα 6.4.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Τρήμματα / 100 mm <sup>2</sup>	Περιοχές αποφλοίωσης / 100 mm <sup>2</sup>
2	80	
4	120	
8	150	
12	-	
16		2
24		-



Πίνακας 6.4.4 – Διάγραμμα 6.4.4: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος	Ποσοστό	Βάθος	Μέση
έκθεσης	(%)	τρήμματος	διάμετρος
(ώρες)		(µm)	(µm)
2	80	10-20	40
2	10	21-30	50
2	4	31-40	70
2	4	41-50	80
2	2	>50	75



Πίνακας 6.4.5 – Διάγραμμα 6.4.5: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος	Ποσοστό	Βάθος	Μέση
έκθεσης	(%)	τρήμματος	διάμετρος
(ώρες)		(µm)	(µm)
4	65	10-20	48
4	20	21-30	55
4	10	31-40	60
4	2	41-50	67
4	2	51-60	95
4	1	>60	150



Πίνακας 6.4.6 – Διάγραμμα 6.4.6: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος	Ποσοστό	Βάθος	Μέση
έκθεσης	(%)	τρήμματος	διάμετρος
(ώρες)		(µm)	(µm)
8	22	10-20	55
8	38	21-30	65
8	17	31-40	90
8	7	41-50	110
8	5	51-60	130
8	5	61-70	150
8	2	71-80	190
8	2	81-90	220
8	1	91-100	265
8	1	>100	290





Εικόνες 6.4.1 – 6.4.2: Έκθεση Al 7075 σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.4.3 – 6.4.4: Έκθεση Al 7075 σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα, στις 12 ώρες το κράμα μας, έχει υποστεί ανοδίωση (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.4.5 – 6.4.6: Έκθεση Al 7075 σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα, , στις 24 ώρες το κράμα μας, έχει υποστεί ανοδίωση (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.4.7: Διαβρωμένη επιφάνεια Al 7075 μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.4.8 – 6.4.9: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 7075 μετά την έκθεση σε οξύ 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.4.10 – 6.4.11: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 7075 μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.4.12 – 6.4.13: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 7075 μετά την έκθεση σε οξύ 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.4.14: Επιφάνεια υπό τομή κράματος αλουμινίου 7075 (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)

# 6.4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ KPAMA AL 7075

Με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Στις 12 ώρες το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία και δεν παρατηρώ κάτι στην άνω επιφάνεια.
- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας

περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.

- Στις 24 ώρες το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία και δεν παρατηρώ κάτι στην άνω επιφάνεια.
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Σε σχέση με το κράμα αλουμινίου 2024 παρατηρώ ότι στο κράμα αλουμινίου 7075 μειώνεται η πυκνότητα των οπών αλλά αυξάνεται ο βάθος και η διάμετρός τους.

Όπως παρατηρείται από τις κατανομές, σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ρηχών τρημμάτων υπερτερεί των βαθύτερων. Επιπλέον, ο αριθμός των βαθύτερων τρημμάτων αυξάνεται με τον χρόνο έκθεσης, τη στιγμή που τα πιο ρηχά τρήμματα λιγοστεύουν, ενώ η διάμετρος είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη του βάθους των τρημμάτων. Οι κατανομές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε μια προσπάθεια πλήρους απεικόνισης της τρημματικής διάβρωσης που αναπτύχθηκε στο υλικό, και επεξηγούν την σημαντική διαφορά μεταξύ του μέσου και του μέγιστου βάθους των τρημμάτων. Στις περιπτώςσεις όπου παρουσιάστηκε αποφλοίωση, λόγω της μικρής πυκνότητας των περιοχών αποφλούωσης, αλλά και της μικρής διαφοράς μεταξύ της τιμής του μέσου και του μέγιστου βάθους των περιοχών αποφλοίωσης, δεν κρίθηκε αναγκαία η πραγματοποίηση κατανομών. Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση εύναι ότι η ανάπτυξη της διάβρωσης αποφλοίωσης φαίνεται να καθυστερεί σημαντικά με την ύπαρξη της ανοδίωσης[22], [23], [24], [25], [26].

Για το κράμα αλουμινίου 7075, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής b και ακόμα λιγότερες e, σχήματα της μορφής a και c είναι από λίγα έως μέτρια)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής b και e, σχήματα της μορφής a και c εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και πάρα πολλά εμφανίζουν τη μορφή d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b, και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)

- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής f και e, σχήματα της μορφής a και b εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και f, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής d και e εμφανίζονται μέτρια)

#### 6.5 AL-TiC 0,7% VOL

Στο Al-TiC 0,7 % vol και για τους χρόνους έκθεσης σε οξύ 2, 4, 8, 12, 16 και 24 ωρών παρατηρείται διάβρωση στην επιφάνεια η οποία θα δοθεί παρακάτω σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων[19], [20].

Πίνακας 6.5.1 – Διάγραμμα 6.5.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλούωσης.

Χρόνος (ώρες)	έκθεσης	Μέσο βάθος (μm)	Μέση διάμετρος (μm)
2		15	20
4		20	40
8		27	85
12		53	100
16		190	900
24		220	1220



Πίνακας 6.5.2 – Διάγραμμα 6.5.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Μέσο βάθος 10 βαθύτερων τρημμάτων (μm)	Μέση διάμετρος 10 βαθύτερων τρημμάτων (μm)
2	40	40
4	60	65
8	150	155
12	210	500
16	220	1150
24	265	1600



Πίνακας 6.5.3 – Διάγραμμα 6.5.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Τρήμματα / 100 mm²	Περιοχές αποφλοίωσης / 100 mm <sup>2</sup>
2	75	
4	115	
8	160	
12	270	
16		3
24		7





Εικόνες 6.5.1 – 6.5.2: Έκθεση Al-TiC 0,7 % vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.5.3 – 6.5.4: Έκθεση Al-TiC 0,7 % vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.5.5 – 6.5.6: Έκθεση Al-TiC 0,7 % vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.5.7: Διαβρωμένη επιφάνεια Al-TiC 0,7 % vol μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.5.8 – 6.5.9: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-TiC 0,7 % vol μετά την έκθεση σε οξύ 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.5.10 – 6.5.11: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-TiC 0,7 % vol μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.5.12 – 6.5.13: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-TiC 0,7 % vol μετά την έκθεση σε οξύ 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.5.14: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-TiC 0,7% vol μετά την έκθεση σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)

# 6.5.1 $\Sigma YM\Pi EPA\Sigma MATA FIA TA \Sigma YN\Theta ETA AL-TIC 0,7 % VOL$

Με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Όταν το υλικό εκτέθηκε για 12 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε όμως ιδιαίτερη αύξηση της διαμέτρου των τρημμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την συνένωση τους. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η πυκνότητα των τρημμάτων.

- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.
- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της διάβρωσης μετά από 16 και 24 ώρες έκθεσης. Η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Γενικότερα για το κράμα AL TiC 0,7% vol παρατηρούμε αρκετές οπές με σχετικά μικρό βάθος και διάμετρο

Όπως παρατηρείται από τις κατανομές, σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ρηχών τρημμάτων υπερτερεί των βαθύτερων. Επιπλέον, ο αριθμός των βαθύτερων τρημμάτων αυξάνεται με τον χρόνο έκθεσης, τη στιγμή που τα πιο ρηχά τρήμματα λιγοστεύουν, ενώ η διάμετρος είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη του βάθους των τρημμάτων. Οι κατανομές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε μια προσπάθεια πλήρους απεικόνισης της τρημματικής διάβρωσης που αναπτύχθηκε στο υλικό, και επεξηγούν την σημαντική διαφορά μεταξύ του μέσου και του μέγιστου βάθους των τρημμάτων. Στις περιπτώςσεις όπου παρουσιάστηκε αποφλοίωση, λόγω της μικρής πυκνότητας των περιοχών αποφλούωσης, αλλά και της μικρής διαφοράς μεταξύ της τιμής του μέσου και του μέγιστου βάθους των κρίθηκε αναγκαία η πραγματοποίηση κατανομών. Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση εύναι ότι η ανάπτυξη της διάβρωσης αποφλοίωσης φαίνεται να καθυστερεί σημαντικά με την ύπαρξη της ανοδίωσης[22], [23], [24], [25], [26].

Για το Al-TiC 0,7 % vol, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

 Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)

- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)

### 6.6 AL-TIC 1 % VOL

Στο Al-TiC 1% vol και για τους χρόνους έκθεσης σε οξύ 2, 4, 8, 12, 16 και 24 ωρών παρατηρείται διάβρωση στην επιφάνεια η οποία θα δοθεί παρακάτω σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων[19], [20].

Πίνακας 6.6.1 – Διάγραμμα 6.6.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλούωσης.

Χρόνος	έκθεσης	Μέσο βάθος (μm)	Μέση	διάμετρος
(ώρες)			(µm)	
2		30	40	
4		35	58	
8		48	100	
12		65	117	
16		220	920	
24		250	1260	



Πίνακας 6.6.2 – Διάγραμμα 6.6.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Μέσο βάθος 10 βαθύτερων τρημμάτων (μm)	Μέση διάμετρος 10 βαθύτερων τρημμάτων (μm)
2	60	60
4	75	85
8	168	180
12	233	520
16	240	1165
24	290	1620



Πίνακας 6.6.3 – Διάγραμμα 6.6.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης	Τρήμματα / 100	Περιοχές
(ώρες)	mm <sup>2</sup>	αποφλοίωσης / 100
		mm <sup>2</sup>
2	65	
4	100	
8	140	
12	255	
16		2
24		5





Εικόνες 6.6.1 – 6.6.2: Έκθεση Al-TiC 1% vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.6.3 – 6.6.4: Έκθεση Al-TiC 1% vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.6.5 – 6.6.6: Έκθεση Al-TiC 1% vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.6.7: Διαβρωμένη επιφάνεια Al-TiC 1% vol μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεναι σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.6.8 – 6.6.9: Έκθεση Al –TiC 1 % vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.6.10 – 6.6.11: Έκθεση Al –TiC 1 %vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.6.12 – 6.6.13: Έκθεση Al –TiC 1 % vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.6.14: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-TiC 1% vol μετά την έκθεση σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)

# 6.6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ AL-TIC 1 % VOL

Με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Όταν το υλικό εκτέθηκε για 12 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε όμως ιδιαίτερη

αύξηση της διαμέτρου των τρημμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την συνένωση τους. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η πυκνότητα των τρημμάτων.

- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.
- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της διάβρωσης μετά από 16 και 24 ώρες έκθεσης. Η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Σε σχέση με το κράμα AL-TiC 0,7% vol παρατηρώ ότι στο κράμα αλουμινίου Al-TiC 1% vol μειώνεται η πυκνότητα των οπών αλλά αυξάνεται ο βάθος και η διάμετρός τους.

Όπως παρατηρείται από τις κατανομές, σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ρηχών τρημμάτων υπερτερεί των βαθύτερων. Επιπλέον, ο αριθμός των βαθύτερων τρημμάτων αυξάνεται με τον χρόνο έκθεσης, τη στιγμή που τα πιο ρηχά τρήμματα λιγοστεύουν, ενώ η διάμετρος είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη του βάθους των τρημμάτων. Οι κατανομές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε μια προσπάθεια πλήρους απεικόνισης της τρημματικής διάβρωσης που αναπτύχθηκε στο υλικό, και επεξηγούν την σημαντική διαφορά μεταξύ του μέσου και του μέγιστου βάθους των τρημμάτων. Στις περιπτώςσεις όπου παρουσιάστηκε αποφλοίωση, λόγω της μικρής πυκνότητας των περιοχών αποφλούωσης, αλλά και της μικρής διαφοράς μεταξύ της τιμής του μέσου και του μέγιστου βάθους των περιοχών αποφλοίωσης, δεν κρίθηκε αναγκαία η πραγματοποίηση κατανομών. Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση εύναι ότι η ανάπτυξη της διάβρωσης αποφλοίωσης φαίνεται να καθυστερεί σημαντικά με την ύπαρξη της ανοδίωσης[22], [23], [24], [25], [26].

Για το Al-TiC 1 % vol, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

 Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)

- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)

#### 6.7 AL-WC 0,5 % VOL

Στο Al-WC 0,5 % vol και για τους χρόνους έκθεσης σε οξύ 2, 4, 8, 12, 16 και 24 ωρών παρατηρείται διάβρωση στην επιφάνεια η οποία θα δοθεί παρακάτω σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων [21].

Πίνακας 6.7.1 – Διάγραμμα 6.7.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος	έκθεσης	Μέσο βάθος (μm)	Μέση διάμετρος
(ώρες)			(µm)
2		35	45
4		42	65
8		53	105
12		70	125
16		230	930
24		265	1280



Πίνακας 6.7.2 – Διάγραμμα 6.7.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Μέσο βάθος 10 βαθύτερων τρημμάτων (μm)	Μέση διάμετρος 10 βαθύτερων τρημμάτων (μm)
2	70	65
4	100	90
8	180	185
12	250	530
16	270	1180
24	320	1630


Πίνακας 6.7.3 – Διάγραμμα 6.7.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Τρήμματα / 100 mm <sup>2</sup>	Περιοχές αποφλοίωσης / 100 mm <sup>2</sup>
2	55	
4	90	
8	130	
12	235	
16		2
24		4



Εικόνες 6.7.1 – 6.7.2: Έκθεση Al-WC 0,5 % vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.7.3 – 6.7.4: Έκθεση Al-WC 0,5 % vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.7.5 – 6.7.6: Έκθεση Al-WC 0,5 % vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.7.7: Διαβρωμένη επιφάνεια Al-WC 0,5 % vol μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.7.8 – 6.7.9: Έκθεση Al-WC 0,5 % vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.7.10 – 6.7.11: Έκθεση Al-WC 0,5 % vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνες 6.7.12 – 6.7.13: Έκθεση Al-WC 0,5 % vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)



Εικόνα 6.7.14.: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-WC 0,5 % vol μετά την έκθεση σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)

# 6.7.1 $\Sigma YM\Pi EPA\Sigma MATA FIA TO \Sigma YNOETO AL-WC 0,5 % VOL$

Με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Όταν το υλικό εκτέθηκε για 12 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε όμως ιδιαίτερη

αύξηση της διαμέτρου των τρημμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την συνένωση τους. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η πυκνότητα των τρημμάτων.

- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.
- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της διάβρωσης μετά από 16 και 24 ώρες έκθεσης. Η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Σε σχέση με το σύνθετο AL-TiC 1 % vol παρατηρώ ότι στο κράμα αλουμινίου Al-WC 0,5% vol μειώνεται η πυκνότητα των οπών αλλά αυξάνεται ο βάθος και η διάμετρός τους.

Όπως παρατηρείται από τις κατανομές, σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ρηχών τρημμάτων υπερτερεί των βαθύτερων. Επιπλέον, ο αριθμός των βαθύτερων τρημμάτων αυξάνεται με τον χρόνο έκθεσης, τη στιγμή που τα πιο ρηχά τρήμματα λιγοστεύουν, ενώ η διάμετρος είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη του βάθους των τρημμάτων. Οι κατανομές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε μια προσπάθεια πλήρους απεικόνισης της τρημματικής διάβρωσης που αναπτύχθηκε στο υλικό, και επεξηγούν την σημαντική διαφορά μεταξύ του μέσου και του μέγιστου βάθους των τρημμάτων. Στις περιπτώςσεις όπου παρουσιάστηκε αποφλοίωση, λόγω της μικρής πυκνότητας των περιοχών αποφλούωσης, αλλά και της μικρής διαφοράς μεταξύ της τιμής του μέσου και του μέγιστου βάθους των κρίθηκε αναγκαία η πραγματοποίηση κατανομών. Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση εύναι ότι η ανάπτυξη της διάβρωσης αποφλοίωσης φαίνεται να καθυστερεί σημαντικά με την ύπαρξη της ανοδίωσης[22], [23], [24], [25], [26].

Για το Al-WC 0,5 % vol, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίχονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίχονται μέτρια)

#### 6.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



Διάγραμμα 6.8.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) και το μέσο βάθος των οπών που προκύπτουν από τη διάβρωση

Από το διάγραμμα 6.8.1 παρατηρώ ότι το μέσο βάθος των τρημμάτων μετά από 24 ώρες έκθεσης κατά αύξοντα αριθμό για τα υλικά που εξετάζω εμφανίζει την εξής σειρά: Al-TiC 0,7% vol, Al 2024, Al-TiC 1% vol, Al 7075, Al-WC 0,5% vol



Διάγραμμα 6.8.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) και τη μέση διάμετρο των οπών που προκύπτουν από τη διάβρωση

Από το διάγραμμα 6.8.2 παρατηρώ ότι η μέση διάμετρος των τρημμάτων μετά από 24 ώρες έκθεσης κατά αύξοντα αριθμό για τα υλικά που εξετάζω εμφανίζει την εξής σειρά: Al-TiC 0,7% vol, Al 2024, Al-TiC 1% vol, Al 7075, Al-WC 0,5% vol



Διάγραμμα 6.8.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) και το μέσο βάθος των 10 βαθύτερων τρημμάτων που προκύπτουν από τη διάβρωση

Από το διάγραμμα 6.8.3 παρατηρώ ότι το μέσο βάθος των 10 βαθύτερων τρημμάτων μετά από 24 ώρες έκθεσης κατά αύξοντα αριθμό για τα υλικά που εξετάζω εμφανίζει την εξής σειρά: Al-TiC 0,7% vol, Al 2024, Al-TiC 1% vol, Al 7075, Al-WC 0,5% vol



Διάγραμμα 6.8.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) και τη μέση διάμετρο των 10 βαθύτερων τρημμάτων που προκύπτουν από τη διάβρωση

Από το διάγραμμα 6.8.4 παρατηρώ ότι η μέση διάμετρος των 10 βαθύτερων τρημμάτων μετά από 24 ώρες έκθεσης κατά αύξοντα αριθμό για τα υλικά που εξετάζω εμφανίζει την εξής σειρά: Al-TiC 0,7% vol, Al 2024, Al-TiC 1% vol, Al 7075, Al-WC 0,5% vol



Διάγραμμα 6.8.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) και τον αριθμό των τρημμάτων / 100 mm<sup>2</sup> που προκύπτουν από τη διάβρωση

Από το διάγραμμα 6.8.5 παρατηρώ ότι η πυκνότητα των τρημμάτων κατά αύξοντα αριθμό για τα υλικά που εξετάζω εμφανίζει την εξής σειρά: Al-WC 0,5% vol, Al-TiC 1% vol, Al-TiC 0,7% vol, , Al 7075, Al 2024



Διάγραμμα 6.8.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) και των περιοχών αποφλοίωσης που προκύπτουν από τη διάβρωση

Από το διάγραμμα 6.8.5 παρατηρώ ότι οι περιοχές αποφλοίωσης κατά αύξοντα αριθμό για τα υλικά που εξετάζω εμφανίζει την εξής σειρά: Al-WC 0,5% vol, Al-TiC 1% vol, Al-TiC 0,7% vol, , Al 7075, Al 2024

## 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΛΩΣΗΣ

#### ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

# 7.1 ΕΙΣΑΓΩΣΗ

Οι μέθοδοι επιταχυνόμενης διάβρωσης έχουν διαδοθεί ιδιαιτέρως τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ταχύτητας διεξαγωγής των πειραμάτων και της απλότητας τους. Πιο συγκεκριμένα η ποτενσιοδυναμική πόλωση (βολταμετρία) και οι ποτενσιοστατικές μετρήσεις (χρονοαμπερομετρία) έχουν καθιερωθεί τα τελευταία 50 χρόνια σαν τις απλούστερες τεχνικές αξιολόγησης της συμπεριφοράς σε διάβρωσης μετάλλωνκραμάτων. Η συνδεσμολογία που γρησιμοποιείται περιλαμβάνει έναν γαλβανοστάτη/ποτενσιοστατη, ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode), ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο (auxiliary electrode), ένα ηλεκτρόδιο εργασίας (work electrode: το ηλεκτρόδιο αυτό είναι το μέταλλο/κράμα που πρόκειται να αξιολογηθεί) καθώς και ένα δοχείο που περιλαμβάνει τον ηλεκτρολύτη που προσομοιάζει το περιβάλλον διάβρωσης. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιείται είναι του χλωριούχου αργύρου (AgCl) ενώ το βοηθητικό ηλεκτρόδιο είναι από πλατίνα (Pt). Όσον αφορά τους ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται ένα πλήθος όπως υδατικό διάλυμα 3,5% NaCl που προσομοιάζει το θαλασσινό περιβάλλον, θεϊκό οξύ (H2SO4), υδρογλωρικό οξύ (HCl), νιτρικό οξύ (HNO<sub>3</sub>), καυστικό νάτριο (NaOH). Όσον αφορά το μέταλλο/κραμα που πρόκειται να αξιολογηθεί αυτό θα πρέπει να έχει επιφάνεια τουλάγιστον 1 cm2. Η επιφάνεια του λειαίνεται με λειαντικό γαρτί 1000 grit για περίπου 5 λεπτά ώστε να αφαιρεθούν οι ατέλειες ενώ σε κάποιες περιπτώσεις ακολουθεί και στίλβωση της επιφάνειας που πρόκειται να εκτεθεί. Το πίσω μέρος του δείγματος συνδέεται με καλώδιο είτε με καλάι (Pb-Sn) είτε με ταινία και στην συνεχεία μετράται η αντίσταση ανάμεσα στην επιφάνεια προς έκθεση και στην ελεύθερη μεριά του καλωδίου. Έπεται κάλυψη του δείγματος με μονωτικό Teflon έτσι ώστε να μείνει εκτεθειμένη μόνο η επιφάνεια που έχει λειανθεί[45].



Εικόνα 7.1.1: Γαλβανοστάτης/ποτενσιοστάτης GillAc της ACM instruments



Εικόνα 7.1.2: Ηλεκτρόδιο αναφοράς χλωριούχου αργύρου (AgCl) [45]



Εικόνα 7.1.3: Βοηθητικό ηλεκτρόδιο πλατίνας (Pt) [45]



Εικόνα 7.1.4: Ηλεκτρόδια εμβαπτισμένα σε χλωριούχο κάλιο



Εικόνα 7.1.5: Συνδεσμολογία ποτενσιοδυναμικής/ποτενσιοστατικής πόλωσης

# 7.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

Το πείραμα της ποτενσιοδυναμικης πόλωσης ξεκινάει με το στάδιο της ισορροπίας ή του ανοιχτού κυκλώματος. Σε αυτό το στάδιο το δείγμα μένει εκτιθέμενο στον ηλεκτρολύτη για ένα χρονικό διάστημα (Συνήθως 4~24 ώρες) κατά την διάρκεια του οποίου υπολογίζεται το δυναμικό του σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Η επιλογή του διαστήματος έκθεσης έχει να κάνει με την ανάγκη σταθεροποίησης του δυναμικού εντός ενός εύρους 5~10 mV. Στο τέλος αυτού του σταδίου, το σταθεροποιημένο δυναμικό λέγεται δυναμικό ανοιγτού κυκλώματος (Eocp). Στην συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της πόλωσης όπου το δείγμα πολώνεται εντός ενός εύρους δυναμικού σε σχέση με το δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος. Ένα σύνηθες εύρος είναι από -1000 mV σε σχέση με το δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος έως και +1500 mV. Η διαδικασία που περιγράφηκε είναι αυτόματη και γίνεται μεσώ του λογισμικού που είναι εγκατεστημένο στον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με τον ποτενσιοστάτη. Οι μόνες παράμετροι που εισάγει ο χρηστής στο λογισμικό πριν της διεξαγωγή ενός πειράματος είναι η διάρκεια της ισορροπίας καθώς και το εύρος δυναμικού. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα καλό είναι να χρησιμοποιούνται παρόμοιες συνθήκες σε όλα τα πειράματα[45].

316L-3,5%NaCI-1



Διάγραμμα 7.2.1: Κυκλική ποτενσιοδυναμική πόλωση ανοξείδωτου χάλυβα 316L σε υδατικό διάλυμα 3,5% NaCl. Τα βέλη δείχνουν την πορεία του διαγράμματος[45]



316L-3,5%NaCI-1

Διάγραμμα 7.2.2: Ορθή ποτενσιοδυναμική πόλωση ανοξείδωτου χάλυβα 316L σε υδατικό διάλυμα 3,5% NaCl. Άνωθεν της κόκκινης γραμμής είναι το ανοδικό μέρος της πόλωσης και κάτωθεν το καθοδικό μέρος[45]

316L-3,5%NaCI-1



Διάγραμμα 7.2.3: Κυκλική ποτενσιοδυναμική πόλωση ανοξείδωτου χάλυβα 316L σε υδατικό διάλυμα 3,5% NaCl. Με την μαύρη καμπύλη απεικονίζεται η ορθή πόλωση και με το κόκκινο η ανάστροφη πόλωση. Επίσης απεικονίζονται το δυναμικό διάβρωσης (Ecorr), δυναμικό διάβρωσης ανατροφής πόλωσης (Ecorr,rev) [45]

Στο διάγραμμα 8.1 απεικονίζεται η καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του ανοξείδωτου γάλυβα 316L σε υδατικό διάλυμα 3,5% NaCl. Όπως και σε όλες τις καμπύλες ποτενσιοδυναμικής πόλωσης ο άξονας των Χ αντιστοιχεί στην πυκνότητα ρεύματος (mA/cm2) ενώ ο άξονας των Ψ στο δυναμικό (mV vs AgCl). Στα διαγράμματα 2,3 φαίνονται το ορθό και το ανάστροφο τμήμα της καμπύλης ποτενσιοδυναμικής πόλωσης καθώς και το ανοδικό τμήμα και το καθοδικό. Από το δυναμικό διάβρωσης (Ecorr) και κάτω το δείγμα προς διάβρωση αποτελεί την κάθοδο και άρα ανάγεται ενώ από το δυναμικό διάβρωσης και πάνω το δείγμα αποτελεί την άνοδο και διαβρώνεται. Το ανοδικό κομμάτι της ορθής πόλωσης μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες όσον αφορά τον μηγανισμό διάβρωσης που λαμβάνει χώρα καθώς το δυναμικό αυξάνεται. Έτσι είναι πιθανό να παρατηρούνται περιοχές ενεργής διάβρωσης (Μικρή αύξηση του δυναμικού οδηγεί σε πολύ μεγάλη αύξηση της πυκνότητας ρεύματος) καθώς και παθητικές/ψευδοπαθητικές περιοχές (Περιοχές όπου με την αύξηση του δυναμικού ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας ρεύματος μειώνεται ή σταθεροποιείται ενώ είναι δυνατόν η πυκνότητα ρεύματος να μειώνεται). Οι παθητικές/ψευδοπαθητικές περιοχές συνήθως σχετίζονται με τον σχηματισμό σχετικά σταθερών προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια του δείγματος που εμποδίζουν τον ηλεκτρολύτη να διεισδύσει[45].



Διάγραμμα 7.2.4: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al-7%Co σε διάλυμα 3,5% NaCl. Διακρίνονται οι ενεργές περιοχές διάβρωσης και η παθητική/ψεδοπαθητική περιοχή[45]

Οι καμπύλες κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης μπορούν να δώσουν αρκετές πληροφορίες σχετικά με την αντίσταση που επιδεικνύει ένα μέταλλο/κράμα στην τοπική διάβρωση. Όταν το κομμάτι της καμπύλης που αντιστοιχεί στην ανάστροφη πόλωση αντιστοιχεί σε μικρότερες τιμές πυκνότητας ρεύματος σε σχέση με την ορθή για τα ίδια δυναμικά τότε το κράμα θεωρείται ότι δεν είναι επιδεκτικό σε διάβρωση οπών (Όταν δηλαδή η ανάστροφη πόλωση «γυρίζει» από τα αριστερά της ορθής πόλωσης). Όσο πιο αριστερά είναι η ανάστροφη πόλωση σε σχέση με την ορθή άρα όσο πιο ευμεγέθης είναι ο βρόγχος υστέρησης που δημιουργείται ανάμεσα στις δυο καμπύλες τόσο πιο υψηλή είναι η αντίσταση του μετάλλου/κράματος σε τοπικές μορφές διάβρωσης. Ομοίως όταν ο βρόγχος υστέρησης ανάμεσα στην ορθή και την ανάστροφη πόλωση είναι αρνητικός (Δηλαδή η ανάστροφη πόλωση «γυρνάει» από τα δεξιά) τότε το κράμα είναι επιδεκτικό σε διάβρωση οπών και όσο πιο μεγάλος είναι αυτός ο βρόγχος τόσο χειρότερη είναι η συμπεριφορά του κράματος στην τοπική διάβρωση. Πολύ συχνά στο ίδιο κράμα συνυπάρχουν και θετικοί και αρνητικοί βρόγχοι υστέρησης, σε αυτή την περίπτωση πρέπει να λαμβάνεται υπ`όψιν το μέγεθος τους. Ένα επιπλέον σημαντικό κριτήριο είναι αν το δυναμικό διάβρωσης της ανάστροφης πόλωσης (Ecorr, rev) είναι πιο ευγενές (Εχει μεγαλύτερο δυναμικό) σε σχέση με το δυναμικό διάβρωσης της ορθής (Ecorr). Αν ισχύει κάτι τέτοιο, αποδεικνύεται ότι τα προϊόντα διάβρωσης που δημιουργούνται στην επιφάνεια του κράματος κατά την αναστροφή πόλωση είναι πιο ευγενή σε σχέση με εκείνα που δημιουργήθηκαν κατά την ορθή και συμπεραίνεται ότι το μέταλλο/κράμα έχει χαμηλή επιδεκτικότητα σε διάβρωση οπών[45].

AI-7%Co-Cast-3,5%NaCl



Διάγραμμα 7.2.5: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al-7%Co σε διάλυμα 3,5% NaCl. Διακρίνεται η ταυτόχρονη ύπαρξη θετικού και αρνητικού βρόγχου υστέρησης ενώ το δυναμικό διάβρωσης της ανάστροφης πόλωσης είναι πιο ευγενές σε σχέση με εκείνο της ορθής πόλωσης[45].

Στις καμπύλες ποτενσιοδυναμικής πόλωσης αντιστοιχούν κάποιες σημαντικές ηλεκτροχημικές τιμές όπως είναι το δυναμικό διάβρωσης (Ecorr) που δείχνει την θερμοδυναμική τάση για διάβρωση, το δυναμικό διάβρωσης της ανάστροφης πόλωσης (Ecorr,rev) που συσχετιζόμενο με το δυναμικό διάβρωσης μας δίνει πληροφορίες για το πόσο ευγενή είναι τα προϊόντα που σχηματίζονται στην επιφάνεια του κράματος. Επιπρόσθετα το Ecp είναι το δυναμικό που αντιστοιχεί στην έναρξη μιας περιοχής που η πυκνότητα ρεύματος είτε σταθεροποιείται είτε μειώνεται και το δυναμικό αποκοπής (Eb) στο δυναμικό στο οποίο η περιοχή αυτή τελειώνει και παρατηρείται ξανά αύξηση της πυκνότητας ρεύματος. Τέλος από τις καμπύλες ποτενσιοδυναμικής πόλωσης είναι δυνατόν να υπολογιστεί μέσω της τεχνικής της προέκτασης Τάφελ και η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης (icorr) που μας πληροφορεί σχετικά με την κινητική της διάβρωσης[45].

# 7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

Πολύ συχνά για να συγκριθεί η αντίσταση σε διάβρωση διαφορετικών κραμάτων οι καμπύλες ποτενσιοδυναμικής πόλωσης τους τοποθετούνται σε ένα διάγραμμα. Είναι σημαντικό να έχουν επιλέγει οι ίδιες συνθήκες διάβρωσης ώστε τα συμπεράσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό που λαμβάνεται υπ`όψιν κατά την σύγκριση είναι το δυναμικό διάβρωσης των μετάλλων/κραμάτων που συγκρίνονται. Το δοκίμιο με το υψηλότερο δυναμικό διάβρωσης έχει τη χαμηλότερη θερμοδυναμική τάση να διαβρωθεί σε σχέση με τα αλλά. Όσον αφορά την κινητική της διάβρωσης, το μέταλλο/κράμα του οποίου η καμπύλη αντιστοιχεί στις μικρότερες πυκνότητες ρεύματος (Είναι πιο αριστερά)

παρουσιάζει την βραδύτερη κινητική της διάβρωσης (Διαβρώνεται πιο αργά). Επομένως από τα άνωθεν συμπεραίνεται ότι το δείγμα με την καλύτερη συμπεριφορά θα αντιστοιχεί στην καμπύλη εκείνη που βρίσκεται πιο «ψηλά» και πιο «αριστερά» σε σχέση με τις άλλες καμπύλες[45].

Από την σύγκριση των καμπυλών κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης είναι δυνατόν να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με το ποιο μέταλλο/κράμα από τα συγκρινόμενα επιδεικνύει την υψηλότερη αντίσταση σε τοπικές μορφές διάβρωσης. Αυτό γίνεται λαμβάνοντας υπ`όψιν πιο απ`όλα τα δείγματα έχει τους μεγαλύτερους θετικούς βρόγχους υστέρησης καθώς και σε ποιο το δυναμικό διάβρωσης της ανάστροφης πόλωσης είναι πιο ψηλά σε σχέση με το δυναμικό διάβρωσης της ορθής.

# 7.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια Al 1050 προετοιμάστηκαν για διάβρωση, σύμφωνα με τις συνθήκες μεταλλογραφικής προετοιμασίας. Στη συνέχεια, αφού πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση των δοκιμίων με ένα μερικώς απογυμνωμένο καλώδιο χρησιμοποιώντας ως συγκολλητικό μέσο καλάι (PbSn) στην επίπεδη πλευρά του κάθε δοκιμίου η οποία δεν είχε υποστεί λείανση και στίλβωση, [19], [21], [27], [41], [42], [43], [44], [45] ακολούθησε διαδικασία μέτρησης του δυναμικού του δοκιμίου με το ,ερικώς απογυμνωμένο καλώδιο ώστε να ελεγχθεί η αντίσταση μεταξύ τους. Σκοπός της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση, ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ροή ηλεκτρονίων για να πραγματοποιηθεί η διάβρωση. Αυτή είναι μία καλή μέθοδος με την οποία ελέγχεται και το κατά πόσο καλά πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση του δοκιμίου με το απογυμνωμένο καλώδιο. Τέλος τα δοκίμια περιτυλίγονται με ταινία Teflon έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αδιαβροχοποίηση τους από το υδατικό περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει όλα τα σημεία του δοκιμίου, εκτός από την επιφάνεια της διάβρωσης (-1cm<sup>2</sup>) η οποία πρέπει να μείνει ακάλυπτη.



Εικόνα 7.4.1: Λειαμένη επιφάνεια δοκιμίου η οποία θα εκτεθεί στο οξύ (χρησιμοποιήθηκαν 500 ml απιονισμένου νερού, στα οποία διαλύθηκαν 22 ml HCl, κατόπιν μετρήθηκε το pH του παρασκευασμένου διαλύματος το οποίο ήταν ίσο με 0,3 ενώ η συγκέντρωση του διαλύματος εμφάνιζε την τιμή των 0,5 M)



Εικόνα 7.4.2: Δομή λειαμένης επιφάνειας δοκιμίου με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου (χρησιμοποιήθηκαν 500 ml απιονισμένου νερού, στα οποία διαλύθηκαν 22 ml HCl, κατόπιν μετρήθηκε το pH του παρασκευασμένου διαλύματος το οποίο ήταν ίσο με 0,3 ενώ η συγκέντρωση του διαλύματος εμφάνιζε την τιμή των 0,5 M)



Εικόνα 7.4.3: Προετοιμασία δοκιμίου ώστε να εκτεθεί στο οξύ (χρησιμοποιήθηκαν 500 ml απιονισμένου νερού, στα οποία διαλύθηκαν 22 ml HCl, κατόπιν μετρήθηκε το pH του παρασκευασμένου διαλύματος το οποίο ήταν ίσο με 0,3 ενώ η συγκέντρωση του διαλύματος εμφάνιζε την τιμή των 0,5 M)

# 7.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Χρησιμοποιήθηκαν 500 ml απιονισμένου νερού, στα οποία διαλύθηκαν 22 ml HCl. Κατόπιν μετρήθηκε το pH του παρασκευασμένου διαλύματος το οποίο ήταν ίσο με 0,3 ενώ η συγκέντρωση του διαλύματος εμφάνιζε την τιμή των 0,5 M.



Εικόνα 7.5: Υδροχλωρικό οξύ

# 7.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Μετά την παρασκευή του διαλύματος διάβρωσης, ακολούθησε η εισαγωγή του κάθε προς εξέταση δοκιμίου στο διάλυμα (διαβρωτικό περιβάλλον) και έπειτα πραγματοποιήθηκε η συνδεσμολογία του ηλεκτροδίου αναφοράς (Ag/AgCl), και του βοηθητικού ηλεκτροδίου σύνδεσης Pt, καθώς επίσης και του δοκιμίου, στον γαλβανοστάτη GiIIAC-ACM Instruments. Οι συνθήκες της διάβρωσης ρυθμίστηκαν με τη βοήθεια του κατάλληλου λογισμικού προγράμματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με τον γαλβανοστάτη. Οι συνθήκες με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι διαβρώσεις ήταν οι εξής: 2 ώρες ηρεμία μέσα στον ηλεκτρολύτη, για τη σταθεροποίηση του δυναμικού διάβρωσης. Στο διάστημα αυτό, καταγράφεται το δυναμικό σε συνάρτηση με τον χρόνο καθώς επίσης και η πυκνότητα ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. Τέλος, ακολούθησε η διαδικασία της κυκλικής πόλωσης αφού είχε ρυθμιστεί το αρχικό και το τελικό δυναμικό από -1000 mV έως +1000 mV σε σχέση με το δυναμικό ηρεμίας, με ρυθμό σάρωσης 10 Mv/min[19], [21], [45].



Εικόνα 7.6: Η συσκευή διάβρωσης (γαλβανοστάτης) και η συνολική διάταξη της διάβρωσης, καθώς επίσης και τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν για τη λειτουργία του ηλεκτροχημικού κελιού διάβρωσης

# 7.7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για το κράμα αλουμινίου 1050 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων της ποτενσιοδυναμικής πόλωσης, καθώς στα πειράματα αποφλοίωσης και στους χρόνους έκθεσης 2, 4, 8, 12, 16 και 24 ωρών τα δοκίμια κράματος αλουμινίου 1050 υπέστησαν ανοδική προστασία και ετσι δεν μπορούσαμε να παρατηρήσουμε τη διάβρωση της επιφάνειας με τη χρήση του μικροσκοπίου. Πιο συγκεκριμένα:

Από την παρατήρηση των καμπυλών προκύπτει ότι το αλουμίνιο 1050 είναι επιδεκτικό σε τοπικές μορφές διάβρωσης. Αυτό εξηγείται λόγω των αρνητικών βρόχων υστέρησης της ανοδικής πόλωσης (iforward<ireverse) ή πιο απλά με άλλα λόγια οι ανάστροφες καμπύλες αντιστοιχούν σε πιο μεγάλες τιμές ρεύματος από τις ορθές.

Παρόλα αυτά το μικρό εμβαδόν των βρόγχων υστέρησης δείχνει ελαφριά μόνο επιδεκτικότητα σε τοπική διάβρωση στο περιβάλλον 0,5 M HCl.

Επίσης παρατηρείται ότι η τιμή του δυναμικού της διάβρωσης της ορθής καμπύλης (E<sub>corr</sub>) εμφανίζει ελαφρά υψηλότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του δυναμικού της διάβρωσης της ανάστροφης καμπύλης ((E<sub>corr</sub>)rev)), το οποίο επιβεβαιώνει ότι το κράμα αλουμινίου 1050 εμφανίζει καλή αντίσταση στην τοπική διάβρωση.

Επιπλέον παρατηρούνται περιοχές ενεργής διάβρωσης (Μικρή αύξηση του δυναμικού οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της πυκνότητας ρεύματος) καθώς και περιοχές όπου με την αύξηση του δυναμικού ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας ρεύματος μειώνεται ή σταθεροποιείται ενώ είναι δυνατόν η πυκνότητα ρεύματος να μειώνεται. Οι τελευταίες αποδίδονται σε σχηματισμό προϊόντων διάβρωσης ή σε φαινόμενα μεταφοράς μάζας.

Σε γενικές γραμμές η κύρια μορφή διάβρωσης είναι η γενική με πιθανότητα σποραδικής εμφάνισης τοπικής διάβρωσης.

Παρακάτω θα δούμε τη σχηματική απεικόνιση αυτών των διαγραμμάτων (βλέπε κεφάλαιο 7.7.1 Πείραμα 1, κεφάλαιο 7.7.2 Πείραμα 2, κεφάλαιο 7.7.3 Πείραμα3)

# 7.7.1 ПЕІРАМА 1



Σχήμα 7.7.1: Διάγραμμα σταθεροποίησης δυναμικού (πείραμα 1)



Διάγραμμα 7.7.1.1: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al1050 (πείραμα 1, δεδομένα υπολογιστή), σε 0,5 M HCl



Διάγραμμα 7.7.1.2: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al1050 (πείραμα 1, δεδομένα excel), σε 0,5 M HCl

$$\begin{split} E_{corr} &= -700 \text{ mV} \\ E(_{corr})\text{rev} &= -720 \text{ mV} \end{split}$$

# 7.7.2 ПЕІРАМА 2



Σχήμα 7.7.2: Διάγραμμα σταθεροποίησης δυναμικού (πείραμα 2)



Διάγραμμα 7.7.2.1: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al1050 (πείραμα 2, δεδομένα υπολογιστή), σε 0,5 M HCl



Διάγραμμα 7.7.2.2: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al1050 (πείραμα 2, δεδομένα excel), σε 0,5 M HCl

$$\begin{split} E_{corr} &= -710 \text{ mV} \\ E(_{corr})\text{rev} &= -730 \text{ mV} \end{split}$$

## 7.7.3 ПЕІРАМА 3



Σχήμα 7.7.3: Διάγραμμα σταθεροποίησης δυναμικού (πείραμα 3)



Διάγραμμα 7.7.3.1: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al1050 (πείραμα 3, δεδομένα υπολογιστή), σε 0,5 M HCl



Διάγραμμα 7.7.3.2: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al1050 (πείραμα 3, δεδομένα excel), σε 0,5 M HCl

$$\begin{split} E_{corr} &= -705 \text{ mV} \\ E(_{corr})\text{rev} &= -715 \text{ mV} \end{split}$$

#### 7.7.4 ΣΥΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ



Διάγραμμα 7.7.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων πολώσεων 3 πειραμάτων, σε 0,5 M HCl

Από το πάνω διάγραμμα και την τοποθέτηση των αποτελεσμάτων των 3 πειραμάτων σε ένα κοινό διάγραμμα (3 ορθών και 3 ανάστροφων πολώσεων), παρατηρώ ότι τα αποτελέσματα μου συγκλίνουν.

# 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μεταλλογραφική ανάλυση της άνω επιφάνειας των δοκιμίων, έδειξε ότι η βλάβη διάβρωσης στους πρώτους χρόνους έκθεσης έχει την μορφή τρημμάτων, ενώ μετά την ανάπτυξη της περικρυσταλλικής προσβολής ξεκινά η διάβρωση αποφλοίωσης. Η βλάβη διάβρωσης γίνεται πιο έντονη με την πάροδο του χρόνου έκθεσης. Πιο συγκεκριμένα η βλάβη διάβρωσης στην άνω επιφάνεια των δοκιμίων, μετά από 2ώρες είναι ήπια τρημματική διάβρωση, 8ώρες είναι έντονη τρημματική διάβρωση, ενώ μετά από 16 ώρες και 24 ώρες έκθεσης ξεκινάει η διάβρωση αποφλοίωσης[10], [22], [23], [24], [25], [26].

Οι τομές που πραγματοποιήθηκαν στην άνω επιφάνεια, ανέδειξαν ότι το σχήμα των τρημμάτων ήταν γενικώς ακανόνιστο, αλλά παρατηρήθηκε ότι μετά από 8 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης τα βαθύτερα τρήμματα ήταν υποσκαμμένα. Η διάβρωση εξελίχθηκε από τρημματική σε αποφλοίωση σε χρόνο έκθεσης μεταξύ 12 και 16 ωρών στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε περικρυσταλλική προσβολή στο κάτω μέρος της βλάβης. Μετά από 24 ώρες έκθεσης η αποφλοίωση και η περικρυσταλλική προσβολή ήταν πιο έντονη.

Για όλες τις περιπτώσεις έκθεσης, μετρήθηκε το μέσο βάθος όλων των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης, το μέγιστο βάθος τους, η διάμετρος αλλά και η πυκνότητά τους.

Με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Όταν το υλικό εκτέθηκε για 12 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε όμως ιδιαίτερη αύξηση της διαμέτρου των τρημμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την συνένωση τους. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η πυκνότητα των τρημμάτων.
- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.

- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της διάβρωσης μετά από 16 και 24 ώρες έκθεσης. Η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.

Μια σημαντική παρατήρηση, αναφορικά με τις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε τρημματική διάβρωση, αποτελεί η μεγάλη διαφορά μεταξύ του μέσου βάθους όλων των τρημμάτων και των βαθύτερων. Προκειμένου να διερευνηθεί αυτό το φαινόμενο, υπολογίστηκαν οι κατανομές των τρημμάτων. Τα τρήμματα κατανεμήθηκαν ανάλογα με το βάθος τους και καταγράφηκε σε κάθε περίπτωση ο αριθμός τους. Επιπλέον, για κάθε τρήμμα δεδομένου του βάθους μετρήθηκε και η αντίστοιχη διάμετρος και καταγράφηκε η μέση τιμή της.

Όπως παρατηρείται από τις κατανομές, σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ρηχών τρημμάτων υπερτερεί των βαθύτερων. Επιπλέον, ο αριθμός των βαθύτερων τρημμάτων αυξάνεται με τον χρόνο έκθεσης, τη στιγμή που τα πιο ρηχά τρήμματα λιγοστεύουν, ενώ η διάμετρος είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη του βάθους των τρημμάτων. Οι κατανομές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε μια προσπάθεια πλήρους απεικόνισης της τρημματικής διάβρωσης που αναπτύχθηκε στο υλικό, και επεξηγούν την σημαντική διαφορά μεταξύ του μέσου και του μέγιστου βάθους των τρημμάτων. Στις περιπτώςσεις όπου παρουσιάστηκε αποφλοίωση, λόγω της μικρής πυκνότητας των περιοχών αποφλούωσης, αλλά και της μικρής διαφοράς μεταξύ της τιμής του μέσου και του μέγιστου βάθους των κρίθηκε αναγκαία η πραγματοποίηση κατανομών. Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση εύναι ότι η ανάπτυξη της διάβρωσης αποφλοίωσης φαίνεται να καθυστερεί σημαντικά με την ύπαρξη της ανοδίωσης[22], [23], [24], [25], [26].

**Στο κράμα αλουμινίου 1050** και για τους χρόνους έκθεσης σε οξύ 2, 4, 8, 12, 16, και 24 ωρών δεν παρατηρείται διάβρωση στην επιφάνεια καθώς το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία, έτσι δεν παρατηρώ κάτι στην άνω επιφάνεια.

**Για το κράμα αλουμινίου 1050**, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

 Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)

- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και πάρα πολλά εμφανίζουν τη μορφή d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b, και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής f και e, σχήματα της μορφής a και b εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και f, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής d και e εμφανίζονται μέτρια)

Όσο αφορά τις καμπύλες ποτενσιοδυναμικής πόλωσης για το κράμα αλουμίνιο 1050 παρατηρούμε ότι είναι ελαφρά επιδεκτικό σε τοπικές μορφές διάβρωσης σε διάλυμα 0,5 M HCl. Αυτό εξηγείται λόγω των αρνητικών βρόχων υστέρησης της ανοδικής πόλωσης (iforward<ireverse) ή πιο απλά με άλλα λόγια οι ανάστροφες καμπύλες αντιστοιχούν σε πιο μεγάλες τιμές ρεύματος από τις ορθές.

Η κύρια μορφή διάβρωσης στο περιβάλλον αυτό είναι η γενική.

**Για το κράμα αλουμινίου 2024** με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

 Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Στις 12 ώρες το κράμα έχει υποστεί ανοδική προστασία και δεν παρατηρείται κάτι στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου.
- Στις 16 ώρες το κράμα έχει υποστεί ανοδική προστασία και δεν παρατηρείται κάτι στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου.
- Στις 24 ώρες έκθεσης η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Γενικότερα στο κράμα αλουμινίου 2024 παρατηρούμε αρκετές οπές με σχετικά μεσσαίο βάθος και διάμετρο

**Για το κράμα αλουμινίου 2024**, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και πάρα πολλά εμφανίζουν τη μορφή d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b, και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)

- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής f και e, σχήματα της μορφής a και b εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και f, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής d και e εμφανίζονται μέτρια)

**Για το κράμα αλουμινίου 7075** με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα [28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Στις 12 ώρες το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία και δεν παρατηρώ κάτι στην άνω επιφάνεια.
- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.
- Στις 24 ώρες το κράμα μας έχει υποστεί ανοδική προστασία και δεν παρατηρώ κάτι στην άνω επιφάνεια.
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.

 Σε σχέση με το κράμα αλουμινίου 2024 παρατηρώ ότι στο κράμα αλουμινίου 7075 μειώνεται η πυκνότητα των οπών αλλά αυξάνεται ο βάθος και η διάμετρός τους.

**Για το κράμα αλουμινίου 7075**, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής b και ακόμα λιγότερες e, σχήματα της μορφής a και c είναι από λίγα έως μέτρια)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής b και e, σχήματα της μορφής a και c εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και πάρα πολλά εμφανίζουν τη μορφή d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b, και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής f και e, σχήματα της μορφής a και b εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και f, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής d και e εμφανίζονται μέτρια)

**Για τα σύνθετα Al-TiC 0,7%** vol με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

 Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.

- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Όταν το υλικό εκτέθηκε για 12 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε όμως ιδιαίτερη αύξηση της διαμέτρου των τρημμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την συνένωση τους. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η πυκνότητα των τρημμάτων.
- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.
- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της διάβρωσης μετά από 16 και 24 ώρες έκθεσης. Η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Γενικότερα για το κράμα AL TiC 0,7% vol παρατηρούμε αρκετές οπές με σχετικά μικρό βάθος και διάμετρο

**Για το Al-TiC 0,7 % vol**, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)

- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)

**Για τα σύνθετα Al-TiC 1% vol** με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Όταν το υλικό εκτέθηκε για 12 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε όμως ιδιαίτερη αύξηση της διαμέτρου των τρημμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την συνένωση τους. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η πυκνότητα των τρημμάτων.
- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει

αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.

- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της διάβρωσης μετά από 16 και 24 ώρες έκθεσης. Η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Σε σχέση με το κράμα AL-TiC 0,7% vol παρατηρώ ότι στο κράμα αλουμινίου Al-TiC 1% vol μειώνεται η πυκνότητα των οπών αλλά αυξάνεται ο βάθος και η διάμετρός τους.

**Για το Al-TiC 1 % vol**, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)

- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)

**Για το σύνθετο Al-WC 0,5%** vol με βάση την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βλάβης διάβρωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί η εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης από την έναρξη της με την μορφή τρημμάτων, έως και την ανάπτυξη της αποφλοίωσης. Πιο συγκεκριμένα[28]:

- Κατά την μετάβαση από 2 ώρες σε 4 ώρες έκθεσης, όπου η βλάβη διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως τρημματική, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας των τρημμάτων, αλλά και σημαντική αύξηση της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων. Το βάθος προσβολής δεν αυξάνεται σημαντικά, και γενικότερα παρατηρείται μια τάση για δημιουργία νέων τρημμάτων παρά για αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ήδη υπαρχόντων.
- Μετά από 8 ώρες έκθεσης, η διάμετρος αλλά και το βάθος των τρημμάτων αυξάνονται σημαντικά και φαίνεται ότι η διαβρωτική προσβολή εκτείνεται τόσο κατά το βάθος όσο και κατά την επιφάνεια του υλικού. Αντίθετα, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας των τρημμάτων έχει μειωθεί.
- Όταν το υλικό εκτέθηκε για 12 ώρες στο διάλυμα αποφλοίωσης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης αυξήθηκαν. Παρατηρήθηκε όμως ιδιαίτερη αύξηση της διαμέτρου των τρημμάτων, γεγονός που καταδεικνύει την συνένωση τους. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η πυκνότητα των τρημμάτων.
- Κατά την μετάβαση από 12 ώρες έκθεσης σε 16, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του μέσου βάθους προσβολής αλλά και της διαμέτρου των τρημμάτων. Πλέον, τα τρήμματα έχουν συνενωθεί γύρω από τα βαθύτερα, δημιουργώντας περιοχές αποφλοίωσης. Αυτό αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι δεν έχει αυξηθεί σημαντικά το μέγιστο βάθος προσβολής μεταξύ 12 και 16 ωρών έκθεσης.
- Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της διάβρωσης μετά από 16 και 24 ώρες έκθεσης. Η διάμετρος των περιοχών αποφλοίωσης αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την αύξηση του βάθους προσβολής. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο και το μέγιστο βάθος προσβολής στις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκε διάβρωση αποφλοίωσης δεν διαφέρουν σημαντικά[22].
- Η βλάβη διάβρωσης ξεκινά υπό μορφή τρημμάτων και εξελίσσεται σε αποφλοίωση μετά την ανάπτυξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.

- Το σχήμα των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης βρέθηκε να είναι ακανόνιστο.
- Σε σχέση με το κράμα AL-TiC 1 % vol παρατηρώ ότι στο κράμα αλουμινίου Al-WC 0,5% vol μειώνεται η πυκνότητα των οπών αλλά αυξάνεται ο βάθος και η διάμετρός τους.

**Για το Al-WC 0,5 % vol**, οι τομές ανέδειξαν το σχήμα των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 (βλέπε κεφάλαιο 6.1.1 σελ. 61):

- Για τις 2 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής e, σχήματα της μορφής a και b είναι από λίγα έως μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 4 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, και e (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και b, σχήματα της μορφής e εμφανίζονται μέτρια, ενώ οι μεγάλες οπές εμφανίζουν σχήμα της μορφής c)
- Για τις 8 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e, και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 12 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής c και αμέσως μετά της μορφής d, ελάχιστα είναι της μορφής a, b και e, ενώ σχήματα της μορφής f είναι από ελάχιστα έως κανένα)
- Για τις 16 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)
- Για τις 24 ώρες παρατηρούνται σχήματα τύπου a, b, c, d, e και f (η πλειοψηφία των σχημάτων είναι της μορφής d και b, ενώ ελάχιστα είναι της μορφής a και f, σχήματα της μορφής c και e εμφανίζονται μέτρια)

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των πειραμάτων αποφλοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1

#### Πίνακας 8.1: Συγκριτικός πίνακας δεδομένων αποφλοίωσης

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ
Μέσο βάθος οπών	Al-TiC 0,7%vol <al2024<al-tic 0,5%vol<="" 1%vol<al7075<al-wc="" td=""></al2024<al-tic>
Μέση διάμετοος οπών(πεοίπου	Al-TiC 0.7% vol <al2024<al-tic 0.5%="" 1%="" td="" vol<="" vol<al7075<al-wc=""></al2024<al-tic>
ίδια)	
Μέσο βάθος 10 βαθύτερων	Al-TiC 0,7%vol <al2024<al-tic 0,5%vol<="" 1%vol<al7075<al-wc="" td=""></al2024<al-tic>
τρημμάτων	
Μέση διάμετρος 10 βαθύτερων	Al-TiC 0,7%vol <al2024<al-tic 0,5%vol<="" 1%vol<al7075<al-wc="" td=""></al2024<al-tic>
τρημμάτων(περίπου ίδια)	
Αριθμός τρημμάτων/100 mm <sup>2</sup>	Al-WC 0,5%vol <al-tic 0,7%vol<al7075<al2024<="" 1%vol<al-tic="" td=""></al-tic>
Περιοχές αποφλοίωσης/100 mm <sup>2</sup>	Al-WC 0,5% vol <al-tic 0,7%="" 1%="" td="" vol<al-tic="" vol<al7075<al2024<=""></al-tic>

Από τον ανώτερω πίνακα φαίνεται η ανώτερη συμπεριφορά των σύνθετων Al-TiC, γεγονός που αποδεικνύει την ύπαρξη ισχυρών διεπιφανειών Al/TiC, Al/Al<sub>3</sub>Ti και Al/συστάδων (TiC+Al<sub>3</sub>Ti). Ένας άλλος λόγος για την ανώτερη αυτή συμπεριφορά, είναι οι χαμηλές τραχύτητες ιδίως για το Al-TiC 0,7% vol.

Το Al-WC παρουσιάζει χειρότερη συμπεριφορά από τα υπόλοιπα υλικά ως προς το βάθος και τη διάμετρο των οπών. Η συμπεριφορά αυτή κατ' αρχήν σχετίζεται με την μεγαλύτερη επιφανειακή τραχύτητα. Όμως, παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά ως προς την πυκνότητα των οπών και των περιοχών αποφλοίωσης. Ο συνδυασμός αυτός υποδυκνύει ότι κύριο ρόλο στη διάβρωση αποφλοίωσης παίζουν τα μεγάλα κατακριμνήσματα Al<sub>12</sub>W,τα οποία απαντώνται σποραδικά[46]. Λόγω μεγάλου μεγέθους προξενούν στο γειτονικό Al ισχυρή γαλβανική διάβρωση (μεγάλη κάθοδος – μικρή ανόδος), η οποία οδηγεί σε σχηματισμό οπών. Οι οπές αυτές είναι βαθιές και μεγάλης διαμέτρου υποδεικνύοντας αποκόλληση των σωματιδίων Al<sub>12</sub>W. Επειδή όμως τα σωματίδια αυτά απαντώνται σποραδικά, για αυτό το λόγο η πυκνότητα των περιοχών αποφλοίωσης και τρημμάτων είναι σχετικά μικρή. Τα σωματίδια αυτά πριν αποκολληθούν αποτελούν φυσικά εμπόδια στην πρόοδο της περικρυσταλλικής διάβρωσης, μέσω των ορίων κόκκων όπου έχουν κατακρημνιστεί ενδομεταλλικές Al-Fe-Si. Μετά την αποκόλληση η περικρυσταλλική διάβρωση προχωρά και εξελίσσεται σε διάβρωση αποφλοίωσης[47].

### <u>Βιβλιογραφία</u>

[1] Δωροθέα Δ. Σέτσικα. Διδακτορική διατριβή <<Πειραματική μελέτη και υπολογιστική προσομοίωση της επίδρασης της βλάβης διάβρωσης στη συμπεριφορά εφελκυσμού του αεροπορικού κράματος αλουμινίου 2024>>, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πάτρα (2015)

[2] Αγγελική Λεκάτου. Εισαγωγή στη διάβρωση και προστασία των μετάλλων, Εκδόσεις ΄΄Θεοδωρίδη'', Ιωάννινα (2010)

[3] Γκίκας Νικόλαος. Διπλωματική εργασία <<Ανάπτυξη νανοσύνθετων Al-WC και αξιολόγηση των επιφανειακών ιδιοτήτων τους>>, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Ιωάννινα (2014)

[4] Παπανικολάου Μαρία. Διπλωματική εργασία <<Ανάπτυξη και χαρακτηρισμός σύνθετων μήτρας Al με ενίσχυση νανοσωματιδίων TiC σε ποσοστά 1,5 και 2 % vol>>, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Ιωάννινα (2015)

[5] Σοφία Τσούλη. Μεταπτυχιακή διατριβή <<Μελέτη επιταχυνόμενης διάβρωσης οπλισμένου σκυροδέματος αποκατάστασης αρχαίων μελών (Χάλυβας οπλισμού: Ανοξείδωτος χάλυβας AISI 316L)>>, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (2015)

[6] ASTM Designation: G 34 – 01. Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test)<sup>1</sup>, (2001)

[7] ASTM Designation: G 34 – 99. Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test)<sup>1</sup>, (2001)

[8] ASTM Designation: G 34 – 9901. Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test)<sup>1</sup>, (2001)

[9] ASTM Designation: G 46 – 94. (Reapproved 1999): Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion<sup>1</sup>, (2001)

[10] ASTM Designation: G 67 – 04. Standard Test Method for Determining the Susceptibility to Intergranular Corrosion of 5XXX Series Aluminum Alloys by Mass Loss After Exposure to Nitric Acid (NAMLT Test)<sup>1</sup>, (2001)

[11] ASTM Designation: E 3 - 01. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens<sup>1</sup>, (2001)

[12] ASTM Designation: E 3-95. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens<sup>1</sup>, (2001)

[13] ASTM Designation: E 3 - 9501. Standard Practice Guide for Preparation of Metallographic Specimens<sup>1</sup>, (2001)

[14] Δεπούντη Χαρ. Σπυρίδωνος. Διδακτορική διατριβή <<Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας κραμάτων αλουμινίου φιλικών προς το περιβάλλον, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα (2012)

[15] 4° Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών. Ν. Δ. Αλεξόπουλος <<Επίδραση της διάβρωσης αποφλοίωσης στην δυσθραυστότητα του κράματος αλουμινίου 2024 (σελ. 227)>>, Εκδότες Σ. Σκολιανός, Δ.Ν. Τσιπάς, Ν. Μιχαηλίδης, Α. Μαυρόπουλος, Θεσσαλονίκη (2010)

[16] 5° Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών. Η. Μαύρος, Α. Ε. Καράντζαλης, Α. Λεκάτου <<Σύνθετα υλικά με μήτρα κραμάτων ΑΙ και ενίσχυση κεραμικών σωματιδίων ΤiC: Συγκριτική μελέτη διάβρωσης και φθοράς ολίσθησης (σελ. 285)>>, Επιμέλεια Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Α.Δ. Ζερβάκη, Ε. Καμούτση, Βόλος (2013)

[17] 5° Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών. Δ. Δ. Σέτσικα, Α. Ν. Χάμος, Σπ. Γ. Παντελάκης, Κ. Ι. Τσερπές <<Εξέλιξη της βλάβης διάβρωσης στο αεροπορικό κράμα αλουμινίου ΑΑ 2024 Τ3 (σελ. 291)>>, Επιμέλεια Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Α.Δ. Ζερβάκη, Ε. Καμούτση, Βόλος (2013)

[18] Αθανάσιος Κ. Σφήκας. Εργαστηριακές σημειώσεις <<Ερμηνεία-Αξιολόγηση Καμπυλών Ποτενσιοδυναμικής και Ποτενσιοστατικής Πόλωσης, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Ιωάννινα (2016), https://lookaside.fbsbx.com/file/%CE%95%CF%81%CE%BC%CE%B7%CE%BD%CE%B5%CE%AF%CE%B1%20-

%20%CE%91%CE%BE%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CF%8C%CE%B3%CE%B 7%CF%83%CE%B7%20%CE%BA%CE%B1%CE%BC%CF%80%CF%8D%CE% BB%CF%89%CE%BD%20%CF%80%CE%BF%CF%84%CE%B5%CE%BD%CF %83%CE%B9%CE%BF%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B 9%CE%BA%CE%AE%CF%82%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CF%80% CE%BF%CF%84%CE%B5%CE%BD%CF%83%CE%B9%CE%BF%CF%83%CF %84%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82%20%CF%80%CF %8C%CE%BB%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82.pdf?token=AWwHtJk5viPR7 5G-

 $zL7rN6hg9byL2Y1kWrs5bLPFz4zsdMc\_nBZ2RqQQ5NFH25ggRDIkTm08\_16XDanArD6ikoDHyvM6TLloUb96Si11Fd5MchaOqXRRFeTXResMC8Pd5JYCq6nq1z6JTOb1sKB14F\_r$ 

[19] http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a\_aluminum\_alloys.pdf ( $\pi \rho \delta \sigma \beta \alpha \sigma \eta$  Máïoç 2016)

[20] J. R. Scully (PI), R. G. Kelly (co-PI), and R. P. Gangloff (co-PI). <<CORROSION PILOT PROGRAM>>, Collaborative University Research on Corrosion OSD Education Initiative, University of Virginia (November 30, 2012), http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a576527.pdf

[21] Australian Government, ATSB TRANSPORT SAFETY REPORT, Aviation Research and Analysis Report - B20050205. <<How Old is Too Old? The impact of ageing aircraft on aviation safety>> (February 2007), https://www.atsb.gov.au/media/29959/b20050205.pdf [22] David W. Hoeppne. <<Chapter 5 – PITTING CORROSION: MORPHOLOGY AND CHARACTERIZATION>>, University of Utah, (USA) (πρόσβαση Μάϊος 2016),

http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.221.8685&rep=rep1&type=pdf

[23] J.R. Davis. <<ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys>>, ASM International (1993),

http://www.asminternational.org/documents/10192/22833166/06610G\_Sample\_BuyN ow.pdf/682770e4-3845-4e47-bc71-baf71b17a014

[24] N.D. Alexopoulos, P. Papanikos. << Experimental and theoretical studies of corrosion-induced mechanical properties degradation of aircraft 2024 aluminum alloy>>, Greece (2008),

http://rose-hulman.edu/~stienstr/ME417/corrosion\_strength\_2024.pdf

[25] Chen Luo. <<Role of Microstructure on Corrosion Control of AA2024-T3 Aluminum Alloy>>, University of Manchester, School of Materials Corrosion and Protection Centre, (2011),

https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:127468&datastreamId=FULL-TEXT.PDF

[26] Loïc Lacroix, Laurence Ressier, Christine Blanc, Georges Mankowski. <<<Combination of AFM, SKPFM, and SIMS to Study the Corrosion Behavior of S-phase particles in AA2024-T351>>, Journal of The Electrochemical Society, (2013), https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00806024/document

[27] H. Kamoutsi, G.N. Haidemenopoulos, V. Bontozoglou, S. Pantelakis. <</ r>
 <</li>
 Corrosion-induced hydrogen embrittlement in aluminum alloy 2024>>, Greece (2005), http://www.mie.uth.gr/files/sdarticle.pdf

[28] Aline Viomar, Maysa Terada, Isolda Costa, Paulo Rogério Pinto Rodrigues, Claudia Schlindwein, Everson do Prado Banczek. <<Corrosion protection in sulfate medium by self-assemb films adsorbed on AA 2024 T3 aluminum alloy surface>>, Technology of Materials, Brasil, Rio De Janeiro (June 2015), http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1517-70762015000200420

[29] J.R. Davis. <<Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys>>, ASM International (1999),

http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06787G\_Sample.pdf

[30] P. W. Whaley. <<CORROSION DAMAGE TOLERANCE METHODOLOGY FOR C/KC-135 FUSELAGE STRUCTURE>>, Oklahoma City, USA (1999), http://www.aerohabitat.org/link/2006/05-04-2006%20-%20PW%20Whaley,%20Corrosion%20damage%20tolerance%20KC%20-%20135.pdf [31] Anees A. Khadom, Aprael S. Yaro, Abdul Amir H. Kadum, Ahmed S. AlTaie and Ahmed Y. Musa. <<The Effect of Temperature and Acid Concentration on Corrosion of Low Carbon Steel in Hydrochloric Acid Media>>, American Journal of Applied Sciences (2014),

https://www.researchgate.net/publication/237650031\_The\_Effect\_of\_Temperature\_an d\_Acid\_Concentration\_on\_Corrosion\_of\_Low\_Carbon\_Steel\_in\_Hydrochloric\_Acid\_Media

[32] Celine Larignon, Joel Alexis, Eric Andrieu, Gregory Odemer, Christine Blanc. <<The contribution of hydrogen to the corrosion of 2024 aluminum alloy exposed to thermal and environmental cycling in chloride media>>, Corrosion Science (2013), http://oatao.univ-toulouse.fr/8492/1/Alexis\_8492.pdf

[33] H.KAMOUTSI, G.N.HAIDEMENOPOULOS, V.BONTOZOGLOU & S. PANTELAKIS. <<CORROSION-INDUCED HYDROGEN EMBRITTLEMENT IN ALUMINUM ALLOY 2024>>, Greece (2005), http://www.mie.uth.gr/files/sdarticle.pdf

[34] Sp.G. Pantelakis, D.D. Setsika, K.I. Tserpes, A.N. Chamos. << A Corrosion Damage Quantification Approach for Assessing the Tensile Behavior of Corroded Aluminum Alloy 2024>>, Patra Greece (2014), https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&ua ct=8&ved=0ahUKEwiD0d-

Ws63NAhXCuRQKHdyfAqcQFggwMAM&url=https%3A%2F%2Fwww.researchga te.net%2Fprofile%2FKI\_Tserpes%2Fpublication%2F269100222\_A\_Corrosion\_Dam age\_Quantification\_Approach\_for\_Assessing\_the\_Tensile\_Behavior\_of\_Corroded\_A luminum\_Alloy\_2024%2Flinks%2F54803e870cf250f1edbfdf02&usg=AFQjCNHmz KzsPd8rjmo7zfsb7tITLXxaVQ

[35]https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja &uact=8&ved=0ahUKEwi2

OGkxbvMAhWFbRQKHSTwCVEQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.interco py.gr%2Fsite%2Findex.php%2Fshmeiwseis-themata-programmatasxolwn%2Fdoc\_download%2F859-

10&usg=AFQjCNGFF1xhIfUD45dUZp2RAN4ZhUrPZw&bvm=bv.121070826,d.bG g (πρόσβαση Μάϊος 2016)

[36]Vinod S. Agarwala and Gilbert M. Ugiansky. <<New Methods for Corrosion Testing of Aluminum Alloys, ASTM Publication , Philadelphia(1992), https://books.google.gr/books?id=0n3cWbIEPpgC&pg=PP3&lpg=PP3&dq=Vinod+S .+Agarwala+and+Gilbert+M.+Ugiansky.+%3C%3CNew+Methods+for+Corrosion+T esting+of+Aluminum+Alloys,+ASTM+Publication+,+Philadelphia(1992)&source=bl &ots=iQG2paGVlm&sig=z1MhVtg2Rkoy3mTQkBgqSltZ0AQ&hl=el&sa=X&ved= 0ahUKEwi5gMXvrK3NAhXGVBQKHU\_TC\_oQ6AEIGjAA#v=onepage&q&f=fals e

[37] P. V. Petroyiannis, E. Kamoutsi, AL. TH. Kermanidis, S. G. Pantelakis, V. Bontozoglou, G. N. Haidemenopoulos. <<Evidence on the corrosion-included hydrogen embrittlement of the 2024 aluminum alloy>>, Greece (2004), http://www.mie.uth.gr/files/2005a.pdf

[38]J.R. Davis. <<Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys>> ASM International (2000),

http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06787G\_Sample.pdf

[39]National Academy Press. <<Aging of U.S. Air Force Aircraft>>, Committee on Aging of U.S. Air Force Aircraft, Washington (1997), http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p014061.pdf

[40] NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION - RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANISATION. << Ageing Mechanisms and Control - Specialists' Meeting on Life Management Techniques for Ageing Air Vehicles>>, Manchester, United Kingdom (2003),

https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ua ct=8&ved=0ahUKEwiC2eKFrq3NAhVF7RQKHZBAAKYQFggaMAA&url=http%3 A%2F%2Fwww.dtic.mil%2Fget-tr-

doc%2Fpdf%3FAD%3DADA415672%26Location%3DU2%26doc%3DGetTRDoc.p df&usg=AFQjCNE42W\_9rmVkiG5wEYjfcSaALBQH6Q&bvm=bv.124272578,d.d2 4

[41] Advances in Materials Science and Engineering. <<Time Dependent Development of Aluminum Pitting Corrosion>>, Hindawi Publishing Corporation, Australia (2015), http://www.hindawi.com/journals/amse/2015/215712/

[42] Παρασκευάς Β. Πετρογιάννης, Διδακτορική Διατριβή <<ΨΑΘΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΠΙΚΗΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΚΑΘΑΡΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ>> Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πάτρα (2005), http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1435/1/Nimertis\_Petrogiannis.pdf

[43] Australian Government-Department of Defence, Graham Clark. <<A Review of Australian and New Zealand Investigations on Aeronautical Fatigue During the Period April 2003 to March 2005>>, (May 2005), https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&ua ct=8&ved=0ahUKEwjhv9bCrq3NAhVJVhQKHd\_8AOUQFggkMAE&url=http%3A %2F%2Fwww.dtic.mil%2Fcgi-

bin%2FGetTRDoc%3FAD%3DADA468387&usg=AFQjCNFs\_hbAUWjB44jdXO86 twd49XQdLQ&bvm=bv.124272578,d.d24

[44] International Journal of Aerospace Engineering. << Exfoliation Corrosion and Pitting Corrosion and Their Role in Fatigue Predictive Modeling: State-of-the-Art Review>>, Hindawi Publishing Corporation, Department of Mechanical Engineering, University of Utah (2011), http://www.hindawi.com/journals/ijae/2012/191879/ [45] R. Winston Revie, Herbert H Uhlig. <<Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering>>, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, Canada (2008),

https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ua ct=8&ved=0ahUKEwjSn-

ndrq3NAhXGSBQKHZaxDJYQFggcMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.researchga te.net%2Ffile.PostFileLoader.html%3Fid%3D553dfb03d5a3f2411b8b45ba%26asset Key%3DAS%253A273765475258377%25401442282183555&usg=AFQjCNFlqeWI EY3skH7tQhFJMkoxgUFRIA

[46] A. Lekatou, A.E. Karantzalis, V. Gousia, A. Evangelou, G. Kaptay, A. Simon <<<Materials design>>, (2015)

[47] Συζήτηση με την κ. Αγγελική Λεκάτου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Εφαρμοσμένης Μεταλλουργίας του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

### <u>Παράρτημα</u>

### **Designation:** G 34 – 01

#### Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test)<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation G 34; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (e) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

#### 1. Scope

1.1 This test method describes a procedure for constant immersion exfoliation corrosion (EXCO) testing of highstrength 2XXX and 7XXX series aluminum alloys.

NOTE 1—This test method was originally developed for research and development purposes; however, it is referenced, in specific material specifications, as applicable for evaluating production material (refer to Section 14 on Precision and Bias).

1.2 This test method applies to all wrought products such as sheet, plate, extrusions, and forgings produced from conventional ingot metallurgy process.

1.3 This test method can be used with any form of specimen or part that can be immersed in the test solution.

1.4 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

#### 2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 1193 Specification for Reagent Water<sup>2</sup>

E 3 Practice for Preparation of Metallographic Specimens<sup>3</sup>

G 15 Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing<sup>4</sup>

G 112 Guide for Conducting Exfoliation Corrosion Tests in Aluminum Alloys<sup>4</sup>

#### 3. Terminology

3.1 *Definitions*:

3.1.1 *exfoliation*—corrosion that proceeds laterally from the sites of initiation along planes parallel to the surface, generally at grain boundaries, forming corrosion products that force metal away from the body of the material giving rise to a layered appearance (Terminology G 15).

#### 4. Summary of Test Method

4.1 This test method provides an accelerated exfoliation corrosion test for 2XXX and 7XXX series aluminum alloys that involves the continuous immersion of test materials in a solution containing 4 M sodium chloride, 0.5 M potassium nitrate, and 0.1 M nitric acid at 25 6 3°C (776 5°F). The susceptibility to exfoliation is determined by visual examination, with performance ratings established by reference to standard photographs.

#### 5. Significance and Use

5.1 This test method was originally developed for research and development purposes; however, it is referenced, in specific material specifications, as applicable for evaluating production material (refer to Section 14 on Precision and Bias).

5.2 Use of this test method provides a useful prediction of the exfoliation corrosion behavior of these alloys in various types of outdoor service, especially in marine and industrial environments.5 The test solution is very corrosive and represents the more severe types of environmental service, excluding, of course, unusual chemicals not likely to be encountered in natural environments.

5.3 The exfoliation ratings were arbitrarily chosen to illustrate a wide range in resistance to exfoliation in this test. However, it remains to be determined whether correlations can be established between EXCO test ratings and realistic service conditions for a given alloy. It is an ongoing activity of the Task Group on Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys (G01.05.02.08) to maintain outdoor exposure tests for this purpose. For example, it has been reported6 that samples of Al-Zn-Mg-Cu alloys rated EA or P in a 48-h EXCO test did not develop more than a slight amount of incipient exfoliation (EA) during six- to nine-year exposures to seacoast atmospheres, whereas, ED rated materials in most cases developed severe exfoliation within a year in the seacoast atmosphere. It is anticipated that additional comparisons will become available as the outdoor tests are extended.

#### 6. Apparatus

6.1 Any suitable glass, plastic, or similarly inert container can be used to contain the solution and specimens during the period of test. Depending upon the shape and size of the specimens, rods or racks of glass, plastic, or any inert substance shall be used to support the specimen above the bottom of the container. The container should be fitted with a loosefitting cover to reduce evaporation.

#### 7. Reagents

7.1 *Purity of Reagents*—The test solution shall be prepared with reagent grade sodium chloride (NaCl), potassium nitrate (KNO3), and nitric acid (HNO3).

7.2 *Purity of Water*—Distilled or deionized water shall be used to prepare test solution. The water purity must conform to Specification D 1193, Type IV reagent water, except that for this method, the values of chloride and sodium can be disregarded. 7.3 A test solution of the following composition shall be used:

NaCl (4.0 M) KNO3 (0.5 M) HNO3 (0.1 M) Dissolve 234 g of NaCl, 50 g of KNO3 in water, and add 6.3 mL of concentrated HNO3 (70 weight %). Dilute to 1 L. This solution has an apparent pH of 0.4. 7.4 The solution shall be maintained at a temperature of 25 6 3°C (77 6 5°F).

#### 8. Sampling

8.1 Sampling procedures are not considered applicable to this test method, as they are often covered by product specifications. It is assumed that the test specimens are removed from representative samples of materials.

#### 9. Test Specimens

9.1 Specimens may be of any practical size or shape. Nevertheless, for the results to be of most significance a specimen size of at least 50 by 100 mm (2 by 4 in.), or the equivalent, is recommended.

9.2 The edges of sawed specimens need not be machined, specimens obtained by blanking or shearing shall have edges dressed by machining or filling to a depth equal to the thickness of the specimen to remove cold-worked metal.

9.3 Remove the cladding of alclad sheet by machining the test surface; remove or mask the cladding on the back side (non-test surface) also.

9.4 When removing test specimens from extrusions and forgings, take care to avoid specimen locations underneath flanges, ribs, etc., where the grain structure is usually variable.

#### **10. Standardization**

10.1 To provide an indication when some inadvertent deviation from the correct test conditions occurs, it is necessary to expose to the test at regular intervals a control specimen of a material with known resistance. This control should exhibit the same degree of exfoliation each time it is included in the test.

10.2 The control may be any material of the alloy type included in the scope of this test method, preferably one with an intermediate degree of susceptibility (Fig.1 and Fig. 2).

#### **11. Procedure**

11.1 Degrease the specimens with a suitable solvent.

11.2 Mask the back surfaces of the specimens to minimize corrosion of non-test areas. Protective coatings must have good adherence to avoid crevice corrosion beneath the coating; also, they should not contain leachable ions or protective oils that will influence the corrosion of the test surface. (See Figs. 1-6.)7

11.3 Use the solution in sufficient quantity to provide a volume-to-metal surface area ratio of 10 to 30 mL/cm2 (65 to 200 mL/in.2). Include all exposed metal area in the determination of total surface area.

11.4 Use fresh solution at the start of each test. Do not change the solution even though the pH increases during the test. It is normal for the pH to increase from the initial apparent value of 0.4 to about 3 during the first several hours depending upon the amount of corrosion that occurs.

11.5 Immerse the specimens in the solution using rods or racks of inert material to support the specimens above the bottom of the container. Place the test surface upward in a horizontal position to prevent loss of exfoliated metal from the surface of the

specimen. Do not concurrently immerse in the same container alloys containing less than 0.25 % copper with those containing greater amounts of copper.

11.6 The following maximum periods of exposure are recommended for testing the alloy types indicated:

2XXX Series 96 h

7XXX Series 48 h

The length of time to develop exfoliation in material of a given alloy and temper may vary with the mill product form, with some materials developing severe exfoliation in much shorter periods than those listed. Therefore, inspect test specimens in place and rate in accordance with Section 12 at periods such as 5, 24, 48, and 72 h, and discontinue the exposure of a specimen when it has developed the most severe exfoliation rating (Fig. 6).





Undermining pitting that may form the surface give the appearance of incipient exfoliation (Keller's Etch; 1003).

#### FIG. 1 Examples of Pitting Corrosion

11.7 Rate the performance of test specimens in accordance with Section 12 immediately after discontinuation of the exposure while the specimens are still wet or moist, taking into account all loose products of exfoliation lying on the test specimen or on the bottom of the container.

11.8 Clean exposed test specimens, if desired, by rinsing in water and soaking in concentrated nitric acid after the specimens have been inspected and rated.

#### **12. Interpretation of Results**

12.1 The following codes and classifications shall be used when reporting the visual rating of corroded specimens:

Classification	Code
No appreciable attack	Ν
Pitting	Р
Exfoliation EA through	ED

12.2 Descriptions of the various classifications, which are illustrated in Figs. 1-6,7 are as follows:

12.2.1 *N*—No appreciable attack: Surface may be discolored etched, but no evidence of pitting or exfoliation.

12.2.2 *P*—Pitting: Discrete pits, sometimes with a tendency for undermining and slight lifting of metal at the pit edges (Fig. 1).

12.2.3 EA through ED—Exfoliation (Figs. 1-6):



EA

ΕB







Exfoliation resulting from rapid lateral attack of selective boundaries or strata forming wedges of corrosion product that force layers of metal upward giving rise to a layered appearance (Keller's Etch; 1003).

#### FIG. 2 Four Degrees of Severity of Exfoliation Corrosion

12.2.3.1 Visible separation of the metal into layers manifested in various forms, such as blisters, slivers, flakes, fairly continuous sheets, and sometimes granular particles resulting from disintegration of thin layers, depending upon the grain morphology of the sample. Various degrees of exfoliation with increasing penetration and loss of metal are illustrated in Fig. 2. Additional examples of the various ratings are shown in Figs. 3-6.

12.2.3.2 The formation of tiny pit-blisters or the dislodgement of an extremely thin surface layer of metal after only a few hours of exposure may resemble superficial exfoliation (EA), but can in fact result from undermining pitting. If continued exposure to the recommended periods in 11.6 produces more corrosion but no evidence of advancing delamination, metallographic examination (see Practice E 3) will be required to determine whether the initial effect was truly exfoliation (Fig. 2) or undermining pitting (Fig. 1); in the latter case the rating should be P.

12.2.3.3 When exfoliation occurs in isolated sites, rate the worst localized condition observed.

12.3 The visual ratings are intended to be finite indications of the resistance to exfoliation, and care should be taken when rating a series of test specimens to compare them with the photographs and captions in Figs. 1-6 rather than with each other. The final rating of a specimen shall be determined by the poorest classification observed during the exposure.

12.3.1 When it is difficult to classify a specimen, it is advisable to place it in the category of greater susceptibility.

NOTE 2—Enlarged glossy prints of Figs. 1-6 are available from ASTM International.7 These prints are more convenient to use and are of better quality than the reproductions in the printed standard. The user is urged to obtain and use these prints.

#### 13. Report

13.1 The report should contain the following essential information:



FIG. 3 Examples of Exfoliation Rating EA (Superficial): Tiny Blisters, Thin Slivers, Flakes or Powder, with only Slight Separation of Metal



FIG. 4 Example of Exfoliation Rating EB (Moderate); Notable Layering and Penetration into the Metal

13.1.1 Alloy and temper of the material tested,

13.1.2 Mill product, section thickness, and the surface tested, including reference to applicable product specification,

13.1.3 Sampling procedure if other than that specified in referenced product specification,

13.1.4 A rating of the test specimens using the codes and classifications in Section 12, and

13.1.5 Notation of any deviation in test procedure from that set forth in preceding paragraphs.

13.2 Other information that may be desirable for certain types of reports includes:

13.2.1 Size, type, and number of replicate specimens; method of edge preparation, and 13.2.2 Volume to surface ratio.

#### 14. Precision and Bias

14.1 Precision:

14.1.1 The precision of the data from this test method was evaluated by way of an interlaboratory test program using two non-commercial tempers of Alloy 7075 with different levels of exfoliation corrosion susceptibility. Seven laboratories, including experienced and inexperienced users, participated in the round robin. The laboratories received rough machined panels, which they finish machined, exposed according to the procedure in this test method, and rated visually according to the photographs included in this test method.

14.1.2 The raw data from laboratories is listed in Table 1 and plotted in Fig. 7. All seven laboratories rated the more susceptible T6X material as having severe or very severe exfoliation corrosion as designated by the ratings EC and ED. However, for the more resistant T7X temper there was no agreement as the visual ratings ranged from pitting only to very severe exfoliation as designated by the ratings P to ED. Fig. 7 shows that there was no clustering of the ratings either, they seem to follow a uniform distribution 14.1.2.1 The data in Table 1 show the ratings were repeatable within laboratories. In each case the same rating was obtained for both panels tested by the individual laboratory.



FIG. 5 Examples of Exfoliation Rating EC (Severe): Penetration to a Considerable Depth into the Metal



FIG. 6 Examples of Exfoliation Rating ED (Very Severe) (Similar to EC Except for Much Greater Penetration and Loss of Metal)

Laboratory -	T6X		T7X	
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 1	Specimen 2
Α	ED	ED	EB	EB
в	EC	EC	ED	ED
С	EC	EC	EA	EA
D	EC-ED	EC-ED	EC	EC
E	ED	ED	ED	ED
F	EC	EC	EB	EB
G	EC	EC	P	P

TABLE 1 Visual Ratings from Interlaboratory Test of Alloy 7075 Plate in Two Noncommercial Tempers



14.1.2.2 The reproducibility of ratings among different laboratories is shown most clearly in Fig. 7. In addition to the visual ratings, one of the laboratories measured the depth of corrosion using an ultrasonic technique (the laboratories reported original panel thickness) and the data showed not only that the two tempers had different amounts of exfoliation, but that there was good consistency within each temper as plotted in Fig. 8. Thus the laboratory to laboratory variation in ratings for the T7X material resulted from individual rater's interpretation of the photographs and wording used to define the visual rating system. Samples with resistance, that is, intermediate between highly susceptible and highly resistant samples can be the most difficult to rate visually, which is confirmed by these results. One of the reasons for this is corrosion debris that does not result from exfoliation corrosion as discussed in Guide 112.

14.1.2.3 Based on the results from this interlaboratory test program, the visual rating system gives consistent ratings for highly susceptible samples, but produces a large amount of laboratory-to-laboratory variaition for tempers with intermediate levels of resistance. Experience indicates that the visual ratings will produce more consistent results for highly resistant samples, such as 7075–T73X products, than it does for samples with intermediate resistance, such as T7X tested in this interlaboratory test program.

#### 14.2 Bias:

14.2.1 The procedure in Test Method G 34 has no bias because the exfoliation rating is defined only in terms of this test method.

#### 15. Keywords

15.1 exfoliation corrosion; heat treatable aluminum alloys; 2XXX aluminum alloys; 7XXX aluminum alloys; immersion corrosion test

1 This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on (G01.05.02.08) Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests. Current edition approved Oct. 10, 2001. Published December 2001. Originally published as G34 - 72. Last previous edition G 34 - 99.

2 Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.01.

3 Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

4 Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

5 Ketcham, S. J., and Jeffrey, P. W., "Exfoliation Corrosion Testing of 7178 and 7075 Aluminum Alloys" (Report of ASTM G01.05 Interlaboratory Testing Program in Cooperation with the Aluminum Association); and Sprowls, D. O., Walsh, J. D., and Shumaker, M. B., "Simplified Exfoliation Testing of Aluminum Alloys," *Localized Corrosion—Cause of Metal Failure, ASTM STP 516*, ASTM, 1972.

6 Sprowls, D. O., Summerson, T. J., and Loftin, F. E., "Exfoliation Corrosion Testing of 7075 and 7178 Aluminum Alloys—Interim Report on Atmospheric Exposure Tests" (Report of ASTM G01.05.02 Interlaboratory Testing Program in Cooperation with the Aluminum Association); and Lifka, B. W. and Sprowls, D. O., "Relationship of Accelerated Test Methods for Exfoliation Resistance in 7XXX Series Aluminum Alloys With Exposure to a Seacoast Atmosphere," *Corrosion in Natural Environments, ASTM STP 558*, ASTM, 1974.

7 Enlarged glossy prints of Figs. 1-6 are available from ASTM International Headquarters. Order PCN ADJG003402.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

# Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Περίπτωση ηλεκτροχημικής ή γαλβανικής διάβρωσης σωληνώσεων σε
εγκαταστάσεις θέρμανσης9
Εικόνα 2.3.1.1: Καθαρό αλουμίνιο 105014
Εικόνα 2.3.1.2: 12 δοκίμια καθαρού αλουμινίου 1050 τα οποία χρησιμοποιούνται στο
πειραματικό μέρος
Εικόνα 2.3.2.1: Κράμα αλουμινίου 202415
Εικόνα 2.3.2.2: 12 δοκίμια κράματος αλουμινίου 2024 τα οποία γρησιμοποιούνται στο
πειραματικό μέρος
Εικόνα 2.3.3.1: Κράμα αλουμινίου 7075
Εικόνα 2.3.3.2: 12 δοκίμια κράματος αλουμινίου 7075 τα οποία χρησιμοποιούνται στο
πειραματικό μέρος
Εικόνα 2.3.4.4.1: Al-TiC O,7% vol
Εικόνα 2.3.4.4.2 : 12 δοκίμια Al-TiC O.7% vol τα οποία χρησιμοποιούνται στο
πειραματικό μέρος
Εικόνα 2.3.4.4.3 : Al-TiC 1% vol
Εικόνα 2.3.4.4.4: 12 δοκίμια Al-TiC 1% vol τα οποία γοησιμοποιούνται στο
πειοαματικό μέρος
$E_{\rm I}$ $\kappa$ $\delta$ $v_{\rm I}$ $2.3 \times 1.1 \times 1.4$ $WC = 0.5\%$ $v_{\rm I}$ $21$
Εικόνα 2.3.5.1.2 : 12 δοκίμια Al-WC 0.5% vol τα οποία γοησιμοποιούνται στο
πειραματικό μέρος
Εικόνα 3.6.1: Μηγανισμός διάβοωσης οπών. Στον πυθμένα της οπής διακοίνονται
παραπροϊόντα διάβρωσης
Εικόνα 4.1: (1) Οξείδιο του αλουμινίου μετά την ανοδίωση, (2) Σχηματισμός Al(OH) <sub>3</sub>
με την εμβάπτιση σε θερμό νερό ή σε διάλυμα NaOH, (3) Σφράγισμα των πόρων λόγω
μεγαλύτερου μοριακού όγκου του Al(OH)3H σφράγιση της πορώδους ταινίας
εντούτοις μειώνει την σκληρότητα ταινιών και την αντίσταση στην τριβή40
Εικόνα 5.1.1: Αδρανές δοχείο το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των
πειραμάτων
Εικόνα 5.1.2 – 5.1.3: HNO <sub>3</sub> και KNO <sub>3</sub> αντίστοιχα
Εικόνα 5.1.4 – 5.1.5: Απιονισμένο νερό και NaCl αντίστοιχα48
Εικόνα 5.1.6: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος49
Εικόνα 5.2.1: Χρησιμοποιημένο γυαλόχαρτο λείανσης δοκιμίων 1200 grit50
Εικόνα 5.2.2: Μηχάνημα λείανσης στίλβωσης Struers Rotopol 2550
Εικόνα 5.3.1: Χρησιμοποιημένου πανί στίλβωσης τύπου Dac51
Εικόνα 5.3.2: Σπρέι διαμαντιού κόκκων 3μm51
Εικόνες 5.4.1 – 5.4.2: Οπτικό μικροσκόπιο Leica DM – 4000 συνδεδεμένο με τον
υπολογιστή που περιέχει το απαραίτητο λογισμικό52
Εικόνα 5.4.3: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας ΑΙ 105052
Εικόνα 5.4.4: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας Α1202452
Εικόνα 5.4.5: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας ΑΙ 707553
Εικόνα 5.4.6: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας Al-TiC 0,7% vol53
Εικόνα 5.4.7: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας Al-TiC 1% vol53
Εικόνα 5.4.8: Μικροδομή λειασμένης επιφάνειας Al-WC 0,5% vol53

Εικόνα 5.5.1: Κερί το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην πίσω και στις παράπλευρες όψεις Εικόνα 5.5.2: Επικαλυμμένη επιφάνεια κραμάτων αλουμινίου Al 1050, Al 2024 και Al 7075 με κερί (πίσω όψη)......55 Εικόνα 5.5.3: Επικαλυμμένη επιφάνεια κραμάτων αλουμινίου Al 1050, Al 2024 και Al 7075 με κερί (μπροστινή όψη)......55 Εικόνα 5.5.4: Επικαλυμμένη επιφάνεια κράματος Al-TiC, Al-WC με κερί (πίσω óψη)......56 Εικόνα 5.5.5: Επικαλυμμένη επιφάνεια κράματος Al-TiC, Al-WC με κερί (μπροστινή όψη)......56 Εικόνα 5.7.1: Επιλογή 2 τυγαίων περιοχών ίδιου εμβαδού (10x10mm) στις οποίες Εικόνα 5.7.2: Επιλογή 2 τυχαίων περιοχών ίδιου εμβαδού (10x10mm) στις οποίες Εικόνα 5.7.3: Τομές στο υλικό για ανάδειξη του σχήματος των τρημμάτων, το οποίο χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46......59 Εικόνα 5.7.4: Μικροτόμος......60 Εικόνες 6.2.1 – 6.2.2: Δεν παρατηρείται διάβρωση αποφλίωσης στην επιφάνεια του Al 1050 στους 6 διαφορετικούς χρόνους έκθεσης, το αλουμίνιο έχει υποστεί ανοδίωση (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....62 Εικόνα 6.2.3: Διαβρωμένη επιφάνεια Al 1050 μετά από την έκθεση του σε οξύ, δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη διαφορά στο Al 1050 πριν και μετά την διάβρωση, καθώς έχει υποστεί ανοδίωση, (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνα 6.2.4 – 6.2.5: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 1050 μετά την έκθεση σε οξύ 2 και 4 ώρες αντίστοιγα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνα 6.2.6 – 6.2.7: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 1050 μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιγα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνα 6.2.8 – 6.2.9: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 1050 μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιγα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνα 6.2.10: Επιφάνεια υπό τομή κράματος αλουμινίου 1050 (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....64 Εικόνες 6.3.1 - 6.3.2: Έκθεση Αl 2024 σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέγει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234

gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....71 Εικόνες 6.3.3 - 6.3.4: Έκθεση Al 2024 σε 8 και 12 ώρες αντίστοιγα, στις 12 ώρες το κράμα μας έχει υποστεί ανοδίωση, (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνες 6.3.5 - 6.3.6: Έκθεση Al 2024 σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα, βστις 16 ώρες το κράμα μας, έχει υποστεί ανοδίωση, (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέγει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4).....72 Εικόνα 6.3.7: Διαβρωμένη επιφάνεια ΑΙ 2024 μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέγει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....72 Εικόνα 6.3.8 – 6.3.9: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 2024 μετά την έκθεση σε οξύ 2 και 4 ώρες αντίστοιγα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνα 6.3.10 – 6.3.11: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 2024 μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °С катрH=0,4)......73 Εικόνα 6.3.12 – 6.3.13: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 2024 μετά την έκθεση σε οξύ 16 και 24 ώρες αντίστοιγα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνα 6.3.14: Επιφάνεια υπό τομή κράματος αλουμινίου 2024 (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....74 Εικόνες 6.4.1 – 6.4.2: Έκθεση Αl 7075 σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4).....82 Εικόνες 6.4.3 - 6.4.4: Έκθεση Al 7075 σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα, στις 12 ώρες το κράμα μας, έχει υποστεί ανοδίωση, (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνες 6.4.5 - 6.4.6: Έκθεση Al 7075 σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα, στις 24 ώρες το κράμα μας, έχει υποστεί ανοδίωση (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)......83

Εικόνα 6.4.7: Διαβρωμένη επιφάνεια ΑΙ 7075 μετά από την έκθεση του σε οξύ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέγει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....84 Εικόνα 6.4.8 – 6.4.9: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 7075 μετά την έκθεση σε Εικόνα 6.4.10 – 6.4.11: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 7075 μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)......85 Εικόνα 6.4.12 – 6.4.13: Τομή επιφάνειας κράματος αλουμινίου 7075 μετά την έκθεση σε οξύ 16 και 24 ώρες αντίστοιγα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνα 6.4.14: Επιφάνεια υπό τομή κράματος αλουμινίου 7075 (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....86 Εικόνες 6.5.1 - 6.5.2: Έκθεση Al-TiC 0,7% vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....91 Εικόνες 6.5.3 - 6.5.4: Έκθεση Al-TiC 0,7% vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....92 Εικόνες 6.5.5 - 6.5.6: Έκθεση Al-TiC 0,7% vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέγει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....92 Εικόνα 6.5.7: Διαβρωμένη επιφάνεια Al-TiC 0,7% vol μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....93 Εικόνες 6.5.8 - 6.5.9: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al -TiC 0,7 % vol μετά την έκθεση σε οξύ σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνες 6.5.10 – 6.5.11: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al –TiC 0,7 % vol μετά την έκθεση σε οξύ σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 Εικόνες 6.5.12 – 6.5.13: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al – TiC 0,7 % vol μετά την έκθεση σε οξύ σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>,

αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4)......94 Εικόνα 6.5.14: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-TiC 0.7% vol μετά την έκθεση σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....95 Εικόνες 6.6.1 - 6.6.2: Έκθεση Al-TiC 1% vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....100 Εικόνες 6.6.3 - 6.6.4: Έκθεση Al-TiC 1% vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....101 Εικόνες 6.6.5 - 6.6.6: Έκθεση Al-TiC 1% vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, apai $\omega$ μένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0.4).....101 Εικόνα 6.6.7: Διαβρωμένη επιφάνεια Al-TiC 1 % vol μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4.....102 Εικόνες 6.6.8 - 6.6.9: Έκθεση Al –TiC 1 % vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....102 Εικόνες 6.6.10 - 6.6.11: Έκθεση Al –TiC 1 % vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)....103 Εικόνες 6.6.12 - 6.6.13: Έκθεση Al -TiC 1 % vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιγα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)....103 Εικόνα 6.6.14.: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-TiC 1% vol μετά την έκθεση σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)....104 Εικόνες 6.7.1 - 6.7.2: Έκθεση Al –WC 0,5 % vol σε 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....109 Εικόνες 6.7.3 - 6.7.4: Έκθεση Al –WC 0,5 % vol σε 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....110 Εικόνες 6.7.5 - 6.7.6: Έκθεση Al -WC 0,5 % vol σε 16 και 24 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....110

Εικόνα 6.7.7: Διαβρωμένη επιφάνεια Al-WC 0,5% vol μετά από την έκθεση του σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....111 Εικόνα 6.7.8 – 6.7.9: Τομή επιφάνειας κράματος Al-WC 0,5% vol μετά την έκθεση σε οξύ 2 και 4 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει γημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4).....111 Εικόνα 6.7.10 – 6.7.11: Τομή επιφάνειας κράματος Al-WC 0.5% vol μετά την έκθεση σε οξύ 8 και 12 ώρες αντίστοιχα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4).....112 Εικόνα 6.7.12 – 6.7.13: Τομή επιφάνειας κράματος Al-WC 0.5% vol μετά την έκθεση σε οξύ 16 και 24 ώρες αντίστοιγα (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4).....112 Εικόνα 6.7.14: Τομή επιφάνειας σύνθετου Al-WC 0,5% vol μετά την έκθεση σε οξύ (το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4).....113 Εικόνα 7.1.1: Γαλβανοστάτης/ποτενσιοστάτης GillAc της ACM instruments......122 Εικόνα 7.1.2: Ηλεκτρόδιο αναφοράς γλωριούχου αργύρου (AgCl).....123 Εικόνα 7.1.3: Βοηθητικό ηλεκτρόδιο πλατίνας (Pt).....123 Εικόνα 7.1.4: Ηλεκτρόδια εμβαπτισμένα σε χλωριούχο κάλιο......123 Εικόνα 7.1.5: Συνδεσμολογία ποτενσιοδυναμικής/ποτενσιοστατικής πόλωσης......124 Εικόνα 7.4.1: Λειασμένη επιφάνεια δοκιμίου η οποία θα εκτεθεί στο οξύ (χρησιμοποιήθηκαν 500 ml απιονισμένου νερού, στα οποία διαλύθηκαν 22 ml HCl, κατόπιν μετρήθηκε το pH του παρασκευασμένου διαλύματος το οποίο ήταν ίσο με 0,3 ενώ η συγκέντρωση του διαλύματος εμφάνιζε την τιμή των 0.5 M).....129 Εικόνα 7.4.2: Δομή λειασμένης επιφάνειας δοκιμίου με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου (γρησιμοποιήθηκαν 500 ml απιονισμένου νερού, στα οποία διαλύθηκαν 22 ml HCl, κατόπιν μετρήθηκε το pH του παρασκευασμένου διαλύματος το οποίο ήταν ίσο με 0,3 ενώ η συγκέντρωση του διαλύματος εμφάνιζε την τιμή των 0,5 M)......130 Εικόνα 7.4.3: Προετοιμασία δοκιμίου ώστε να εκτεθεί στο οξύ (χρησιμοποιήθηκαν 500 ml απιονισμένου νερού, στα οποία διαλύθηκαν 22 ml HCl, κατόπιν μετρήθηκε το pH του παρασκευασμένου διαλύματος το οποίο ήταν ίσο με 0,3 ενώ η συγκέντρωση του διαλύματος εμφάνιζε την τιμή των 0,5 M)......130 Εικόνα 7.6: Η συσκευή διάβρωσης (γαλβανοστάτης) και η συνολική διάταξη της διάβρωσης, καθώς επίσης και τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν για τη λειτουργία του ηλεκτροχημικού κελιού διάβρωσης......132

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.3.2: Φάσεις του κράματος 2024 α) S-φάση, β) θ-φάση, γ) α-φά	ση, δ)
σύμπλεγμα S και θ φάσης	26
Σχήμα 3.3.3: Κατανομή Cu στην περιοχή στα όρια των κόκκων	28
Σχήμα 3.3.4: Ποσότητα της έκλυσης υδρογόνου σε δοκίμια του κράματος αλου	μινίου
2024 Σ3 για συνεχής θέρμανση έως τους 600°C	30
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής βιομηχανικής ανοδίωσης	39
Σχήμα 4.2.2: Τυπική καμπύλη πόλωσης για μέταλλο που παθητικοποιείται	44
Σχήμα 5.5: Γεωμετρία δοκιμίου μεταλλογραφικής ανάλυσης	54
Σχήμα 5.7: Επιφάνειες μελέτης για την ποσοτικοποίηση της βλάβης διάβρωσης	57
Σχήμα 6.1.1: Παραλλαγές στο σχήμα διατομής των οπών	61
Σχήμα 7.7.1: Διάγραμμα σταθεροποίησης δυναμικού (πείραμα 1)	134
Σχήμα 7.7.2: Διάγραμμα σταθεροποίησης δυναμικού (πείραμα 2)	136
Σχήμα 7.7.3: Διάγραμμα σταθεροποίησης δυναμικού (πείραμα 3)	138

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων στο Αl12
Πίνακας 2.3.4.2: Φυσικές ιδιότητες ΤiC17
Πίνακας 3.3.2: Χημική σύσταση Αl 202425
Πίνακας 4.1.1: Ανοδίωση αλουμινίου
Πίνακας 4.1.2: Ανάλογα με την περιογή στην οποία πρόκειται να τοποθετηθούν τα
αλουμίνια εφαρμόζεται διαφορετικό πάχος ανοδίωσης
Πίνακας 4.1.3: Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα ανοδίωσης41
Πίνακας 4.2.1: Σειρά παθητικοποίησης δομικών μετάλλων
Πίνακας 5.8: Τιμές επιφανειακής τραχύτητας κραμάτων Al/ σύνθετων Al60
Πίνακας 6.3.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων
των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
αποφλοίωσης
Πίνακας 6.3.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων
τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
αποφλοίωσης
Πίνακας 6.3.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών
αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης67
Πίνακας 6.3.4 : Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
αποφλοίωσης
Πίνακας 6.3.5: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
αποφλοίωσης
Πινακάς 6.3.6: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημματών, του βαθους τρημματός και
της μεσης διαμετρού των τρημματών με τον χρονό εκθεσης στο διαλύμα
αποφλοιωσης
πινακάς 0.4.1: Εξελιζη του μέσου ράθους προσρολής και της μέσης διαμέτρου όλων
των τρημματών και των περιοχών αποφλοιώσης με τον χρονό εκθεσης στο διαλύμα
Πίνακας 6.4.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων
τοημιάτων και των περιοχών αποωλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
$a_{\pi \circ \alpha} \lambda_{\alpha} \delta_{\alpha} $
Πίνακας 6.4.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τοημμάτων και των πεοιογών
αποφλοίωσης με τον γρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης
Πίνακας 6.4.4: Εξέλιξη της πυκνότητας των τοημμάτων, του βάθους τοήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον γρόνο έκθεσης στο διάλυμα
αποφλοίωσης
Πίνακας 6.4.5: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
αποφλοίωσης
Πίνακας 6.4.6: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
αποφλοίωσης
Πίνακας 6.5.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων
των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
αποφλοίωσης

Πίνακας 6.5.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα Πίνακας 6.5.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης......90 Πίνακας 6.6.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων των τρημμάτων και των περιογών αποφλοίωσης με τον γρόνο έκθεσης στο διάλυμα Πίνακας 6.6.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα Πίνακας 6.6.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών Πίνακας 6.7.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων των τρημμάτων και των περιογών αποφλοίωσης με τον γρόνο έκθεσης στο διάλυμα Πίνακας 6.7.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης......107 Πίνακας 6.7.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης......108 Πίνακας 8.1: Συγκριτικός πίνακας δεδομένων αποφλοίωσης......152

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

```
Διάγραμμα 6.3.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων
των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.3.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων
τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.3.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών
Διάγραμμα 6.3.4: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.3.5: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.3.6: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.4.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων
των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.4.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων
τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.4.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών
Διάγραμμα 6.4.4: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.4.5: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.4.6: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων, του βάθους τρήμματος και
της μέσης διαμέτρου των τρημμάτων με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.5.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων
των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.5.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων
τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
Διάγραμμα 6.5.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών
αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης......91
Διάγραμμα 6.6.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων
των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα
```

Διάγραμμα 6.6.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα Διάγραμμα 6.6.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης......100 Διάγραμμα 6.7.1: Εξέλιξη του μέσου βάθους προσβολής και της μέσης διαμέτρου όλων των τρημμάτων και των περιογών αποφλοίωσης με τον γρόνο έκθεσης στο διάλυμα Διάγραμμα 6.7.2: Εξέλιξη του βάθους προσβολής και της διαμέτρου των βαθύτερων τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης......108 Διάγραμμα 6.7.3: Εξέλιξη της πυκνότητας των τρημμάτων και των περιοχών αποφλοίωσης με τον χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης......109 Διάγραμμα 6.8.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) μέσο βάθος των οπών που προκύπτουν από και το τn διάβρωση......116 Διάγραμμα 6.8.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σγέση με τον γρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO<sub>3</sub>, 6,3 ml HNO<sub>3</sub>, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4) των οπών που από μέση διάμετρο προκύπτουν τη και τn Διάγραμμα 6.8.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) και το μέσο βάθος των 10 βαθύτερων τρημμάτων που προκύπτουν από τη Διάγραμμα 6.8.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + - 3 °C και pH=0,4) και τη μέση διάμετρο των 10 βαθύτερων τρημμάτων που προκύπτουν από τη Διάγραμμα 6.8.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4) και τον αριθμό των τρημμάτων / 100 mm<sup>2</sup> που προκύπτουν από τη διάβρωση......120 Διάγραμμα 6.8.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων υλικών σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης τους σε οξυ (τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει χημικές ενώσεις σε αναλογίες: 234 gr NaCl, 50 gr KNO3, 6,3 ml HNO3, αραιωμένες σε 1 lt απιονισμένο νερό, σε θερμοκρασία διαλύματος σταθερή στους 25 + -3 °C και pH=0,4)
και	των	περιοχών	αποφλοίωσης	που	προκύπτουν	από	τη
διάβρ	ωση						.121
Διάγρ	αμμα 7.2	2.1: Κυκλική π	τοτενσιοδυναμική	πόλωση	ανοξείδωτου χά	λυβα 316	L σε
υδατι	 ςό διάλυμ	ια 3,5% NaCl.	Τα βέλη δείχνουν	την πορε	α του διαγράμμ	ατος	.125
Διάγραμμα 7.2.2: Ορθή ποτενσιοδυναμική πόλωση ανοξείδωτου χάλυβα 316L σε							
υδατικό διάλυμα 3,5% NaCl. Άνωθεν της κόκκινης γραμμής είναι το ανοδικό μέρος							
της πόλωσης και κάτωθεν το καθοδικό μέρος125							
Διάγρ	αμμα 7.2	2.3: Κυκλική π	τοτενσιοδυναμική	πόλωση	ανοξείδωτου χάλ	λυβα 316	L σε
υδατικό διάλυμα 3,5% NaCl. Με την μαύρη καμπύλη απεικονίζεται η ορθή πόλωση							
και με το κόκκινο η ανάστροφη πόλωση. Επίσης απεικονίζονται το δυναμικό							
διάβρωσης (Ecorr), δυναμικό διάβρωσης ανατροφής πόλωσης (Ecorr,rev)126							
Διάγραμμα 7.2.4: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al-							
7%Co σε διάλυμα 3,5% NaCl. Διακρίνονται οι ενεργές περιοχές διάβρωσης και η							
παθητ	ική/ψευδ	οπαθητική περ	οιοχή				.127
Διάγραμμα 7.2.5: Καμπύλη κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωσης του κράματος Al-							
7%Cc	ο σε διά	λυμα 3,5% Ν	NaCl. Διακρίνετα	ι η ταυτ	όχρονη ύπαρξη	θετικού	και
αρνητ	ικού βρό	γχου υστέρησ	ης ενώ το δυναμικ	ό διάβρω	σης της ανάστρο	οφης πόλα	οσης
είναι 1	τιο ευγεν	ές σε σχέση με	εκείνο της ορθής	πόλωσης			.128
Διάγρ	αμμα 7.7	7.1.1: Καμπύλ	η κυκλικής ποτεν	σιοδυναμ	ιικής πόλωσης ΄	του κράμ	ατος
AI105	0 (πείραι	μα 1, δεδομένα	α υπολογιστή), σε (	),5 M HC			.134
Διάγρ	αμμα 7.7	/.1.2: Καμπύλ	η κυκλικής ποτεν	σιοδυναμ	ιικής πόλωσης ΄	του κράμ	ατος
AII05	0 (πείραι	ια Ι, δεδομένο	$(excel)$ ), $\sigma \in 0.5$ M	HCI		······,	.135
Διαγρ	αμμα /./	(.2.1: Καμπυλ	η κυκλικης ποτεν	σιοουναμ	ιικης πολωσης ΄	του κραμ	ατος
AIIUS	0 (πειραι	ια 2, οεοομενο 1 2 2: Καιταίλ	ι υπολογιστη), σε (	),5 M HC	l		.136
Διαγρ	αμμα /./	(.2.2: Καμπυλ	η κυκλικης ποτεν	σιοουναμ μει	ιικης πολωσης	του κραμ	ατος
ALIUS	ου (πειραμ	1α 2, οεοομενο 1 2 1. Καιτ <del>α</del> ίλ	$(excel)$ ), $\sigma \in 0,5$ M	HCI		<i></i>	.13/
Διαγρ	αμμα /./	(.5.1: Καμπυλ	η κυκλικής ποτεί	σιοσυναμ	ιικης πολωσης ΄ Cl	του κραμ	ατος
Ano	ο (πειραι	μα 5, σεσομενά 1 2 2. Καμπύλ	α υπολογιότη)), δε		CI	·····	.130
Διαγρ	αμμα 7.7 Ο (πείοαι	(.5.2. Καμπυλ	$(\alpha \times \alpha \alpha)$ $(\alpha \times \alpha \alpha \times \alpha \alpha)$	01000vaj UC1	ιικής πολωσής	ιου κραμ	120
$\Lambda_1$ άνοαμμα 7.7.4: Σύνκοιση αποτελεσμάτων πολώσεων 3 πειοαμάτων) σε 0.5 M HCl							
Διαγρ	սμμα /./	.τ. 20γκριση ι	unoieneopuitov m	100200	<i>5 π</i> ειραματών),	06 0,5 WI	140
•••••	• • • • • • • • • • • •	••••••	•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	••••••	•••••	.140