

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

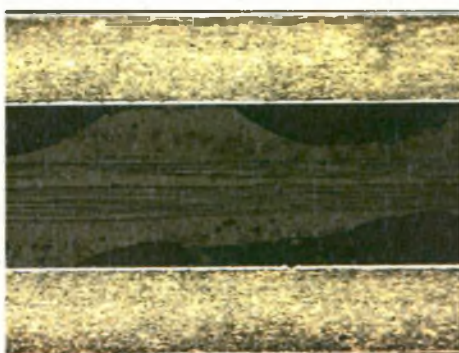
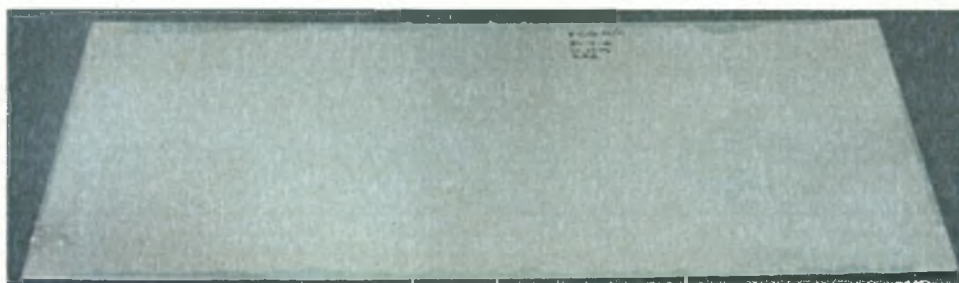
Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

GLARE

ΥΠΟ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΑΡΧΟΝΤΟΠΟΥΛΟΥ



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

Βόλος, Ιούλιος 2006



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

Αριθ. Εισ.: 4813/1
Ημερ. Εισ.: 09-11-2006
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2006
ΑΡΧ

© 2006 Αναστάσιος Αρχοντόπουλος

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

Εγκρίθηκε από τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Αντώνης Κατσαμάς
Διδάσκων ΠΔ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
Διδάσκων ΠΔ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την ανάθεση της εργασίας, την καθοδήγησή του και την παραχώρηση του χώρου και του εξοπλισμού του εργαστηρίου υλικών. Είμαι απόλυτα ευγνώμον στον καθηγητή και μέλος της εξεταστικής επιτροπής κ. Αντώνη Κατσαμά για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου και την υπομονή που έδειξε απέναντι μου κατά τη συγγραφή της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Νικόλαο Χασιώτη, τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πληροφορίες που προσέφερε. Ακόμα να ευχαριστήσω τις κ. Άννα Ζερβάκη και Ελένη Καμούτση για την βοήθειά τους σε ότι αφορούσε τις εργαστηριακές διαδικασίες, τον καθηγητή κ. Βασίλη Μποντόζογλου για την παραχώρηση εργαστηριακού εξοπλισμού, την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία για την παραχώρηση του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και την Εταιρία Βιομηχανικής Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης Μετάλλων για την παραχώρηση νερού συγκεκριμένων προδιαγραφών που χρειάστηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων της εργασίας. Ευχαριστώ τη συνάδελφό μου Αλεξάνδρα Σαλάτα για την συνεργασία και τη βοήθειά της κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και τη συγγραφή της εργασίας και τους φίλους μου Δημήτρη Γκαβάγια, Σταύρο Αυγερινό, Θοδωρή Γιαννόπουλο, Δήμητρα Σαραντοπούλου και Μαρία Τζαναβάρα, που αν και δεν είχαν καμία ανάμειξη στην εργασία βοήθησαν στηρίζοντάς με και κάνοντας υπομονή όταν η εργασία καταλάμβανε το μεγαλύτερο μερίδιο του χρόνου μου. Τέλος, θέλω να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Ηλία και Διονυσία, και τον αδερφό μου Δημήτρη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους, ηθική και οικονομική, όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Αφιερώνω αυτή την εργασία σε όλους τους γονείς που αγωνίζονται για να συντηρήσουν φοιτητές.

Βόλος, Ιούλιος 2006
Αρχοντόπουλος Τάσος

ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ GLARE

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΑΡΧΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2006

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Φυσικής
Μεταλλουργίας – Ανάπτυξης κραμάτων & Σύγχρονων Κατεργασιών.

Περίληψη

Το Glare είναι ένα σύνθετο πολυστρωματικό υλικό που βρίσκει εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία. Παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι των ευρέως χρησιμοποιούμενων συμβατικών αεροπορικών κραμάτων αλουμινίου, από τα οποία σημαντικά είναι η αντοχή σε κόπωση και η εξοικονόμηση βάρους. Τα χαρακτηριστικά αυτά του Glare οδηγούν σε ασφαλείς και οικονομικές αεροπορικές κατασκευές.

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η πραγματοποίηση μελέτης διάβρωσης υλικού τύπου Glare που κατασκευάζεται από την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης με σκοπό τη διερεύνηση της διαβρωτικής συμπεριφοράς του υλικού.

Στην αρχή της εργασίας παρέχεται βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία περιλαμβάνει γενικές πληροφορίες για τη δομή, την τυποποίηση, τις ιδιότητες, κλπ του Glare και για θέματα που αφορούν τη διάβρωση, όπως θεωρητική προσέγγιση, μορφές και τρόποι αντιμετώπισής της κλπ. Οι αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγγραφή του κάθε κεφαλαίου δίνονται στο τέλος του καθενός.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι πειραματικές δοκιμές διάβρωσης, αποφλοιώσης (Exfoliation corrosion test, EXCO) και διαδοχικών εμβαπτίσεων (Alternate Immersion test, AI), που πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματά τους. Αυτά περιλαμβάνουν την παρατήρηση της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων μακροσκοπικά και σε στερεοσκόπιο, την παρατήρηση μεταλλογραφικών τομών των δοκιμίων σε οπτικό μικροσκόπιο και την μέτρηση της μεταβολής μάζας των δοκιμίων, της μεταβολής της οξύτητας του διαβρωτικού διαλύματος (μόνο στη δοκιμή EXCO) και του ρυθμού διάβρωσης. Κατά τη δοκιμή EXCO η μεταβολή της απώλειας μάζας των δοκιμίων ήταν μικρή κατά τις

πρώτες και τις τελευταίες ώρες της δοκιμής, ενώ στους ενδιάμεσους χρόνους έκθεσης ήταν έντονη. Αντίστοιχη συμπεριφορά είχε και η μεταβολή της τιμής pH του διαβρωτικού διαλύματος, ενώ ο ρυθμός διάβρωσης αυξανόταν ως τα μέσα της δοκιμής και στη συνέχεια μειωνόταν. Κατά τη δοκιμή ΑΙ η απορρόφηση υγρασίας δεν επέτρεψε την ακριβή μέτρηση της απώλειας μάζας των δοκιμίων η οποία από την οπτική παρατήρηση των δοκιμίων φαίνεται να είναι ανάλογη του χρόνου έκθεσης, που σημαίνει σταθερό ρυθμό διάβρωσης. Και οι δύο δοκιμές διάβρωσης οδήγησαν στην παρατήρηση πως η διαβρωτική δράση εξελίχθηκε περικρυσταλλικά και μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις σχηματίστηκαν τρήματα. Ακόμα, επιβεβαιώθηκαν ο προστατευτικός χαρακτήρας της χρωμικής ανοδίουσης και η λειτουργία των ενδιάμεσων στρωμάτων του Glare σαν φράγματα της διάβρωσης. Επιπλέον, φάνηκε η έναρξη της διαβρωτικής δράσης από τις απροστάτευτες περιοχές των δοκιμίων.

Στο τέλος της εργασίας συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και προτείνονται ενέργειες για μελλοντική εργασία.

Πίνακας περιεχομένων.	σελίδα
Κατάλογος πινάκων.	x
Κατάλογος σχημάτων.	xi
Κεφάλαιο 1: Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας.	1
Κεφάλαιο 2: Glare, ένα σύνθετο πολυστρωματικό υλικό.	3
2.1 Εισαγωγή.	3
2.2 Ιστορική ανασκόπηση των FML.	5
2.2.1 Μεταλλικά πολυστρωματικά υλικά.	5
2.2.2 Σύνθετα και σύνθετα πολυστρωματικά υλικά.	5
2.2.3 Arall, το πρώτο FML.	6
2.2.4 Glare, ο αντικαταστάτης του Arall.	7
2.2.5 Η επόμενη γενιά των FML.	7
2.3 Το Glare.	8
2.3.1 Τυποποίηση, ονοματολογία, δομή και κατασκευή του Glare.	9
2.3.2 Τα ξεχωριστά «συστατικά» του Glare.	10
2.3.2.α. Αλουμίνιο 2024-T3.	11
2.3.2.β BR 127 αναχαιπιστής διάβρωσης.	15
2.3.2.γ Ρητίνη FM 94 Modified Epoxy film.	16
2.3.2.δ Ίνες γυαλιού S-glass.	18
2.3.3 Ιδιότητες του Glare.	18
2.3.4 Εφαρμογή του Glare.	24
2.3.5 Τεχνική παραγωγής υλικού μεγάλων διαστάσεων.	24
Κεφάλαιο 3: Διάβρωση.	28
3.1 Εισαγωγή.	28
3.2 Θεωρία της διάβρωσης.	29
3.2.1 Θερμοδυναμική της διάβρωσης.	30
3.2.2 Διάβρωση σε μη αγώγιμο περιβάλλον (αέρια διάβρωση).	31
3.2.3 Διάβρωση σε αγώγιμο περιβάλλον (υδατική διάβρωση).	32
3.3 Μορφές διάβρωσης.	36
3.3.1 Γενική διάβρωση.	36
3.3.2 Συγκεντρωμένη διάβρωση.	37
3.3.3 Διάβρωση υποκινούμενη από μεταλλουργικούς παράγοντες.	39
3.3.4 Υποβάθμιση υποβοηθούμενη από μηχανικά αίτια.	40
3.3.5 Ρηγμάτωση επιβαλλόμενη από περιβαλλοντικά αίτια.	41

3.4 Αντιδιαβρωτική προστασία.	42
3.4.1 Ρύθμιση περιβαλλοντικών παραγόντων και επιλογή υλικού.	42
3.4.2 Κατάλληλος μηχανολογικός σχεδιασμός.	43
3.4.3 Προστατευτικές επικαλύψεις.	43
3.4.4 Προστασία πάνω σε θερμοδυναμική και ηλεκτροχημική βάση.	44
3.5 Διάβρωση των αεροπορικών κραμάτων αλουμινίου 2xxx.	44
3.5.1 Διάβρωση στα αεροσκάφη.	45
3.5.2 Διάβρωση του αλουμινίου.	46
Κεφάλαιο 4: Πειραματικό μέρος.	50
4.1 Εισαγωγή-σκοπός των πειραμάτων.	50
4.2 Περιγραφή του υλικού που χρησιμοποιήθηκε.	51
4.3 Διαδικασίες επεξεργασίας δοκιμών.	55
4.3.1 Προετοιμασία δοκιμών για το πείραμα.	55
4.3.2 Καθαρισμός δοκιμών μετά το πέρας του πειράματος και μέτρηση της απώλειας μάζας.	56
4.3.3 Προετοιμασία μεταλλογραφικών δοκιμών.	57
4.4 Δοκιμή διάβρωσης αποφλοίωσης.	58
4.4.1 Σύσταση και παρασκευή του διαβρωτικού διαλύματος.	59
4.4.2 Προετοιμασία των δοκιμών.	60
4.4.3 Πειραματική διαδικασία.	61
4.5 Δοκιμή διαδοχικών εμβαπτίσεων.	62
4.5.1 Σύσταση και παρασκευή του διαβρωτικού διαλύματος	63
4.5.2 Προετοιμασία των δοκιμών.	63
4.5.3 Πειραματική διαδικασία.	64
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης.	68
5.1 Εισαγωγή.	68
5.2 Αποτελέσματα δοκιμής EXCO.	68
5.2.1 Μακροσκοπική φωτογράφιση.	68
5.2.2 Στερεοσκοπικός έλεγχος.	71
5.2.3 Απώλεια μάζας, μεταβολή οξύτητας και ρυθμός διάβρωσης.	74
5.2.4 Οπτικός έλεγχος μεταλλογραφικών τομών.	78
5.2.5 Χαρακτηρισμός των τρημάτων.	85
5.3 Αποτελέσματα δοκιμής Al.	87
5.3.1 Μακροσκοπική φωτογράφιση.	87
5.3.2 Στερεοσκοπικός έλεγχος.	90
5.3.3 Απώλεια μάζας και ρυθμός διάβρωσης.	92

5.3.4 Οπτικός έλεγχος μεταλλογραφικών τομών.	94
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης.	102
6.1 Εισαγωγή.	102
6.2 Συζήτηση των αποτελεσμάτων της δοκιμής EXCO.	102
6.3 Συζήτηση των αποτελεσμάτων της δοκιμής AI.	109
6.4 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.	114
Παράρτημα Α: Μητρώα πειραματικών δοκιμών.	116
A.1 Μητρώα δοκιμών δοκιμής EXCO.	116
A.2 Μητρώα δοκιμών δοκιμής AI.	121
Παράρτημα Β: Μετρήσεις συνθηκών δοκιμής AI.	126
Παράρτημα Γ: Στερεοσκοπία και οπτική μικροσκοπία δοκιμών δοκιμής EXCO.	128
Παράρτημα Δ: Μακροσκοπική φωτογράφιση, στερεοσκοπία και οπτική μικροσκοπία δοκιμών δοκιμής AI.	138

Κατάλογος πινάκων.

σελίδα

Πίνακας 2.1:	Τύποι Glare και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.	9
Πίνακας 2.2:	Σύγκριση λόγου αντοχής προς βάρος Al - St.	11
Πίνακας 2.3:	Ονομαστική χημική σύσταση του κράματος 2024 (% κ.β.).	12
Πίνακας 2.4:	Σύγκριση βασικών μηχανικών ιδιοτήτων κράματος 2024-0 & 2024-T3.	15
Πίνακας 2.5:	Βασικά στοιχεία θειικής και χρωμικής ανοδίσωσης αλουμινίου.	15
Πίνακας 2.6:	Μηχανικές ιδιότητες διάφορων ινών και σύγκριση με Al 2024 T3.	18
Πίνακας 2.7:	Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων Glare, Al 2024 T3 και S-glass ινών.	19
Πίνακας 3.1:	Μέρος της πρότυπης σειράς ηλεκτρεγερτικών δυναμικών.	32
Πίνακας 3.2:	Περιβάλλον και υλικό για SCC.	41
Πίνακας 3.3:	Ηλεκτροδιακό δυναμικό κραμάτων αλουμινίου και δευτερευουσών φάσεων.	46
Πίνακας 4.1:	Σύνοψη χαρακτηριστικών των παρτίδων υλικού που παρελήφθησαν.	54
Πίνακας 4.2:	Βάρος, διαστάσεις, χρόνος έκθεσης και τύπος υλικού των δοκιμών EXCO.	60
Πίνακας 4.3:	Βάρος, διαστάσεις, χρόνος έκθεσης και τύπος υλικού των δοκιμών Al.	64
Πίνακας 4.4:	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής Al.	65
Πίνακας 5.1:	Απώλεια βάρους των δοκιμών E1 και E2.	76
Πίνακας 5.2:	Απώλεια βάρους και τιμές pH του διαλύματος για τα δοκίμια E4.	76
Πίνακας 5.3:	Μεταβολή βάρους, επιφάνεια έκθεσης, χρόνος έκθεσης και ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών EXCO.	77
Πίνακας 5.4:	Χαρακτηρισμός της επιφάνειας των δοκιμών EXCO.	86
Πίνακας 5.5:	Μεταβολή βάρους, % απώλεια μάζας, επιφάνεια έκθεσης, χρόνος έκθεσης και ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών Al.	94
Πίνακας 5.6:	Χαρακτηρισμός της επιφάνειας των δοκιμών Al.	101
Πίνακας 6.1:	pH διαλύματος και επιφανειακή κατάσταση δοκιμών E4.	105
Πίνακας B.1:	Μητρώο μετρήσεων δοκιμής Al.	126
Πίνακας B.2:	Μετρήσεις νερού διαλύματος δοκιμής Al.	127

Κατάλογος σχημάτων.

σελίδα

Σχήμα 2.1:	Οι κατηγορίες των μηχανολογικών υλικών.	3
Σχήμα 2.2:	Τυπική διάταξη σύνθετου πολυστρωματικού υλικού.	4
Σχήμα 2.3:	Μηχανισμός βελτίωσης της αντοχής σε κόπωση.	6
Σχήμα 2.4:	Δομή υλικού Glare 3-3/2-0.4.	9
Σχήμα 2.5:	Τομή υλικού τύπου Glare-2/1-0.4mm.	10
Σχήμα 2.6:	Διμερές διάγραμμα φάσεων Al-Cu.	13
Σχήμα 2.7:	Μικροδομή Al 2024-T3.	14
Σχήμα 2.8:	Επίδραση θερμοκρασίας και χρόνου γήρανσης στο κράμα 2024.	17
Σχήμα 2.9:	Πρωώθηση ρήγματος σε δοκιμή κόπωσης.	20
Σχήμα 2.10:	Πρωώθηση ρήγματος σε δοκιμή κόπωσης μετά από κρούση.	21
Σχήμα 2.11:	Σύγκριση εύρους διαβρωτικής προσβολής σε Al 2024 T3 και Glare 5/4.	22
Σχήμα 2.12:	Απορρόφηση υγρασίας από Al 2024 T3, Glare 3/2 και prepreg.	23
Σχήμα 2.13:	Υποψήφια σημεία εφαρμογής του Glare.	24
Σχήμα 2.14:	Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής Splicing.	25
Σχήμα 2.15:	Εφαρμογή του Glare στο περίβλημα της ατράκτου του A380.	25
Σχήμα 3.1:	Μηχανικό ανάλογο της ελεύθερης ενέργειας Gibbs.	30
Σχήμα 3.2:	Το διπλό ηλεκτροχημικό στρώμα.	32
Σχήμα 3.3:	Ηλεκτρολυτικό κελί.	33
Σχήμα 3.4:	Διάγραμμα Pourbaix για τον σίδηρο.	34
Σχήμα 3.5:	Η γαλβανική σειρά των υλικών σε θαλασσινό νερό.	35
Σχήμα 3.6:	Μηχανισμός τρημματικής διάβρωσης.	38
Σχήμα 3.7:	Μηχανισμός σχισματικής διάβρωσης.	38
Σχήμα 3.8:	Διάβρωση εκτριβής με ηλεκτρολυτική δράση.	40
Σχήμα 3.9:	Περιοχές ευαίσθητες σε διάβρωση.	43
Σχήμα 3.10:	Αποκόλληση μέρους τους ατράκτου, πιθανή αιτία η διάβρωση.	45
Σχήμα 3.11:	Διάγραμμα Pourbaix για το αλουμίνιο.	47
Σχήμα 4.1:	Πρώτη παρτίδα υλικού, stripes διαστάσεων 50x200mm.	51
Σχήμα 4.2:	Επιλογή δοκιμίων από το plate FCG2-a.	52
Σχήμα 4.3:	Τρίτη παρτίδα υλικού, FCG4-c διαστάσεων 160x400mm.	53
Σχήμα 4.4:	Τέταρτη παρτίδα υλικού, FCG4-c διαστάσεων 120x400mm.	53
Σχήμα 4.5:	Παραμόρφωση φύλλων αλουμινίου λόγω prepreg μεταβλητού πάχους.	54
Σχήμα 4.6:	Εντατική κατάσταση της επιφάνειας λόγω παραμόρφωσης, κάτοψη.	54
Σχήμα 4.7:	Μέρος του πίνακα επιλογής χημικής διεργασίας καθαρισμού από τα προϊόντα διάβρωσης.	56

Σχήμα 4.8:	Απώλεια μάζας των διαβρωμένων δοκιμίων εξαιτίας των επαναλαμβανόμενων καθαρισμών.	57
Σχήμα 4.9:	Διάβρωση αποφλοιώσης.	59
Σχήμα 4.10:	Περικρυσταλλική διάβρωση.	59
Σχήμα 4.11:	Πειραματική διάταξη δοκιμής EXCO.	61
Σχήμα 4.12:	Μητρώα δοκιμίων για τη δοκιμή αποφλοιώσης (EXCO).	62
Σχήμα 4.13:	Πειραματική διάταξη δοκιμής Al.	65
Σχήμα 4.14:	Μητρώα δοκιμίων για τη δοκιμή διαδοχικών εμβαπτίσεων (Al).	67
Σχήμα 5.1:	Φωτογραφίες της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων E4 πριν τον καθαρισμό τους.	69
Σχήμα 5.2:	Φωτογραφίες της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων E4 μετά τον καθαρισμό τους.	70
Σχήμα 5.3:	Στερεοσκοπική εξέταση του δοκιμίου E4(02).	71
Σχήμα 5.4:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E4(24) και E4(30), ομοιόμορφη προσβολή της επιφάνειας.	72
Σχήμα 5.5:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E4(30) και E4(36), τρημματική διάβρωση.	72
Σχήμα 5.6:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E4(48) και E4(96), διάβρωση αποφλοιώσης.	73
Σχήμα 5.7:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E4(02) και E4(48), έντονη προσβολή των ακμών.	73
Σχήμα 5.8:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E1(48) και E2(48), τρημματική διάβρωση (:).	74
Σχήμα 5.9:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E1(96) και E2(96), διάβρωση αποφλοιώσης.	74
Σχήμα 5.10:	Επί τοις εκατό απώλεια βάρους των δοκιμίων EXCO συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.	75
Σχήμα 5.11:	Μεταβολή του pH του διαβρωτικού διαλύματος για τα δοκίμια E4.	75
Σχήμα 5.12:	Ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων EXCO.	77
Σχήμα 5.13:	Δοκίμιο E1(48), προσβολή της επιφανειακής προστασίας.	78
Σχήμα 5.14:	Δοκίμιο E2(48), προσβολή της επιφανειακής προστασίας.	79
Σχήμα 5.15:	Δοκίμιο E1(96), διάβρωση αποφλοιώσης.	79
Σχήμα 5.16:	Δοκίμιο E2(96), διάβρωση αποφλοιώσης.	79
Σχήμα 5.17:	Δοκίμιο E4(02), σχεδόν απρόσβλητη επιφάνεια.	80
Σχήμα 5.18:	Δοκίμιο E4(24), ομοιόμορφη προσβολή της επιφανειακής προστασίας.	80
Σχήμα 5.19:	Δοκίμιο E4(30), ολοκληρωτική προσβολή της επιφανειακής προστασίας.	81
Σχήμα 5.20:	Δοκίμιο E4(36), έντονη τρημματική διάβρωση.	81
Σχήμα 5.21:	Δοκίμιο E4(48), περιοχές με διάβρωση αποφλοιώσης σε αρχικό και προχωρημένο στάδιο.	82
Σχήμα 5.22:	Δοκίμιο E4(96), διάβρωση αποφλοιώσης.	82
Σχήμα 5.23:	Έντονη διάβρωση στα άκρα των δοκιμίων και κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prepreg.	83

Σχήμα 5.24:	Κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης στην εσωτερική πλευρά του αλουμινίου, δοκίμιο E4(96).	83
Σχήμα 5.25:	Περικρυσταλλική διάβρωση.	84
Σχήμα 5.26:	Διάβρωση στο εσωτερικό των κόκκων, δοκίμιο E4(36).	85
Σχήμα 5.27:	Διάφορες μορφές του σχήματος της διατομής τρημάτων	85
Σχήμα 5.28:	Τυποποιημένος πίνακας κατάταξης τρημάτων	86
Σχήμα 5.29:	Φωτογραφίες των δοκιμίων Al αμέσως μετά τον καθαρισμό τους, επιφάνεια I.	88
Σχήμα 5.30:	Τυπική όψη των δοκιμίων Al αμέσως πριν τον καθαρισμό τους, δοκίμιο Al(90), επιφάνεια I.	89
Σχήμα 5.31:	Κατακράτηση αλάτων στις διαβρωμένες περιοχές, λεπτομέρεια του σχήματος 5.30.	89
Σχήμα 5.32:	Λεπτομέρειες των ακμών.	90
Σχήμα 5.33:	Στερεοσκοπική εξέταση του δοκιμίου Al(02).	90
Σχήμα 5.34:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων (α) Al(05) και (β) Al(10).	90
Σχήμα 5.35:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων (α) Al(15) και (β) Al(31).	91
Σχήμα 5.36:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων (α) Al(45) και (β) Al(60).	91
Σχήμα 5.37:	Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων (α) Al(75) και (β) Al(90).	91
Σχήμα 5.38:	Στερεοσκοπική εξέταση ακμών.	92
Σχήμα 5.39:	Περιοχές με επιφανειακά ελαττώματα.	92
Σχήμα 5.40:	Επί τοις εκατό μεταβολή μάζας των δοκιμίων Al συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.	93
Σχήμα 5.41:	Ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων Al.	94
Σχήμα 5.42:	Δοκίμιο Al(02), σχεδόν κανένα σημάδι διαβρωτικής προσβολής.	95
Σχήμα 5.43:	Δοκίμιο Al(05), μικρή προσβολή των παράπλευρων επιφανειών.	95
Σχήμα 5.44:	Δοκίμιο Al(10), κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης και προσβολή των απροστάτευτων ακμών.	96
Σχήμα 5.45:	Δοκίμιο Al(15), κατανάλωση χρωμικής ανοδίσωσης, αποκόλληση κόκκων υλικού και περικρυσταλλική διάβρωση.	96
Σχήμα 5.46:	Δοκίμιο Al(31), κατανάλωση χρωμικής ανοδίσωσης, αποκόλληση κόκκων υλικού και έντονη περικρυσταλλική διάβρωση.	97
Σχήμα 5.47:	Δοκίμιο Al(45), έντονη περικρυσταλλική διάβρωση και στις δύο τομές.	97
Σχήμα 5.48:	Δοκίμιο Al(60), περικρυσταλλική και τρηματική διάβρωση.	98
Σχήμα 5.49:	Δοκίμιο Al(75), διαχωρισμός των στρωμάτων του Glare (delamination).	98
Σχήμα 5.50:	Δοκίμιο Al(90), διαχωρισμός των στρωμάτων, τρηματική διάβρωση και αποφλοίωση.	99
Σχήμα 5.51:	(α) Al(60), απρόσβλητη επιφάνεια μακριά από τις ακμές, διαμήκης τομή, (β) Al(75), τρήματα μακριά από τις ακμές, διαμήκης τομή-επιφάνεια II.	99
Σχήμα 5.52:	Περικρυσταλλική διάβρωση.	100
Σχήμα 6.1:	Διάβρωση αποφλοίωσης.	103

Σχήμα 6.2:	Περικρυσταλλική διάβρωση.	103
Σχήμα 6.3:	Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων E4.	104
Σχήμα 6.4:	Διάγραμμα pH και % ΔW συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων E4.	104
Σχήμα 6.5:	Τρημματική διάβρωση.	106
Σχήμα 6.6:	Δοκίμιο E4(36). (α) στερεοσκοπική εξέταση, (β) μεταλλογραφική τομή.	106
Σχήμα 6.7:	Διάβρωση αποφλοίωσης. (α) δοκίμιο E4(48), (β) E4(96)	107
Σχήμα 6.8:	Περικρυσταλλική διάβρωση.	107
Σχήμα 6.9:	Προσβολή της χρωμικής ανοδίσωσης της διεπιφάνειας και προστασία από στρώμα pperreg.	108
Σχήμα 6.10:	Έναρξη της προσβολής από επιφανειακά ελαττώματα.	109
Σχήμα 6.11:	Προσβολή στις ακμές και τα ελαττώματα της επιφάνειας των δοκιμίων.	109
Σχήμα 6.12:	Προσβολή της ανοδίσωσης.	110
Σχήμα 6.13:	Τρημματική διάβρωση στις απροστάτευτες περιοχές.	110
Σχήμα 6.14:	Δοκίμιο Al(90), αποφλοίωση.	111
Σχήμα 6.15:	Κατακράτηση αλάτων ανάμεσα σε ρητίνη και αλουμίνιο.	111
Σχήμα 6.16:	Διάγραμμα C.R. και ΔW συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων Al.	112
Σχήμα 6.17:	Διαχωρισμός των στρωμάτων λόγω κατακράτησης αλάτων στη διεπιφάνεια.	112
Σχήμα 6.18:	Το διαβρωτικό περιβάλλον δεν επηρεάζει το pperreg.	113
Σχήμα 6.19:	Δοκίμιο Al(45) όπως ήταν αναρτημένο στο διαβρωτικό διάλυμα.	113
Σχήμα A.1:	Μητρώο δοκιμίου E1(48).	116
Σχήμα A.2:	Μητρώο δοκιμίου E1(96).	116
Σχήμα A.3:	Μητρώο δοκιμίου E2(48).	117
Σχήμα A.4:	Μητρώο δοκιμίου E2(96).	117
Σχήμα A.5:	Μητρώο δοκιμίου E4(02).	118
Σχήμα A.6:	Μητρώο δοκιμίου E4(24).	118
Σχήμα A.7:	Μητρώο δοκιμίου E4(30).	119
Σχήμα A.8:	Μητρώο δοκιμίου E4(36).	119
Σχήμα A.9:	Μητρώο δοκιμίου E4(48).	120
Σχήμα A.10:	Μητρώο δοκιμίου E4(96).	120
Σχήμα A.11:	Μητρώο δοκιμίου Al(02).	121
Σχήμα A.12:	Μητρώο δοκιμίου Al(05).	121
Σχήμα A.13:	Μητρώο δοκιμίου Al(10).	122
Σχήμα A.14:	Μητρώο δοκιμίου Al(15).	122

Σχήμα Α.15:	Μητρώο δοκιμίου ΑΙ(31).	123
Σχήμα Α.16:	Μητρώο δοκιμίου ΑΙ(45).	123
Σχήμα Α.17:	Μητρώο δοκιμίου ΑΙ(60).	124
Σχήμα Α.18:	Μητρώο δοκιμίου ΑΙ(75).	124
Σχήμα Α.19:	Μητρώο δοκιμίου ΑΙ(90).	125
Σχήμα Γ.1:	Δοκίμιο Ε1(48), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.	128
Σχήμα Γ.2:	Δοκίμιο Ε1(48), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	128
Σχήμα Γ.3:	Δοκίμιο Ε1(96), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.	129
Σχήμα Γ.4:	Δοκίμιο Ε1(96), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	129
Σχήμα Γ.5:	Δοκίμιο Ε2(48), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.	130
Σχήμα Γ.6:	Δοκίμιο Ε2(48), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	130
Σχήμα Γ.7:	Δοκίμιο Ε2(96), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.	131
Σχήμα Γ.8:	Δοκίμιο Ε2(96), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	131
Σχήμα Γ.9:	Δοκίμιο Ε4(02), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) και (β) μετά τον καθαρισμό.	132
Σχήμα Γ.10:	Δοκίμιο Ε4(02), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	132
Σχήμα Γ.11:	Δοκίμιο Ε4(24), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) και (β) μετά τον καθαρισμό.	133
Σχήμα Γ.12:	Δοκίμιο Ε4(24), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	133
Σχήμα Γ.13:	Δοκίμιο Ε4(30), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) και (β) μετά τον καθαρισμό.	134
Σχήμα Γ.14:	Δοκίμιο Ε4(30), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	134
Σχήμα Γ.15:	Δοκίμιο Ε4(36), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.	135
Σχήμα Γ.16:	Δοκίμιο Ε4(36), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	135
Σχήμα Γ.17:	Δοκίμιο Ε4(48), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.	136
Σχήμα Γ.18:	Δοκίμιο Ε4(48), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	136
Σχήμα Γ.19:	Δοκίμιο Ε4(96), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.	137
Σχήμα Γ.20:	Δοκίμιο Ε4(96), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	137
Σχήμα Δ.1:	Φωτογραφίες των δοκιμίων ΑΙ πριν τη διεξαγωγή της πειραματικής δοκιμής επιταχυνόμενης διάβρωσης, επιφάνεια Ι.	139
Σχήμα Δ.2:	Φωτογραφίες των δοκιμίων ΑΙ πριν τη διεξαγωγή της πειραματικής δοκιμής επιταχυνόμενης διάβρωσης, επιφάνεια ΙΙ.	140

Σχήμα Δ.3:	Φωτογραφίες των δοκιμίων Al αμέσως μετά τον καθαρισμό τους, επιφάνεια II.	142
Σχήμα Δ.4:	Δοκίμιο Al(02), στερεοσκοπικός έλεγχος.	143
Σχήμα Δ.5:	Δοκίμιο Al(02), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	143
Σχήμα Δ.6:	Δοκίμιο Al(05), στερεοσκοπικός έλεγχος.	144
Σχήμα Δ.7:	Δοκίμιο Al(05), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	144
Σχήμα Δ.8:	Δοκίμιο Al(10), στερεοσκοπικός έλεγχος.	145
Σχήμα Δ.9:	Δοκίμιο Al(10), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	145
Σχήμα Δ.10:	Δοκίμιο Al(15), στερεοσκοπικός έλεγχος.	146
Σχήμα Δ.11:	Δοκίμιο Al(15), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	146
Σχήμα Δ.12:	Δοκίμιο Al(31), στερεοσκοπικός έλεγχος.	147
Σχήμα Δ.13:	Δοκίμιο Al(31), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	147
Σχήμα Δ.14:	Δοκίμιο Al(45), στερεοσκοπικός έλεγχος.	148
Σχήμα Δ.15:	Δοκίμιο Al(45), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	148
Σχήμα Δ.16:	Δοκίμιο Al(60), στερεοσκοπικός έλεγχος.	149
Σχήμα Δ.17:	Δοκίμιο Al(60), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	149
Σχήμα Δ.18:	Δοκίμιο Al(75), στερεοσκοπικός έλεγχος.	150
Σχήμα Δ.19:	Δοκίμιο Al(75), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	150
Σχήμα Δ.20:	Δοκίμιο Al(90), στερεοσκοπικός έλεγχος.	151
Σχήμα Δ.21:	Δοκίμιο Al(90), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.	151

Κεφάλαιο 1: Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας.

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη εφαρμογών ιδιαίτερα απαιτητικών, όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών που συνθέτουν τις κατασκευές. Ιδιότητες μηχανικές (αντοχή σε κόπωση, όριο διαρροής, ολκιμότητα, κλπ.) και φυσικές (ηλεκτρική αγωγιμότητα, θερμοδιαχυτότητα, κλπ.) είναι πρωτίστως σημαντικές για τη δομική και τη λειτουργική αξία των κατασκευών. Σε πολλές εφαρμογές σημαντική είναι επίσης η μακροχρόνια αντοχή των κατασκευών, την οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό η υποβάθμιση που υφίστανται οι ιδιότητες των υλικών λόγω διαβρωτικών φαινομένων. Οι παραπάνω λόγοι έχουν οδηγήσει στην προσπάθεια ανάπτυξης νέων υλικών, είτε αυτά είναι συμβατικά (νέα κράματα) ή προηγμένα (σύνθετα) υλικά, που να πληρούν ορισμένες εξ αρχής απαιτούμενες προϋποθέσεις.

Μια τέτοια προσπάθεια είναι και η ανάπτυξη σύνθετων πολυστρωματικών υλικών. Η ανάπτυξη των υλικών αυτών ξεκίνησε από τις αεροπορικές βιομηχανίες. Τα σύνθετα πολυστρωματικά υλικά αν και απολαμβάνουν μια εξέλιξη τριών δεκαετιών με σκοπό την εκτενέστερη εφαρμογή τους, μέχρι σήμερα ο κύριος τομέας εφαρμογής τους είναι η αεροπορική βιομηχανία. Ένα τέτοιο υλικό είναι και το Glare. Σαν σύνθετο πολυστρωματικό υλικό αποτελείται από επαναλαμβανόμενα στρώματα φύλλων αλουμινίου και ενός σύνθετου υλικού που αποτελείται από ρητίνη και εμποτισμένες ίνες γυαλιού. Το Glare εξαιτίας της δομής του παρέχει μια σειρά από χαρακτηριστικές ιδιότητες που το καθιστούν σχεδόν ιδανικό για αρκετά σημεία των αεροσκαφών. Ο λόγος είναι ότι παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεταλλικών υλικών που χρησιμοποιούνται έως σήμερα στα αντίστοιχα σημεία.

Ένα από αυτά τα πλεονεκτήματα του Glare είναι και η αυξημένη αντίσταση σε διάβρωση. Η αντίσταση αυτή συνδυάζεται με την δυνατότητα του Glare να διατηρεί σε μεγάλο βαθμό αναλλοίωτες τις μηχανικές του ιδιότητες σε περίπτωση που έντονη διαβρωτική δράση λάβει χώρα στο υλικό. Η παραπάνω ιδιότητα του Glare είναι η ωθούσα δύναμη για αυτή την εργασία.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας λοιπόν είναι η πραγματοποίηση μιας μελέτης διάβρωσης σύνθετου πολυστρωματικού υλικού Glare. Σκοπός είναι η πραγματοποίηση πειραματικών δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το είδος και το εύρος της διαβρωτικής προσβολής στο υλικό.

Το Glare είναι ένα νέο σχετικά υλικό και όχι ιδιαίτερα γνωστό στο ευρύ κοινό. Για το λόγο αυτό η εργασία ξεκινάει με μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση των σύνθετων πολυστρωματικών υλικών και την περιγραφή της δομής τους και των ιδιοτήτων που

απορρέουν από αυτή την ιδιαίτερη δομή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο Glare, τα ξεχωριστά υλικά που το συνθέτουν και τις χρήσιμες ιδιότητες του. Ταυτόχρονα, επιχειρείται σύγκριση του Glare με το κράμα αλουμινίου 2024-T3, το οποίο είναι ένα από τα τρία κύρια συστατικά του και το υλικό που χρησιμοποιείται σήμερα κατά κόρον στην αεροπορική βιομηχανία.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή εισαγωγή στις βασικές αρχές που διέπουν τα διαβρωτικά φαινόμενα. Η γνώση των αρχών αυτών είναι απαραίτητη για να μπορέσει να κατανοήσει κανείς τη διαβρωτική δράση, τις αιτίες που την προκαλούν και τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται και να είναι σε θέση να προτείνει ενέργειες για την αποτελεσματική προστασία των κατασκευών. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται αναφορά των διαβρωτικών φαινομένων που εμφανίζονται στις αεροπορικές κατασκευές και παρουσιάζεται η συμπεριφορά σε διάβρωση του κράματος αλουμινίου 2024-T3. Ο λόγος είναι ότι το μέρος του Glare που επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη διαβρωτική δράση είναι τα εξωτερικά φύλλα αλουμινίου 2024-T3.

Στη συνέχεια της εργασίας περιγράφεται το υλικό που χρησιμοποιήθηκε και γίνεται αναλυτική παρουσίαση των πειραματικών δοκιμών διάβρωσης οι οποίες διεξήχθησαν. Ακολουθεί η πλήρης παρουσίαση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν. Στο τελευταίο κεφάλαιο επιχειρείται η επεξήγηση των αποτελεσμάτων αυτών και παρουσίαση των συνολικών συμπερασμάτων για τη διαβρωτική συμπεριφορά του υλικού.

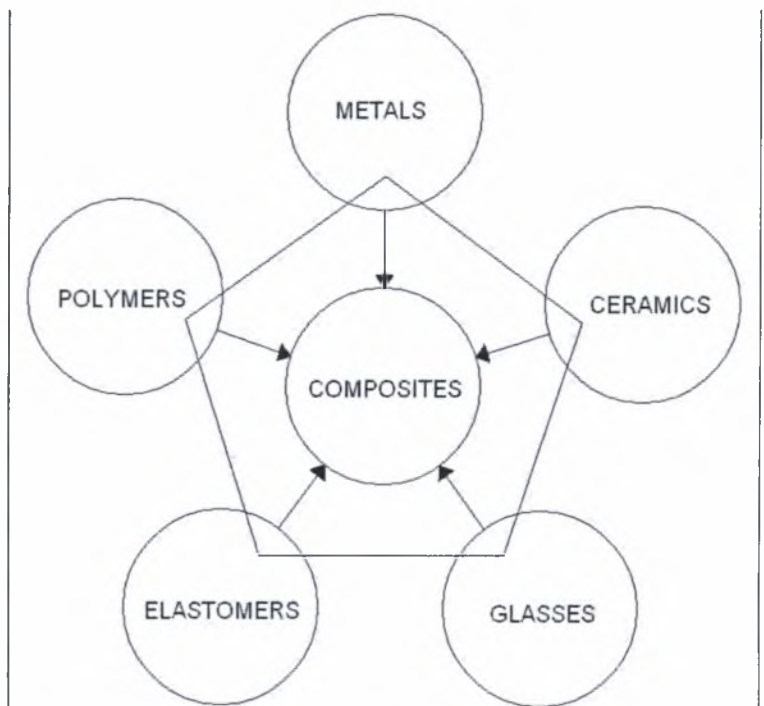
Κεφάλαιο 2: Glare, ένα σύνθετο πολυστρωματικό υλικό.

2.1 Εισαγωγή.

Κατά τη μελέτη και ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος λαμβάνονται υπόψη διάφορες παράμετροι, όπως ο τρόπος λειτουργίας, η μέθοδος κατασκευής, η παραγωγική διαδικασία, κλπ. Σε όλα τα παραπάνω σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η επιλογή των υλικών τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του προϊόντος.

Η αρχική επιλογή υλικού γίνεται βάση των απαιτήσεων και των προδιαγραφών που πρέπει να πληροί το προϊόν. Η διαδικασία επιλογής υλικού δεν είναι καθόλου τετριμμένη. Οι μελετητές-σχεδιαστές-μηχανικοί πρέπει να είναι σε θέση, λαμβάνοντας υπ' όψιν πληθώρα παραμέτρων, να επιλέξουν μέσα από έξι γενικές κατηγορίες -γυαλιά, μέταλλα, ελαστομερή, πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα υλικά (σχήμα 2.1)- και δεκάδες χιλιάδων υλικών το κατάλληλο.

Παρά τον μεγάλο αριθμό υλικών που είναι διαθέσιμα στον άνθρωπο πολλές φορές η ανάγκη για βελτιστοποίηση της απόδοσης των προϊόντων, νέων και μη, οδήγησε στο συνδυασμό των παραπάνω υλικών για τη δημιουργία νέων σύνθετων υλικών (composites). Η ιδέα των σύνθετων υλικών βασίζεται στο «πάντρεμα» δύο ή περισσότερων υλικών, με σκοπό τη δημιουργία ενός υλικού το οποίο θα διατηρεί τις επιθυμητές ιδιότητες των συστατικών του και θα ελαχιστοποιεί τα μειονεκτήματά του καθενός. Τα πιο κοινά σύνθετα υλικά σχηματίζονται από μια πολυμερική μήτρα ενισχυμένη συνήθως με ίνες, όπως τα ανθρακονήματα (CFRP, Carbon Fibre Reinforced Polymers), ενώ υπάρχουν και τα MMCs (Metal Matrix Composites), τα οποία αποτελούνται από μεταλλική μήτρα που ενισχύεται με

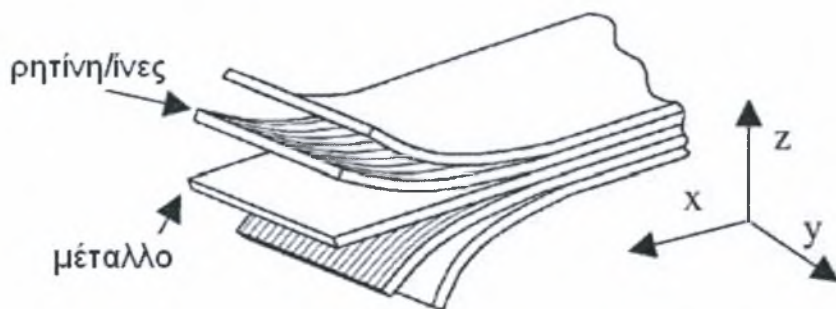


Σχήμα 2.1: Οι κατηγορίες των μηχανολογικών υλικών [1].

διασπορά σωματιδίων από κεραμικά υλικά (κυρίως καρβίδια). Χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών με πολυμερική μήτρα είναι ότι προσφέρουν μηχανικές ιδιότητες πολύ κοντά στις ιδιότητες των ευρέως χρησιμοποιούμενων μεταλλικών υλικών, με πολύ μικρότερη πυκνότητα που σημαίνει ελαφρύτερες κατασκευές. Μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας είναι το πολύ υψηλό τους κόστος σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που θέτουν οι πολυμερικές μήτρες, όπως για παράδειγμα η αδυναμία χρήσης τους σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών.

Οι δυσκολίες που εμφανίζονται κατά τη μορφοποίηση και κατεργασία των σύνθετων υλικών είναι αυτές που ανεβάζουν το κόστος τους σε πολύ υψηλά επίπεδα. Αυτός είναι και ο λόγος που η χρήση τους έχει περιοριστεί σε εξεζητημένες και υψηλής τεχνολογίας εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στα μονοθέσια της φόρμουλα 1 ή σε αθλητικό εξοπλισμό, όπως ανθρακονημάτινα μπαστούνια του γκολφ και ποδήλατα [2]. Παρόλα αυτά η περιορισμένη χρήση των σύνθετων υλικών δεν πρέπει να επηρεάζει αρνητικά καθότι πρόκειται για ιδιαίτερα προηγμένα υλικά με πολύ καλή μηχανική συμπεριφορά.

Κυρίως το υψηλό κόστος, καθώς και οι συνθήκες της εποχής κατά την οποία αναπτύχθηκαν τα πρώτα σύνθετα υλικά, οδήγησαν στη δημιουργία μιας νέα κατηγορίας υλικών, αυτή των Fibre Metal Laminates (FML). Πρόκειται στην ουσία για ένα συνδυασμό μεταλλικών και σύνθετων υλικών για το σχηματισμό ενός νέου σύνθετου πολυστρωματικού υλικού. Παρατηρώντας την τομή ενός FML βλέπουμε ότι σχηματίζεται με την εναλλάξ κόλληση μεταλλικών φύλλων με στρώματα ρητίνης ενισχυμένης με ίνες κάποιου ισχυρού υλικού (σχήμα 2.2). Η δομή των FML συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των μεταλλικών και των προηγμένων σύνθετων υλικών, με κόστος όχι μεγαλύτερο από τα κοινά σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας.



Σχήμα 2.2: Τυπική διάταξη σύνθετου πολυστρωματικού υλικού [3].

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση των FML. Ακολουθεί περιγραφή της δομής του Glare και των ξεχωριστών υλικών που συνθέτουν αυτό. Τέλος, γίνεται αναφορά των βασικών ιδιοτήτων του Glare.

2.2 Ιστορική ανασκόπηση των FML.

2.2.1 Μεταλλικά πολυστρωματικά υλικά.

Η ιδέα των πολυστρωματικών υλικών ξεκίνησε τη δεκαετία του '40. Η εταιρία κατασκευής αεροσκαφών De Havilland ήταν η πρώτη εταιρία που κόλλησε μεταλλικά φύλλα μεταξύ τους. Στη συνέχεια η τεχνική της De Havilland χρησιμοποιήθηκε από την Fokker, μια ακόμα αεροπορική βιομηχανία, για την τοπική ενίσχυση των αεροσκαφών της. Το Fokker F-27 ήταν το πρώτο αεροσκάφος που έφερε τέτοιου είδους ενισχύσεις.

Τα εμφανή πλεονεκτήματα της τεχνικής των κολλημένων μεταλλικών υλικών ήταν δύο. Αρχικά ο τοπικός χαρακτήρας της ενίσχυσης, που ήταν δυνατό να επιτευχθεί, είχε σαν αποτέλεσμα μια μικρή εξοικονόμηση βάρους. Επιπλέον, μετά από δοκιμές κόπωσης που πραγματοποιήθηκαν σε πολυστρωματικά υλικά, αποκαλύφθηκε το βασικό χαρακτηριστικό τους που είναι η αυξημένη αντοχή σε κόπωση. Ο λόγος ήταν απλός: η ανάπτυξη των ρωγμών γινόταν σε μεμονωμένα στρώματα. Τα μεταλλικά φύλλα που βρίσκονταν πάνω και κάτω από μια ρωγμή γεφύρωναν αυτή (bridging), κατανέμοντας πιο ήπια τις τάσεις γύρω της με αποτέλεσμα την καθυστέρηση της ανάπτυξης της ρωγμής.

2.2.2 Σύνθετα και σύνθετα πολυστρωματικά υλικά.

Παράλληλα με την έρευνα και ανάπτυξη των πολυστρωματικών υλικών που γινόταν στο Πανεπιστήμιο του Delft στην Ολλανδία, στην αντίπερα όχθη του Ατλαντικού είχε ξεκινήσει η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά είναι κυρίως υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένης με ίνες ή άλλα σωματίδια κάποιου ισχυρού υλικού, συνδυάζοντας χαμηλό βάρος και καλή μηχανική συμπεριφορά. Η χρησιμοποίηση όμως ενός εντελώς νέου υλικού την εποχή εκείνη γινόταν πάντα με κάποια επιφύλαξη, καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα να διερευνηθούν πλήρως οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του, κάτι που είναι εφικτό σήμερα χάρη στην πολύ μεγάλη ανάπτυξη των υπολογιστών και της προσομοίωσης [4]. Η αβεβαιότητα αυτή σε συνδυασμό με το υψηλό για την εποχή κόστος ήταν ανασταλτικά στοιχεία για την χρήση σύνθετων υλικών.

Μια λύση για την υπερπήδηση των εμποδίων που συνάντησαν τα σύνθετα υλικά ήταν η δημιουργία των σύνθετων πολυστρωματικών υλικών, υλικά τα οποία θα σχηματίζονταν από αλληπάλληλες στρώσεις μεταλλικών και σύνθετων υλικών. Η νέα αυτή κατηγορία θα έδινε υλικά το ίδιο ισχυρά, αλλά αρκετά πιο ελαφριά από τα μέταλλα και θα μείωνε την αβεβαιότητα των σύνθετων υλικών, λόγω της ύπαρξης του μεταλλικού κορμού. Έτσι περί το τέλος της δεκαετίας του '70 στο Delft, η ερευνητική ομάδα που είχε ασχοληθεί με τη μελέτη των πολυστρωματικών μεταλλικών υλικών, πρόσθεσε ενισχυτικές ίνες στα ενδιάμεσα στρώματα της ρητίνης που χρησιμοποιούσαν για την κόλληση των μεταλλικών φύλλων. Και εδώ, όπως και στα πολυστρωματικά μεταλλικά υλικά, το βασικό πλεονέκτημα

είναι η μεταφορά φορτίου μέσω των διαφορετικών στρωμάτων του υλικού για τη βελτίωση της αντοχής σε κόπωση. Στην περίπτωση εμφάνισης ρήγματος σε κάποιο από τα μεταλλικά στρώματα, τα στρώματα ρητίνης/ινών θα αναλάβουν τη γεφύρωση της ρωγμής (σχήμα 2.3) και την καθυστέρηση της ανάπτυξής της. Αυτή η ιδιότητα των FML τα ανέδειξε ως πολύ ισχυρό υποψήφιο για τη χρήση τους σε αεροπορικές κατασκευές, στις οποίες η αντοχή σε κόπωση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο.



Σχήμα 2.3: Μηχανισμός βελτίωσης της αντοχής σε κόπωση [5].

Μεγάλο ερωτηματικό ωστόσο ήταν η αντοχή του υλικού σε διάτμηση, καθώς μια τέτοια εντατική κατάσταση θα μπορούσε να προκαλέσει τον διαχωρισμό των στρωμάτων (delamination) και συνεπώς την αστοχία του υλικού. Σε πρώτη φάση η συμπεριφορά του υλικού σε διάτμηση βελτιώθηκε ελαττώνοντας το πάχος των μεταλλικών φύλλων και προσθέτοντας περισσότερα ενδιάμεσα στρώματα ρητίνης/ινών. Επίσης, το κάθε στρώμα ρητίνης/ινών δεν ήταν ενιαίο, αλλά σχηματιζόταν από μικρότερα επαναλαμβανόμενα στρώματα εμποτισμένης με ίνες ρητίνης, τα επονομαζόμενα prepreg (pre-impregnated fibres). Αυτό σήμαινε μεγαλύτερο αριθμό διεπιφανειών, οπότε και η τάση ήταν μικρότερη ανά διεπιφάνεια. Επιπλέον, βελτίωση του φαινομένου του στρωματικού διαχωρισμού επιτυγχάνεται με κατάλληλη επεξεργασία των μεταλλικών φύλλων και των ινών για βελτίωση της πρόσφυσης αυτών με τη ρητίνη, η οποία παίζει το ρόλο της «κόλλας».

2.2.3 Arall, το πρώτο FML.

Το πρώτο υλικό της κατηγορίας FML ήταν το Arall (Aramid Reinforced Aluminium Laminate) κατασκευασμένο στο Delft με στρώματα κράματος αλουμινίου 2024 ή 7475 και πολυμερείς ίνες (aramid) προεμποτισμένες σε εποξική ρητίνη. Οι ίνες aramid είναι πολυαμίδια (πολυμερή υλικά) των οποίων οι αλυσίδες περιέχουν αρωματικούς υδρογονάνθρακες και ενισχύονται από αυτούς. Τα υλικά Kevlar και Nylon είναι τα πιο γνωστά υλικά της κατηγορίας αυτής [6].

Τα φύλλα αλουμινίου κατασκευάζονταν από την εταιρία παραγωγής ελασμάτων ALCOA, οι ίνες από την εταιρία χημικών AKZO και η ρητίνη από την 3M, η οποία είχε αναλάβει και τη σύνθεση του prepreg. Την παραγωγή και εμπορική διάθεση του Arall ανέλαβε η ALCOA το 1984 και μόλις το 1988 έγινε η πρώτη εμπορική εφαρμογή του. Τα υπό μελέτη στρατιωτικά αεροσκάφη μεταφοράς προσωπικού C-17 αντιμετώπιζαν προβλήματα αυξημένου βάρους στο πίσω μέρος τους, οπότε αποφασίστηκε η κατασκευή της θύρας φορτίου (cargo door) από Arall. Η θύρα από Arall ήταν κατά 26% ελαφρύτερη από την αλουμινένια, όμως και περισσότερο από δέκα φορές ακριβότερη. Το υψηλό κόστος οφειλόταν αφενός μεν στο ίδιο κόστος του υλικού, αφετέρου δε στο γεγονός ότι το υλικό κατασκευαζόταν σε μικρά κομμάτια, συγκριτικά με το μέγεθος της θύρας, τα οποία έπρεπε να ενωθούν με κατάλληλες συνδέσεις τιτανίου υψηλού κόστους (titanium straps). Για το λόγο αυτό η εφαρμογή της περιορίστηκε σε μόνο τριάντα από τα κατασκευασθέντα C-17.

Επίσης, εξετάστηκε η χρησιμοποίηση του Arall στην κατασκευή του περιβλήματος της ατράκτου (fuselage skin) και σαν υλικό θωράκισης, όμως και στις δύο περιπτώσεις κρίθηκε ακατάλληλο εξαιτίας της περιορισμένης αντοχής των aramid ινών και της όχι αρκετά καλής πρόσφυσής τους με τη ρητίνη. Έτσι η εφαρμογή του Arall περιορίστηκε σε κάποια υψηλής απόδοσης ποδήλατα και ρακέτες του τένις.

2.2.4 Glare, ο αντικαταστάτης του Arall.

Το επόμενο υλικό της οικογένειας των FML είναι το Glare (Glass Reinforced) το οποίο κατοχυρώθηκε το 1987. Η ειδοποιός διαφορά του με το Arall ήταν η σύνθεση του prepreg με ίνες γυαλιού υψηλής αντοχής. Για την παραγωγή και εκμετάλλευση του Glare μια κοινοπραξία των AKZO και ALCOA οδήγησε στην ίδρυση της SLC (Structural Laminates Company), η οποία συνέβαλε στην έρευνα και ανάπτυξη μοντέλων της κατασκευάστριας αεροσκαφών Boeing. Η πρώτη εμπορική εφαρμογή του Glare έγινε το 1990 στο πάτωμα του αποθηκευτικού χώρου (cargo floor) του Boeing 777, ενώ από τότε έχουν αυξηθεί οι εφαρμογές του σε περισσότερα και πιο καίρια σημεία των αεροσκαφών όπως το περίβλημα της ατράκτου.

2.2.5 Η επόμενη γενιά των FML.

Ως τώρα το αλουμίνιο είναι το κύριο συστατικό των FML και οι ίνες γυαλιού φαίνονται να επικρατούν. Η ανάπτυξη των FML όμως δεν σταματάει εκεί, καθώς επιλέγοντας διαφορετικά υλικά για τη σύνθεσή τους είναι δυνατή η δημιουργία υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες. Πράγματι, η πληθώρα των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση ενός FML ανοίγουν το δρόμο στην έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογικά προηγμένων υλικών για πολλές και διάφορες εφαρμογές.

Παραδείγματος χάριν, πρόβλημα αποτελούν οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κοντά στους κινητήρες των αεροσκαφών, καθώς προκαλούν την υποβάθμιση των ιδιοτήτων των υλικών. Με την αντικατάσταση του κράματος αλουμινίου 2024-T3 από το ίδιο κράμα με διαφορετική θερμική κατεργασία ή από τιτάνιο ή από κάποιο άλλο υλικό ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με την χρήση ανθεκτικότερης ρητίνης, θα προκύψει υλικό που θα διατηρεί τις ιδιότητές του στα επιθυμητά επίπεδα για μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Επίσης, η χρήση ινών άνθρακα στο prepreg αντί των συγκριτικά ασθενέστερων γυάλινων ινών, βελτιώνει κατά πολύ τις μηχανικές ιδιότητες και δη την αντοχή σε κόπωση, καθώς τα ανθρακονήματα προσφέρουν αποτελεσματικότερη «γεφύρωση» των ρωγμών. Τέλος, ο συνδυασμός τιτανίου με ίνες άνθρακα συνθέτει υλικό που συγκριτικά με το Glare έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, τόσο σε χαμηλές όσο και υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 300°C, με χαμηλότερη πυκνότητα που σημαίνει ελαφρύτερες κατασκευές. Ένας τέτοιος συνδυασμός υλικών για το σχηματισμό ενός FML διευρύνει το πεδίο εφαρμογών τους, καθώς θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και σε αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Συμπερασματικά μια νέα κατηγορία υλικών αυτή των σύνθετων πολυστρωματικών έχει δημιουργηθεί. Παρότι νέα σχετικά στον χώρο των υλικών, όπου κυριαρχούν τα μεταλλικά υλικά, όπως οι χάλυβες και τα κράματα αλουμινίου, δείχνει πως μπορεί να τα αντικαταστήσει σε μερίδα εφαρμογών με επιτυχία. Ταυτόχρονα μειώνεται το χάσμα ανάμεσα στα συμβατικά μεταλλικά υλικά και τα προηγμένα σύνθετα υλικά. Τέλος, η δυνατότητα επιλογής των συστατικών των FML μέσα από ένα εξαιρετικά μεγάλο πλήθος υλικών με διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ανοίγει το δρόμο για τη χρήση τους σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

2.3 To Glare.

Τη στιγμή που το Agall απέτυχε στην εδραίωσή του στην αεροπορική βιομηχανία οι υψηλότερης αντοχής γυάλινες ίνες του Glare σε συνδυασμό με την καλύτερη πρόσφυση που είχαν με τη ρητίνη, συγκριτικά με τις aramid ίνες, καθιστούσαν το Glare ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για αεροπορικές κατασκευές. Η μελέτη και οι δοκιμές εξέλιξης του Glare φανέρωσαν επιπλέον πλεονεκτήματα σε σχέση με το Agall, όπως η πολύ καλή συμπεριφορά του σε κρούση και η υψηλή αντοχή του σε διαπερατότητα από φωτιά. Οι ιδιότητες αυτές το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό για αεροπορικές κατασκευές καθώς μειώνουν την πιθανότητα πρόκλησης ατυχήματος μετά από κάποια μικρή πρόσκρουση και ταυτόχρονα αυξάνουν την πιθανότητα επιβίωσης μετά από κάποιο ατύχημα.

2.3.1 Τυποποίηση, ονοματολογία, δομή και κατασκευή του Glare.

Υπάρχουν έξι καθιερωμένοι τύποι Glare (πίνακας 2.1). Από αυτούς ο πρώτος μόνο σχηματίζεται με κράμα αλουμινίου 7475-T761 και οι υπόλοιποι πέντε με κράμα 2024-T3. Και στους έξι τύπους Glare τα prepreg σχηματίζονται με εποξική ρητίνη-κόλλα FM 94 εμποτισμένη με ίνες γυαλιού S-glass. Η διαφορά των τύπων Glare έγκειται στον αριθμό και τον προσανατολισμό των prepreg του κάθε στρώματος ρητίνης/ινών, κάτι που καθορίζει τις ιδιότητες του υλικού. Για τον προσδιορισμό του τύπου και της διάταξης του κάθε υλικού χρησιμοποιείται κωδικοποιημένη ονοματολογία της μορφής “Glare α-β/γ-δ” που σημαίνει ότι πρόκειται για Glare του τύπου “α” το οποίο απαρτίζουν “β” στρώματα μεταλλικών φύλλων πάχους “δ”mm με “γ” ενδιάμεσα στρώματα ρητίνης/ινών. Στο σχήμα 2.4 φαίνεται η δομή υλικού Glare 3-3/2-0.4.

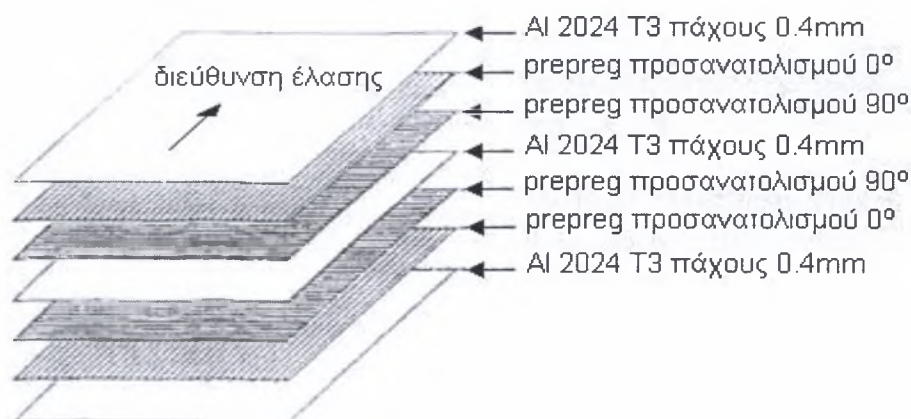
Πίνακας 2.1: Τύποι Glare και τα βασικά χαρακτηριστικά τους [5].

Τύπος Glare		Πάχος μεταλλικού φύλλου (mm) & κράμα.	Προσανατολισμός prepreg σε κάθε στρώμα ρητίνης/ινών**	Κύρια ευεργετικά χαρακτηριστικά
Glare 1	-	0.3-0.4, 7475-T761	0/0	κόπωση, UTS, σ_y
Glare 2	Glare 2A	0.2-0.5, 2024-T3	0/0	κόπωση, UTS, σ_y
	Glare 2B	0.2-0.5, 2024-T3	90/90	κόπωση, UTS
Glare 3	-	0.2-0.5, 2024-T3	0/90	κόπωση, πρόσκρουση
Glare 4	Glare 4A	0.2-0.5, 2024-T3	0/90/0	κόπωση, UTS****
	Glare 4B	0.2-0.5, 2024-T3	90/0/90	κόπωση, UTS****
Glare 5	-	0.2-0.5, 2024-T3	0/90/90/0	πρόσκρουση
Glare 6	Glare 6A	0.2-0.5, 2024-T3	+45/-45	διάτμηση
	Glare 6B	0.2-0.5, 2024-T3	-45/+45	διάτμηση

** Η διεύθυνση έλασης του αλουμινίου είναι η διεύθυνση αναφοράς.

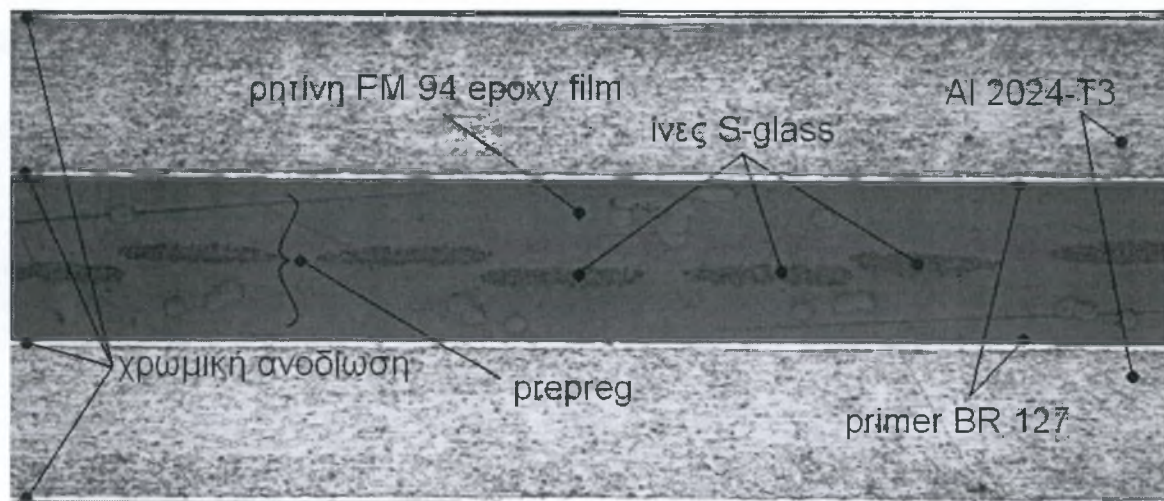
*** Ο αριθμός των προσανατολισμών. είναι ο αριθμός των prepreg του κάθε στρώματος ρητίνης/ινών. κατά τον διαμήκη άξονα.

**** κατά τον εγκάρσιο άξονα.



Σχήμα 2.4: Δομή υλικού Glare 3-3/2-0.4.

Η κατασκευή του Glare γίνεται σε τέσσερα βήματα. Πρώτα από όλα γίνεται ο σχηματισμός του prepreg, ο προεμπτοτισμός δηλαδή των γυάλινων ινών (s-glass fibres) στη ρητίνη (FM 94 epoxy film). Ελέγχονται το πάχος του σχηματιζόμενου prepreg και το ποσοστό όγκου των περιεχόμενων ινών. Το ονομαστικό πάχος του prepreg είναι 0.127mm και το 59% του όγκου του πρέπει να καταλαμβάνεται από τις ίνες. Στη συνέχεια ελέγχεται η ποιότητα της ανοδιωμένης επιφάνειας των φύλλων αλουμινίου (Al 2024-T3). Στα φύλλα αλουμινίου έχει προστεθεί και ένα επιπλέον προστατευτικό επίστρωμα (primer BR 127) στις επιφάνειες που θα έρθουν σε επαφή με το prepreg. Στο σχήμα 2.5 υπάρχει τομή υλικού τύπου Glare όπου φαίνονται τα διάφορα μέρη του. Ακολουθεί η τοποθέτηση των στρωμάτων το ένα πάνω στο άλλο, προσέχοντας τον προσανατολισμό τόσο των φύλλων αλουμινίου όσο και των prepreg ανά στρώμα ρητίνης/ινών, και η μεταφορά του υλικού στον κλίβανο. Κατά την παραπάνω διαδικασία σημαντικός είναι ο έλεγχος των συνθηκών του χώρου, καθώς αυξημένη θερμοκρασία και υψηλό ποσοστό υγρασίας επιδρούν αρνητικά στη ρητίνη. Έπειτα στον κλίβανο γίνεται η διαδικασία «κόλλησης» (cure process). Τέλος γίνεται ο ποιοτικός έλεγχος του παραγόμενου υλικού. Μαζί με το κυρίως κομμάτι γίνεται ταυτόχρονη κατασκευή ενός δοκιμίου για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Επίσης γίνεται εξέταση του υλικού με υπερήχους σε όλο το εύρος της επιφάνειας του για την ανίχνευση ατελειών της κόλλησης.



Σχήμα 2.5: Τομή υλικού τύπου Glare-2/1-0.4mm.

2.3.2 Τα ξεχωριστά «συστατικά» του Glare.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των υλικών που συνθέτουν το Glare με τη σειρά που εμφανίζονται από έξω προς τα μέσα (σχήμα 2.5). Έμφαση δίνεται

στα κράματα αλουμινίου που είναι ο άμεσος αντίπαλος του Glare στις αεροπορικές κατασκευές.

2.3.2.α. Αλουμίνιο 2024-T3.

Το αλουμίνιο είναι το δεύτερο σε αφθονία μεταλλικό υλικό στη γη. Η μαζική παραγωγή και χρήση του ξεκίνησαν κοντά στο τέλος του 19^{ου} αιώνα και τα πρώτα προϊόντα αλουμινίου που βγήκαν στην αγορά ήταν είδη οικιακής χρήσης. Σήμερα το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών που περιλαμβάνουν την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροπορική βιομηχανία, τη βιομηχανία αποθήκευσης τροφίμων κλπ.

Ένα από τα χαρακτηριστικά του αλουμινίου, που το καθιστούν ένα ιδιαίτερα ελκυστικό μηχανολογικό υλικό, είναι ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος. Ενδεικτικά το κράμα 2024-T3 έχει σχεδόν μιάμιση φορά ψηλότερο λόγο από τον ανοξειδωτο χάλυβα 302 (πίνακας 2.2). Επίσης, η πολύ καλή αντίσταση σε διάβρωση προσφέρει αυξημένη διάρκεια ζωής των κατασκευών. Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό του αλουμινίου είναι η δυνατότητα κραμάτωσης με ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων -χαλκός, μαγνήσιο, σίδηρος κ.ά.- η οποία επιτρέπει την δημιουργία κραμάτων με εκ των προτέρων επιθυμητές ιδιότητες. Τέλος σημαντική είναι η ανακυκλωσιμότητα του αλουμινίου. Η αντίσταση σε διάβρωση, που σημαίνει ότι το υλικό διατηρεί σε μεγάλο βαθμό τη μεταλλουργική του αξία, ο μεγάλος αριθμός κραμάτων με διαφορετικές χημικές συστάσεις και η χαμηλή ενέργεια που απαιτείται για το λιώσιμο του σκραπ, συγκριτικά με αυτήν που χρειάζεται για την πρωταρχική παραγωγή αλουμινίου, είναι τα στοιχεία εκείνα που ευνοούν την ανακύκλωση του αλουμινίου. Οι παραπάνω λόγοι είναι και αυτοί που έχουν συμβάλει στην τόσο ευρεία χρήση του.

Πίνακας 2.2: Σύγκριση λόγου αντοχής προς βάρος Al - St [7].

υλικό	UTS (MPa)	πυκνότητα (g/cm ³)	λόγος αντοχή/βάρος
Al 2024-T3	485	2.77	≈175
steel 302	965	8.03	≈120

Τα κράματα του αλουμινίου διαχωρίζονται κατ' αρχήν σε σφυρήλατα (wrought) με ονοματολογία Axxx και χυτά (cast) με ονόματα της μορφής Axx.x και στη συνέχεια σε εννέα κατηγορίες σύμφωνα με το βασικό κραματικό τους στοιχείο. Τα κράματα της σειράς 2xxx έχουν κύριο κραματικό στοιχείο το χαλκό και είναι γνωστά με την ονομασία «ντουραλουμίνιο». Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή αντοχή, αποτέλεσμα του υψηλού ποσοστού χαλκού στη σύστασή τους, και η μικρή αντίσταση σε διάβρωση. Επίσης,

περιλαμβάνονται στα κράματα που μπορούν να ισχυροποιηθούν με θερμική επεξεργασία. Η βασική εφαρμογή των κραμάτων 2xxx γίνεται στις περιπτώσεις που απαιτείται υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος όπως στην αεροπορική βιομηχανία.

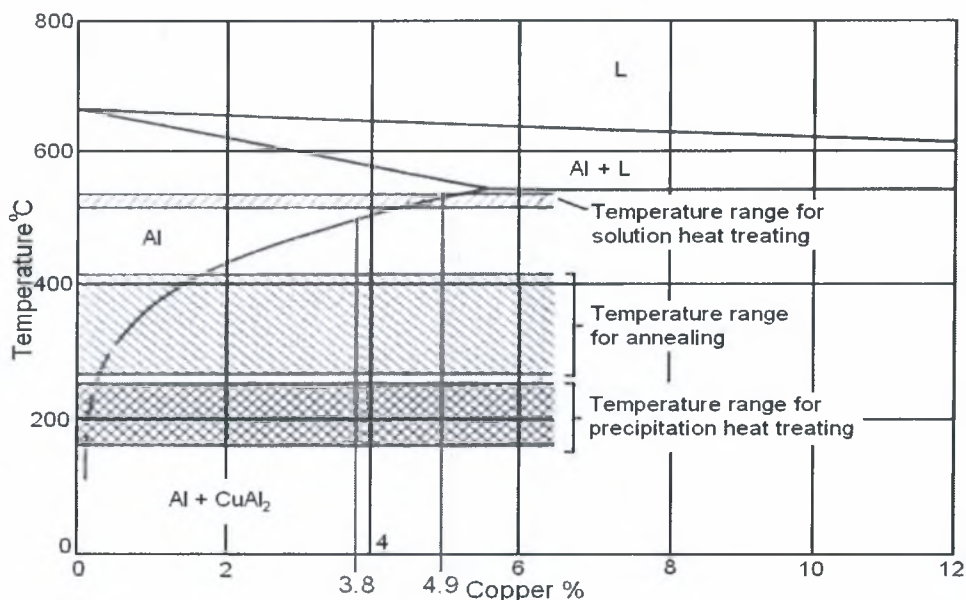
Ειδικότερα το κράμα 2024 χρησιμοποιείται για κατασκευές με ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις σε αντοχή, όπως τροχοί φορτηγών οχημάτων, μέρη μηχανών εσωτερικής καύσης, δομικά μέρη αεροσκαφών, κλπ. Χαρακτηρίζεται από άριστη κατεργασιμότητα όταν έχει υποστεί θερμική κατεργασία γήρανσης, χαμηλή διαμορφωσιμότητα και σχετικά καλή αντίσταση σε διάβρωση. Για εφαρμογές απαιτητικές σε διαβρωτική αντίσταση γίνεται χρήση του Alclad 2024. Πρόκειται για κράμα 2024 στο οποίο γίνεται προσθήκη επικάλυψη με κάποιο κράμα της σειράς 1xxx, κράματα υψηλής καθαρότητας, στο εξωτερικό μέρος του βασικού υλικού, κάτι που προσφέρει καθοδική προστασία στο υλικό του πυρήνα και προστασία από τρηματική διάβρωση.

Τα όρια της χημικής σύστασης του κράματος 2024 φαίνονται στον πίνακα 2.3. Κάθε κραματικό στοιχείο παίζει ξεχωριστό ρόλο στη συνολική συμπεριφορά του 2024. Από αυτά τα κυριότερα είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο, το μαγγάνιο και το πυρίτιο. τα οποία συμβάλλουν στην ισχυροποίηση του κράματος. Ο χαλκός κυρίως, αλλά και το μαγνήσιο, σχηματίζουν δευτερεύουσες φάσεις ισχυροποίησης, όμως επιδρούν αρνητικά στην αντίσταση σε διάβρωση. Αντίθετα, το μαγγάνιο χρησιμοποιείται για την αύξηση της αντοχής του υλικού χωρίς να επηρεάζει την αντίσταση σε διάβρωση. Όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη ποσότητα καθότι μειώνει δραματικά την ολκιμότητα του υλικού. Το πυρίτιο, πέρα από την ισχυροποίηση που προσφέρει, δεσμεύει μέρος του σιδήρου, ο οποίος έχει την τάση να δεσμεύει χαλκό μειώνοντας τις επιδράσεις της θερμικής επεξεργασίας. Τέλος, το χρώμιο προστίθεται για τη μείωση της ευαισθησίας σε εργοδιάβρωση (stress corrosion cracking).

Πίνακας 2.3: Ονομαστική χημική σύσταση του κράματος 2024 (% κ.β.) [7].

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	others each	others total	Al
3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	0.5	0.25	0.15	0.1	0.05	0.15	remainder

Το σχήμα 2.6 περιέχει μέρος του διμερούς διαγράμματος φάσεων Al-Cu. Οι φάσεις που είναι δυνατόν να εμφανιστούν στο κράμα 2024 είναι CuMgAl_2 (S-φάση), CuAl_2 (θ-φάση), $\text{CuMn}_3\text{Al}_{20}$, Cu_2FeAl_7 , Mg_2Si , $(\text{Fe,Mn})\text{Al}_3$, $(\text{Fe,Mn})\text{Al}_6$, $(\text{Fe,Mn})_3\text{SiAl}_{12}$. Η κύρια δευτερεύουσα φάση του 2024 είναι η S-φάση, ενώ σπανιότερα εμφανίζεται και η θ-φάση. Αυτές συμβάλλουν τα μέγιστα στην ισχυροποίηση του κράματος ενώ σημαντική συνεισφορά έχουν και οι $\text{CuMn}_3\text{Al}_{20}$, Cu_2FeAl_7 και Mg_2Si [7].

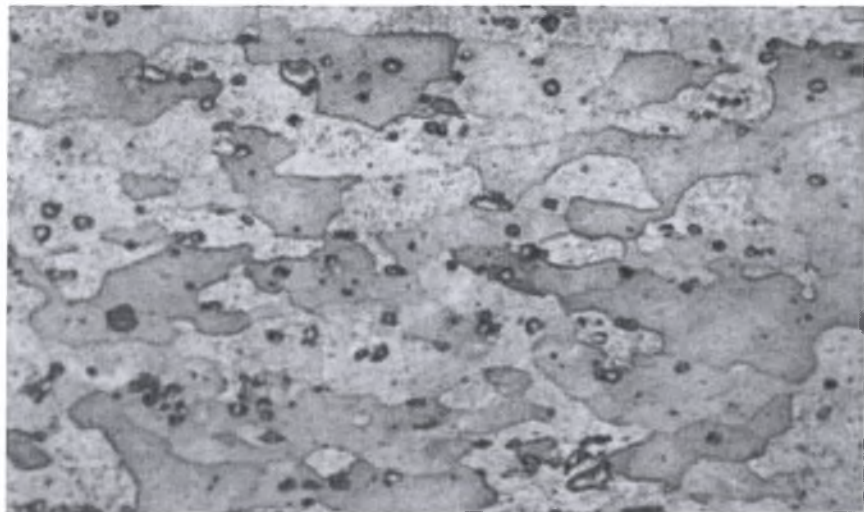


Σχήμα 2.6: Διμερές διάγραμμα φάσεων Al-Cu [7].

Όλα τα κράματα της σειράς 2xxx επιδέχονται θερμική επεξεργασία για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η επιλογή της θερμικής επεξεργασίας εξαρτάται από τα κραματικά στοιχεία και τη διαλυτότητα των υπαρχόντων φάσεων στην κύρια φάση του αλουμινίου.

Τα βασικά βήματα κάθε θερμικής επεξεργασίας είναι η θέρμανση στη μονοφασική περιοχή του αλουμινίου, η βαφή και τέλος η γήρανση. Η θέρμανση στη μονοφασική περιοχή σημαίνει τη θέρμανση στη θερμοκρασία διαλυτοποίησης, όπου οι διάφορες φάσεις του κράματος διαλύονται στην κύρια φάση του αλουμινίου. Στη συνέχεια με τη βαφή δημιουργείται ένα υπέρκορο στέρεο διάλυμα, το οποίο κατά τη γήρανση τείνει να έρθει σε ισορροπία με την καθίζηση δευτερευουσών φάσεων στη μητρική φάση του αλουμινίου.

Η ισχυροποίηση ενός μεταλλικού υλικού επιτυγχάνεται με την παρεμπόδιση ολίσθησης των γραμμοαταξιών. Ένας τρόπος είναι η δημιουργία λεπτής διασποράς σωματιδίων, τα οποία όταν δεν βρίσκονται σε πλήρη συνοχή με τη μητρική φάση αναχαιτίζουν την κίνηση των αταξιών. Η κύρια φάση καθίζησης στο 2024 είναι η S-φάση (CuMgAl₂, ορθορομβική κρυσταλλική δομή με παραμέτρους πλέγματος $a=0.400\text{nm}$, $b=0.923\text{nm}$ και $c=0.714\text{nm}$ [9]). Τα σωματίδιά της δεν παρουσιάζουν συνοχή με τη μητρική φάση του αλουμινίου (Al, εδροκεντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή με παράμετρο πλέγματος $a=4.0496\text{Å}$ [8]) με αποτέλεσμα να ανακόπτουν την κίνηση των γραμμοαταξιών. Η μικροδομή του αλουμινίου 2024-T3 με τις διάφορες φάσεις φαίνεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Μικροδομή Al 2024-T3.

Κάθε βήμα της θερμικής επεξεργασίας είναι το ίδιο σημαντικό και οποιαδήποτε απόκλιση από τις προκαθορισμένες παραμέτρους θα έχει σαν αποτέλεσμα και την απόκλιση από τις επιθυμητές ιδιότητες. Κατά την διαλυτοποίηση σημαντική είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας κοντά στη θερμοκρασία διαλυτοποίησης του κράματος. Τόσο υπερβολική όσο και ελλιπής θέρμανση θα έχουν αρνητικό αντίκτυπο στις μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες δεν θα φθάσουν τη βέλτιστη τιμή τους. Κατά τη βαφή σημαντικό ρόλο παίζει ο ρυθμός ψύξης, καθώς και τυχόν καθυστέρηση κατά τη μεταφορά του υλικού από τη συσκευή θέρμανσης ως τη βαφή. Στο κράμα 2024 αργή ψύξη του υλικού έχει σαν αποτέλεσμα την καθίζηση S-φάσης στα όρια των κόκκων αυξάνοντας την ευαισθησία του κράματος σε περικρυσταλλική διάβρωση. Κατά τη γήρανση σημαντικό ρόλο παίζουν η θερμοκρασία και ο χρόνος της γήρανσης. Είναι δυνατόν υπό συνθήκες να αρχίσει υποβάθμιση των ιδιοτήτων του κράματος μετά το πέρας συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (υπεργήρανση).

Μια πολύ συνηθισμένη θερμική επεξεργασία για το κράμα 2024 είναι η T3, η οποία περιλαμβάνει θέρμανση στη θερμοκρασία διαλυτοποίησης, ψυχρή διαμόρφωση και φυσική γήρανση. Η θερμοκρασία διαλυτοποίησης για το 2024 είναι 495°C. Ακολουθούν η βαφή και η ψυχρή έλαση του υλικού. Στη συνέχεια η φυσική γήρανση γίνεται σε θερμοκρασία δωματίου έως ότου επέλθει η κατάσταση ισορροπίας. Για το κράμα 2024 έχει παρατηρηθεί ότι περισσότερο από μια εβδομάδα φυσικής γήρανσης δεν επιφέρει σχεδόν καμία αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητές του. Στον πίνακα 2.4 συγκρίνονται οι κύριες μηχανικές ιδιότητες του 2024 και του ίδιου κράματος θερμικά επεξεργασμένου κατά την T3. Είναι εμφανής η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

Πίνακας 2.4: Σύγκριση βασικών μηχανικών ιδιοτήτων κράματος 2024-0 και 2024-T3 [7].

υλικό	μέγιστη αντοχή εφελκυσμού, σ_{UTS} (MPa)	όριο διαρροής, σ_y (MPa)	μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	ολκιμότητα, ϵ_{UTS} (%)	σκληρότητα, HB	όριο διαρκούς αντοχής σε κό- πωση, σ_e (MPa)
2024-T3	485	345	73	18	120	140
2024-0	185	75	73	20	47	90

Μια ακόμα συνηθισμένη επεξεργασία των κραμάτων αλουμινίου είναι η ανοδίωση. Οι πιο κοινές είναι η χρωμική και η θειική ανοδίωση (πίνακας 2.5). Κάθε τύπος ανοδίωσης αποσκοπεί στην αύξηση του πάχους του προστατευτικού οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του αλουμινίου. Το κύριο πλεονέκτημα που προσφέρει η ανοδίωση είναι η αυξημένη αντίσταση σε διάβρωση. Επίσης, η μορφολογία της επιφάνειας που σχηματίζεται βελτιώνει την πρόσφυση των χρωμάτων και κάθε είδους κόλλας (adhesive bonding).

Πίνακας 2.5: Βασικά στοιχεία θειικής και χρωμικής ανοδίωσης αλουμινίου [7].

Bath	Amount	Tempe- rature, °C	Dura- tion, min	Voltage, V	Current density A/dm ²	Film thickness μm	Appearance properties	Remarks
Sulfuric acid bath								
Sulfuric acid	10wt%	18	15-30	14-18	1-2	5-17	Colorless, transparent films	Hard, unsuitable for coloring, tensile strength design 250-370 Kgf/mm (2450-3630 N/mm)
Water	90 wt%							
Commercial chromic acid process								
Chromic acid	5-10 wt%	40	30-60	0 to increasing limit controlled by amperage	0.5-10	4-7	Gray to iridescent	Good chemical resistance, poor abrasion resistance; suitable for parts with narrow cavities, as residual electrolyte is not detrimental
Water	95-90 wt%							

2.3.2.β BR 127 αναχαιπιστής διάβρωσης (corrosion inhibiting primer) [10].

Ανάμεσα σε κάθε φύλλο αλουμινίου και στρώμα ρητίνης/ινών παρεμβάλλεται ένα ακόμα επίστρωμα. Είναι το BR 127 primer, ένα αστάρι, του οποίου ρόλος είναι να προστατέψει τη διεπιφάνεια των υλικών από τα φαινόμενα της διάβρωσης. Αυτό που κάνει είναι να εμποδίζει την υδρόλυση του προστατευτικού οξειδίου του αλουμινίου και έχει σχεδιαστεί να διατηρεί τις ιδιότητές του για θερμοκρασίες από -55 έως 150 °C. Ένας ακόμα λόγος που χρησιμοποιείται στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prepreg είναι ότι αυξάνει την συνοχή ελατώνοντας το φαινόμενο του στρωματικού διαχωρισμού. Μπορεί επίσης να

χρησιμοποιηθεί και στην εξωτερική επιφάνεια του αλουμινίου για την αναχαίτιση της διαβρωτικής διεργασίας.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την επίστρωση του primer είναι η εξής. Καταρχήν πριν την εφαρμογή του στην επιφάνεια του αλουμινίου είναι απαραίτητο αυτή να είναι απαλλαγμένη από οποιοσδήποτε ακαθαρσίες. Μετά τον καθαρισμό του αλουμινίου ψεκάζεται το primer στην επιφάνεια για το σχηματισμό μιας επικάλυψης πάχους περίπου 0.005mm. Το πάχος της επίστρωσης πρέπει να αυξηθεί σε περίπτωση που το primer χρησιμοποιείται σαν προστατευτική επικάλυψη. Στη συνέχεια αφήνεται να στεγνώσει φυσικά για τριάντα λεπτά. Τέλος τοποθετείται σε κλίβανο όπου και μένει για τριάντα ακόμα λεπτά σε θερμοκρασία 120 °C.

Τα κομμάτια που έχουν επιστρωθεί με το BR 127 αν δεν πρόκειται να περάσουν άμεσα στο επόμενο στάδιο της εφαρμογής της κόλλας μπορούν να φυλαχτούν για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να υποβαθμιστεί η βελτίωση της συνοχής της διεπιφάνειας. Μοναδική προϋπόθεση είναι η κάλυψη της επιφάνειας για να προφυλαχθεί από σκόνη και άλλες ακαθαρσίες.

2.3.2.γ Ρητίνη FM 94 Modified Epoxy film [11].

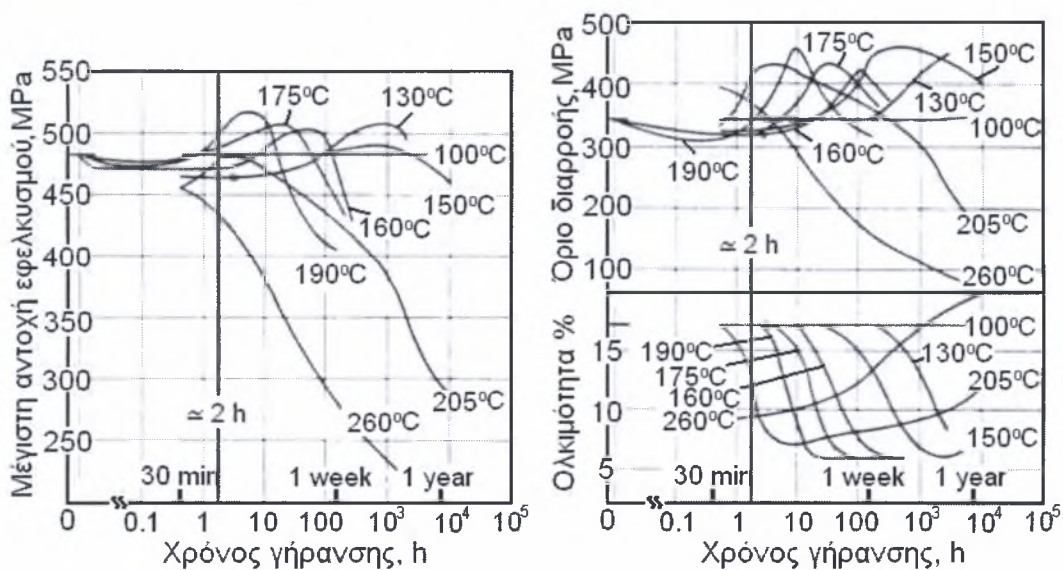
Τα ενδιάμεσα στρώματα του Glare είναι ένα σύνθετο υλικό σχηματιζόμενο από ρητίνη εμποτισμένη με ίνες γυαλιού. Ο ρόλος των ενδιάμεσων στρωμάτων εστιάζεται στην βελτίωση της αντοχής σε κόπωση και της αντίστασης σε διάβρωση. Για την επίτευξη των παραπάνω είναι σημαντικό η ρητίνη να έχει καλή συνοχή με τα φύλλα αλουμινίου και τις ίνες ώστε να αποφεύγεται αποκόλληση και διαχωρισμός των στρωμάτων. Βελτίωση της συνοχής επιτυγχάνεται με την επεξεργασία των ινών, ώστε να αποκτήσουν περισσότερο τραχεία επιφάνεια, και με την χρωμική ανοδίωση των φύλλων αλουμινίου. Η ρητίνη επιπλέον πρέπει να αντέχει σε θερμικά φορτία, να έχει δηλαδή υψηλή θερμοκρασία υάλωσης (transition temperature), και να μην απορροφάει υψηλά ποσοστά υγρασίας.

Η ρητίνη που χρησιμοποιείται για το Glare είναι η FM 94, εποξική ρητίνη. Είναι μια ρητίνη σχεδιασμένη για την κόλληση μεταλλικών υλικών μεταξύ τους ή μεταλλικών με σύνθετα υλικά. Έχει υψηλή αντοχή σε διάτμηση, μεγάλη ειδική ενέργεια παραμόρφωσης και μεγάλη ολκιμότητα. Διατηρεί τις ιδιότητές της σχεδόν αναλλοίωτες από τους -55 έως τους 104 °C. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περίπτωση που οι ίνες του prepreg είναι ηλεκτρικά αγώγιμες, αφού δρα ως μόνωση ανάμεσα στο μεταλλικό υλικό και τις ίνες.

Η FM 94 εποξική ρητίνη σαν πολυμερές υλικό είναι δυνατόν να απορροφήσει υγρασία η οποία υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες της. Καταρχήν προκαλεί διαστασιακές μεταβολές και πτώση της θερμοκρασίας υάλωσης ενώ η υδρόλυση που συμβαίνει προκαλεί χημική υποβάθμιση. Τέλος είναι γνωστό πως τα πολυμερή υλικά υφίστανται φυσική γήρανση και σταδιακή υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους.

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για την χρήση της FM 94. Σε περίπτωση που τα φύλλα αλουμινίου έχουν επιστρωθεί με BR 127 μπορούν να αποθηκευθούν σε θερμοκρασία δωματίου για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να μειωθεί η ισχύς του τελικού δεσμού, εφόσον έχει καλυφθεί αποτελεσματικά η επιφάνεια του primer. Σε αυτή την περίπτωση αφαιρείται το κάλυμμα του primer και τοποθετείται το φιλμ της ρητίνης. Σε αντίθετη περίπτωση πριν την τοποθέτηση της ρητίνης είναι απαραίτητο να είναι πολύ καλά καθαρισμένη η επιφάνεια του αλουμινίου για την επίτευξη της βέλτιστης πρόσφυσης. Η επιφάνεια του αλουμινίου καθαρίζεται με οργανικό διαλύτη και στη συνέχεια απλώνεται το φιλμ της ρητίνης πάνω στο υλικό. Ακολουθεί ο θερμικός κύκλος της διαδικασίας κόλλησης, κατά τον οποίο το υλικό θερμαίνεται ως τους 120 °C με ρυθμό 1.7 έως 2.8 °C ανά λεπτό και παραμένει σε αυτή τη θερμοκρασία για μια ώρα ενώ υπάρχει ταυτόχρονα ομοιόμορφη πίεση της τάξεως των 0.28 MPa.

Κατά την συναρμολόγηση του Glare τα φύλλα αλουμινίου θερμαίνονται μια φορά στους 120 °C για μισή ώρα κατά την εφαρμογή του primer και μια δεύτερη πάλι στους 120°C για μια ακόμα ώρα. Η επιπλέον αυτή θερμική επεξεργασία δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του αλουμινίου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.8 απαιτείται εφαρμογή θερμοκρασιών μεγαλύτερων από 130 °C και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα για την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Η δεύτερη αυτή όμως θερμική επεξεργασία είναι πιθανόν να μεταβάλλει τη μικροδομή του αλουμινίου επηρεάζοντας ιδιότητες όπως η αντίσταση σε διάβρωση.



Σχήμα 2.8: Επίδραση θερμοκρασίας και χρόνου γήρανσης στο κράμα 2024 [7].

2.3.2.δ Ίνες γυαλιού S-glass.

Η ιδέα των σύνθετων υλικών έχει στηριχθεί στην ενίσχυση ασθενέστερων υλικών με ίνες από κάποιο πολύ ισχυρό υλικό. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία σύνθετων υλικών είναι κατά ένα μεγάλο ποσοστό (περίπου 90%) γυάλινες. Παρόλο που οι ίνες άνθρακα είναι ισχυρότερες από τις γυάλινες δεν χρησιμοποιούνται παρά μόνο σε εξεζητημένες εφαρμογές εξαιτίας κυρίως του υψηλού τους κόστους [12].

Οι ίνες που περιέχονται στο στρώμα του prepreg των FML συμβάλλουν στην ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού των ινών καθορίζουν το εύρος της ενίσχυσης και ο προσανατολισμός τους καθορίζει άμεσα την κατευθυντικότητα των ιδιοτήτων του συνολικού υλικού. Τα πρώτα FML περιείχαν τις όχι τόσο ισχυρές aramid ίνες, ενώ προβλέπεται η χρησιμοποίηση των πολύ ισχυρών ινών άνθρακα στα μελλοντικά FML.

Οι ίνες γυαλιού είναι μια ενδιάμεση λύση. Είναι πολύ ισχυρότερες από τις aramid ίνες και ασθενέστερες από τις ίνες άνθρακα. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα έναντι των ινών άνθρακα είναι ότι το γυαλί είναι χημικά και ηλεκτρικά αδρανές. Το υλικό έτσι προστατεύεται από φαινόμενα γαλβανικής διάβρωσης.

Οι ίνες που περιέχονται στο prepreg του Glare είναι ίνες S-glass (Structural-glass) διαμέτρου περίπου 10μm. Οι ίνες αυτές περιέχουν οξειδία του πυριτίου, του αλουμινίου και του μαγνησίου (SiO_2 -25%, Al_2O_3 -10% και MgO [6]). Το γυαλί γενικά είναι χημικά αδρανές οπότε, και οι ίνες S-glass δεν αναμένεται να παρουσιάσουν υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους εξαιτίας περιβαλλοντικών παραγόντων. Υφίστανται μόνο μια μικρή ελάττωση των ιδιοτήτων τους κάτω από συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας. Ο πίνακας 2.6 περιέχει τις κύριες μηχανικές ιδιότητες των S-glass ινών. Περιέχονται επίσης οι ιδιότητες άλλων υλικών για σύγκριση.

Πίνακας 2.6: Μηχανικές ιδιότητες διάφορων ινών και σύγκριση με Al 2024-T3.

υλικό	Kevlar (aramid) [6]	S-glass [12]	E-glass [13]	Boron [6]	T300 carbon [12]	Al 2024-T3 [7]
σ_{UTS} (GPa)	4.48	4.6	3.5	3.45	3.24	0.485
E (GPa)	124	86	82.6	379	231	73
ϵ_{UTS} (%)	-	5.7	4.8	-	-	18
d (g/cm^3)	1.44	2.5	2.55	2.36	1.77	2.77

2.3.3 Ιδιότητες του Glare.

Το Glare φέρει μια σειρά από μηχανικές και άλλες ιδιότητες, οι οποίες το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό υλικό για αεροπορικές κατασκευές. Όπως όλα τα πολυστρωματικά υλικά

έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση. Οι ίνες στο rprereg βελτιώνουν επίσης τη συμπεριφορά του υλικού σε κρούση και ταυτόχρονα μειώνουν τη διαπερατότητά του από φωτιά. Επίσης τα ενδιάμεσα στρώματα rprereg καθώς και το πολύ μικρό πάχος των φύλλων αλουμινίου βελτιώνουν την αντίσταση του υλικού σε διάβρωση.

Όλες οι μηχανικές ιδιότητες του Glare εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των rprereg και την κατεύθυνση της φόρτισης. Ειδικά στους τύπους με rprereg μονής κατεύθυνσης βελτίωση της αντοχής υφίσταται μόνο κατά την παράλληλη στις ίνες διεύθυνση, καθώς οι υψηλής αντοχής ίνες είναι αυτές που ενισχύουν το υλικό. Στον πίνακα 2.7 φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες δύο τύπων Glare, Glare 2-2/1 με ίνες παράλληλες στο διαμήκη άξονα και Glare 3-2/1 με τις ίνες μοιρασμένες 50-50 κατά τον εγκάρσιο και το διαμήκη άξονα της φόρτισης, και συγκρίνονται με τις μηχανικές ιδιότητες του Al 2024-T3 και των ινών S-glass. Καταρχήν το μικρό όριο διαρροής, το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή ολκιμότητα του rprereg συνεισφέρουν στην ελάττωση των αντίστοιχων ιδιοτήτων του συνολικού υλικού εν συγκρίσει με το αλουμίνιο. Αντίθετα, παρατηρείται βελτίωση της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού στο Glare 2, όπου φαίνεται η συνεισφορά των ινών κατά τον διαμήκη άξονα, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια του αλουμινίου. Στο Glare 3 η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού είναι μεγαλύτερη από του αλουμινίου και μικρότερη από του Glare 2 κατά τον διαμήκη άξονα, όμως χαρακτηριστική του Glare 3 είναι η παρόμοια συμπεριφορά του υλικού στους δύο άξονες.

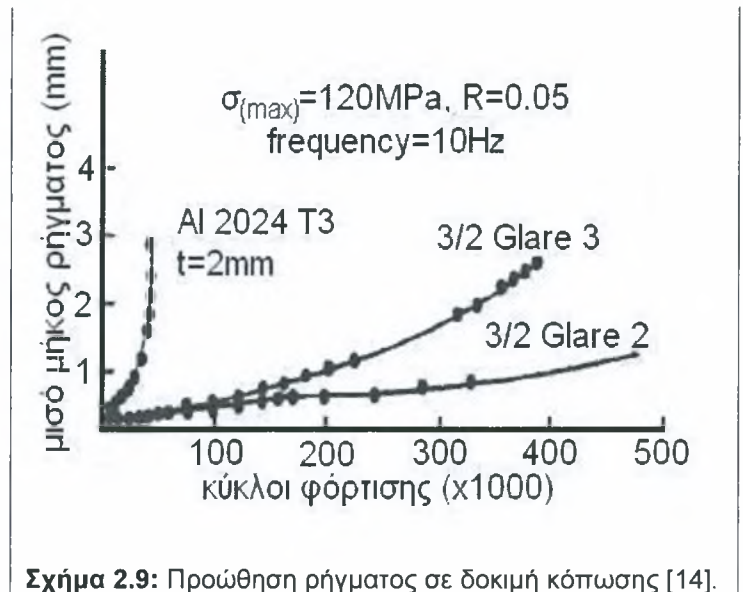
Πίνακας 2.7: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων Glare, Al 2024-T3 και S-glass ινών.

υλικό		Glare 2-2/1 [14]	Glare 3-2/1 [14]	Al 2024-T3 [7]	S-glass [12,13]
d (g/cm ³)		2.52*	2.52*	2.77	2.5
σ_{UTS} (MPa)	L	992	662	485	4600
	T	331	653		
σ_y (MPa)	L	347	315	345	-
	T	244	287		
E (GPa)	L	67	60	73	86
	T	55	60		
ϵ_{UTS} (%)	L	4.7	4.7	18	5.7
	T	10.8	4.7		

* Η πυκνότητα αυτή αντιστοιχεί σε Glare 2/1 με φύλλα αλουμινίου πάχους 0.3mm.

Η βελτίωση στη συμπεριφορά σε κόπωση επιτυγχάνεται μέσω των ενδιάμεσων στρωμάτων rprereg. Σε περίπτωση δημιουργίας ρήγματος οι ίνες του rprereg γεφυρώνουν το ρήγμα και μεταφέρουν μέρος του φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο οι τάσεις γύρω από το ρήγμα κατανέμονται πιο ήπια με αποτέλεσμα την καθυστέρηση της ανάπτυξής του. Στο

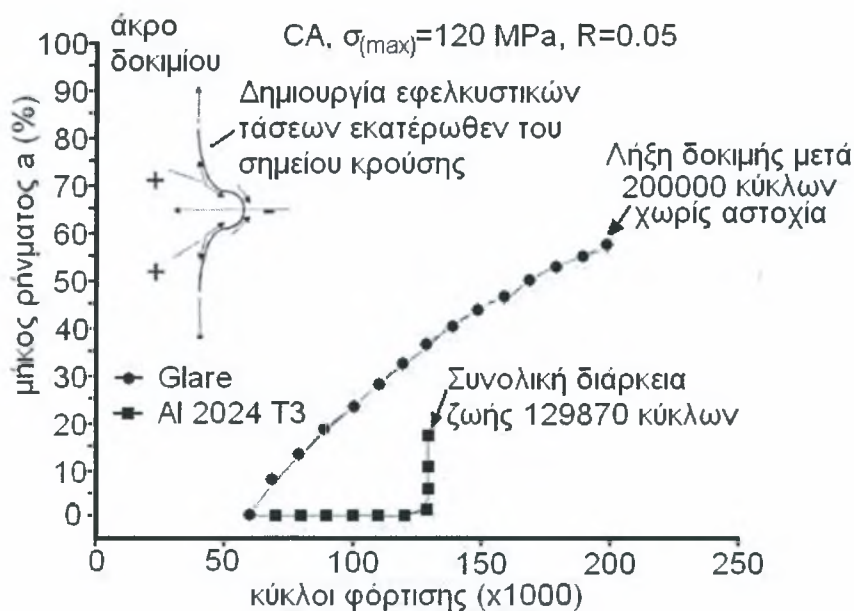
σχήμα 2.3 φαίνεται η λειτουργία του μηχανισμού γεφύρωσης ρηγμάτων. Ένας μεγάλος αριθμός δοκιμών κόπωσης έχει γίνει για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των FML και το ρυθμό ανάπτυξης των ρηγμάτων. Στο σχήμα 2.9 φαίνονται τα αποτελέσματα δοκιμής κόπωσης που έγινε σε δοκίμια από Glare και κράμα αλουμινίου 2024-T3. Η βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση είναι παραπάνω από εμφανής. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της αυξημένης αντοχής σε κόπωση του Glare είναι το γεγονός ότι αυξάνει κατά πολύ το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών ελέγχων των κατασκευών. Μειώνεται με αυτό τον τρόπο το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των αεροσκαφών.



Εξαιρετική είναι επίσης η συμπεριφορά του Glare σε κρούση (impact behavior). Κατά τη διάρκεια ζωής των αεροσκαφών πολλές είναι οι φορές που αντικείμενα προσκρούουν πάνω στα δομικά τους μέρη, τόσο κατά τη διάρκεια πτήσεων (πουλιά, χαλάζι, αστοχία κινητήρων με έκρηξη, κλπ.) όσο και κατά την παραμονή τους στο έδαφος (μικροχτυπήματα κατά την φόρτωση, πτώση εργαλείων κατά τη διάρκεια εργασιών συντήρησης, κλπ.). Τα χτυπήματα αυτά ανάλογα με την ένταση της κρούσης μπορούν να παραμορφώσουν πλαστικά ή να δημιουργήσουν ρηγματα στο υλικό, καταστάσεις οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία από κόπωση. Το Glare παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά σε κρούση συγκριτικά με το αλουμίνιο. Όπως σε όλες τις μηχανικές ιδιότητες σημαντικό ρόλο παίζει ο προσανατολισμός των ινών στα ενδιάμεσα στρώματα.

Κατά την κρούση αντικειμένου στο Glare λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα μια σειρά από φαινόμενα, όπως παραμόρφωση και ρηγμάτωση των φύλλων αλουμινίου, διάσπαση ινών, ρηγμάτωση της πολυμερικής μήτρας και διαχωρισμός φύλλων αλουμινίου και ινών από τη ρητίνη. Σε κρούσεις με χαμηλή ταχύτητα το εξωτερικό αλουμίνιο απορροφάει όλη την ενέργεια της κρούσης, με αποτέλεσμα όμοια συμπεριφορά του Glare με το αλουμίνιο. Όταν όμως η κρούση γίνεται με μεγάλη ταχύτητα η συνεισφορά των παραπάνω φαινομένων είναι αισθητή. Τα στρώματα του prepreg απορροφούν ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας κρούσης μειώνοντας το εύρος της ζημιάς που θα μπορούσε να προκληθεί. Επιπλέον, χάρη στην πλαστική παραμόρφωση των εξωτερικών φύλλων αλουμινίου είναι άμεσα αναγνωρίσιμο το

σημείο της κρούσης, αντίθετα με τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας η οποία δεν παραμορφώνεται εύκολα πλαστικά. Στο σχήμα 2.10 συγκρίνονται τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης σε Glare 4 και Al 2024-T3 μετά από πρόσκρουση. Όσον αφορά το Glare η ανάπτυξη του ρήγματος αναφέρεται στο εξωτερικό μόνο στρώμα αλουμινίου. Στο αλουμίνιο παρατηρείται καθυστερημένη έναρξη ρηγματώσης, όμως στη συνέχεια αναπτύσσεται με πολύ γοργό ρυθμό προκαλώντας την αστοχία του υλικού πολύ νωρίτερα συγκριτικά με το Glare.



Σχήμα 2.10: Προώθηση ρήγματος σε δοκιμή κόπωσης μετά από κρούση [5].

Μαζί με την αντοχή σε κρούση η υψηλή αντίσταση του Glare σε φωτιά αυξάνει την ασφάλεια των αεροσκαφών. Η χαμηλή διαπερατότητα του Glare από φωτιά οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν οι γυάλινες ίνες του prepreg. Κατά την εκδήλωση πυρκαγιάς τα εξωτερικά στρώματα του αλουμινίου λιώνουν και αποκολλούνται από το υπόλοιπο υλικό. Στη συνέχεια οι ίνες του prepreg καθυστερούν την εισχώρηση της φωτιάς ενώ ταυτόχρονα στα ενδότερα στρώματα prepreg η θερμοκρασία υπερβαίνει τη θερμοκρασία υάλωσης της ρητίνης, με αποτέλεσμα την αποκόλληση των prepreg και δημιουργία είδους μόνωσης προς τα επόμενα στρώματα υλικού.

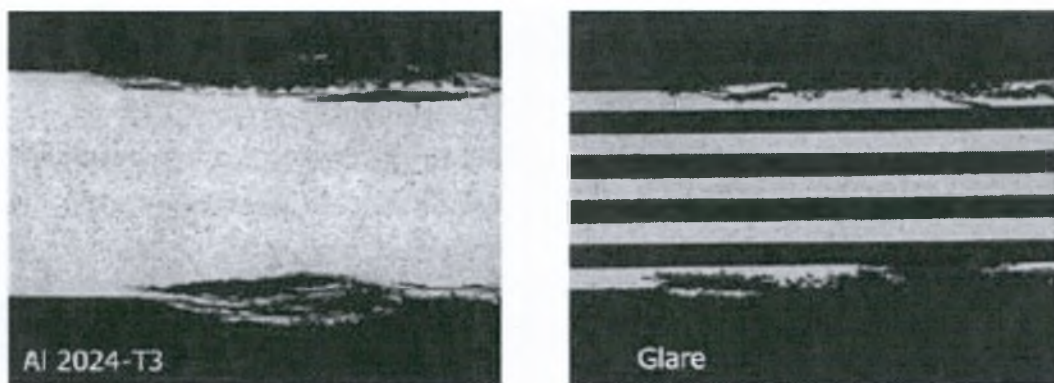
Πολυάριθμες δοκιμές έχουν γίνει για τη μελέτη της συμπεριφοράς του Glare κατά την εκδήλωση πυρκαγιάς. Glare 3/2 σε απευθείας έκθεση σε φλόγα θερμοκρασίας 1100°C χρειάζεται περισσότερο από δεκαπέντε λεπτά για να διαπεραστεί σε όλο του το πάχος. Η θερμοκρασία στην εσωτερική πλευρά του υλικού δεν ξεπερνάει τους 300°C και η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου διατηρείται σε επίπεδα χαμηλότερα από τους 100°C

[15]. Η αυξημένη αντίσταση του Glare στη διαπερατότητα από φωτιά αυξάνει το χρόνο εκκένωσης του αεροσκάφους μετά την εκδήλωση πυρκαγιάς.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται κατά το χτύπημα κεραυνού στο Glare. Αποτέλεσμα είναι η βλάβη που προκαλείται από έναν κεραυνό σπάνια να διαπερνά τα δύο πρώτα στρώματα του υλικού. Αντίθετα στο μονολιθικό αλουμίνιο το ποσό θερμότητας που προσδίδεται από έναν κεραυνό είναι αρκετό να προκαλέσει τήξη σε όλο το πάχος του υλικού στο σημείο όπου χτυπήθηκε (σημείο εκκένωσης).

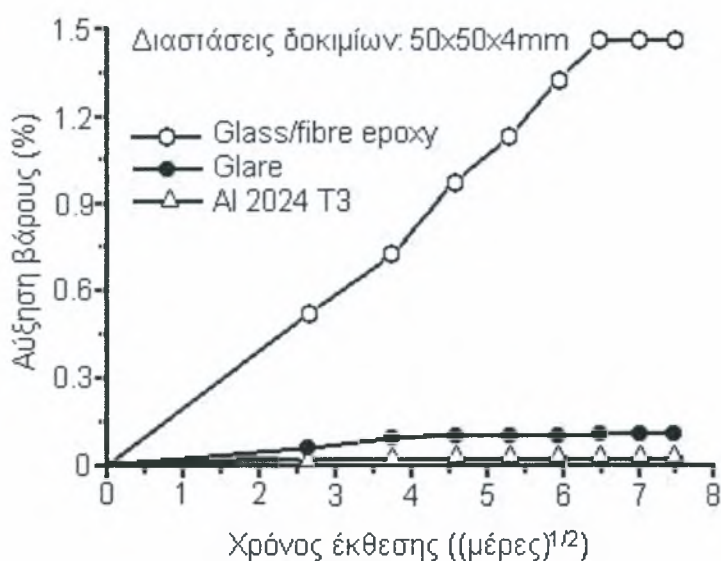
Σημαντική είναι και η αντίσταση του Glare σε διάβρωση. Σημαντικό ρόλο στη διαβρωτική συμπεριφορά παίζει ο ρυθμός της ψύξης στη βαφή κατά τη θερμική επεξεργασία του υλικού. Μικροί ρυθμοί ψύξης του κράματος 2024-T3 επιτρέπουν την καθίζηση της S-φάσης (πλούσια σε χαλκό φάση) στα όρια των κόκκων. Η καθίζηση της φάσης αυτής στα όρια των κόκκων δημιουργεί μια ζώνη εκατέρωθεν των συνόρων χαμηλής περιεκτικότητας σε χαλκό, αυξάνοντας την ευαισθησία του υλικού σε περικρυσταλλική διάβρωση. Τα φύλλα αλουμινίου που απαρτίζουν το Glare είναι πάχους 0.3 έως 0.5mm κάτι που επιτρέπει τον ίδιο, σχεδόν σε όλο το πάχος των ελασμάτων, υψηλό ρυθμό ψύξης αποτρέποντας τη καθίζηση S-φάσης στα όρια των κόκκων και μειώνοντας την ευαισθησία τους σε περικρυσταλλική διάβρωση.

Επίσης, τα ενδιάμεσα στρώματα prepreg δρουν σαν φράγματα της διάβρωσης. Ακόμα και όταν το εξωτερικό στρώμα αλουμινίου έχει καταστραφεί σε μεγάλο βαθμό από τη διαβρωτική διεργασία, το στρώμα του prepreg παρεμβάλλεται ανάμεσα στο διαβρωτικό περιβάλλον και το επόμενο φύλλο αλουμινίου αναχαιτίζοντας τη διαβρωτική δράση. Στο σχήμα 2.11 φαίνεται το εύρος της διαβρωτικής προσβολής σε δοκίμια Glare 5/4 και μονολιθικού αλουμινίου ίδιου πάχους, που υποβλήθηκαν σε δοκιμή διάβρωσης αποφλοιώσεως για ίδιο χρονικό διάστημα. Τα δοκίμια έχουν σχεδόν το ίδιο βάθος προσβολής. Μηχανικές δοκιμές όμως έδειξαν πως το διαβρωμένο δοκίμιο Glare διατηρεί σε μεγαλύτερο βαθμό τις μηχανικές του ιδιότητες εξαιτίας του ανεπηρέαστου εσωτερικού του.



Σχήμα 2.11: Σύγκριση εύρους διαβρωτικής προσβολής σε Al 2024-T3 και Glare 5/4 [15].

Τέλος είναι γνωστό πως τα πολυμερή υλικά είναι ευαίσθητα στην απορρόφηση υγρασίας με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Ένα από τα τρία κύρια συστατικά του Glare είναι η εποξική ρητίνη του prepreg. Επομένως ένα εύλογο ερώτημα που γεννιέται είναι κατά πόσο το Glare επηρεάζεται από την υγρασία. Το σχήμα 2.12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα δοκιμής απορρόφησης υγρασίας που έγιναν σε δοκίμια αλουμινίου, Glare και prepreg. Είναι εμφανές ότι το ποσό της υγρασίας που απορροφάται από το Glare είναι πολύ κοντά στη συμπεριφορά του αλουμινίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ελεύθερες επιφάνειες του prepreg σε ένα υλικό Glare είναι ένα μικρό ποσοστό της συνολικά εκτιθέμενης επιφάνειας. Παραδείγματος χάριν σε ένα δοκίμιο Glare 5-3/2-0.4, που είναι ο τύπος με τα περισσότερα prepreg ανά στρώμα ρητίνης/ινών, 4 στον αριθμό, η εκτιθέμενη επιφάνεια των prepreg είναι λιγότερο από 50% της παράπλευρης μόνο εκτιθέμενης επιφάνειας. Αν αναλογιστεί κανείς ότι το υλικό κατασκευάζεται ως επί το πλείστον σε πλάκες, που σημαίνει πολύ μικρό πάχος συγκριτικά με την επιφάνειά του, τότε ο λόγος της ελεύθερης επιφάνειας των prepreg προς τη συνολική επιφάνεια είναι πολύ μικρός. Επίσης το γεγονός ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες καλείται να λειτουργήσει ένα αεροσκάφος μεταβάλλονται από υψηλά σε χαμηλά ποσοστά σχετικής υγρασίας επιτρέπει την εκρόφηση της υγρασίας κατά τα ξηρά χρονικά διαστήματα. Ταυτόχρονα οι ίνες του prepreg εμποδίζουν τη σε βάθος απορρόφηση υγρασίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεν αναμένεται σημαντική υποβάθμιση των ιδιοτήτων του Glare λόγω της υγρασίας.

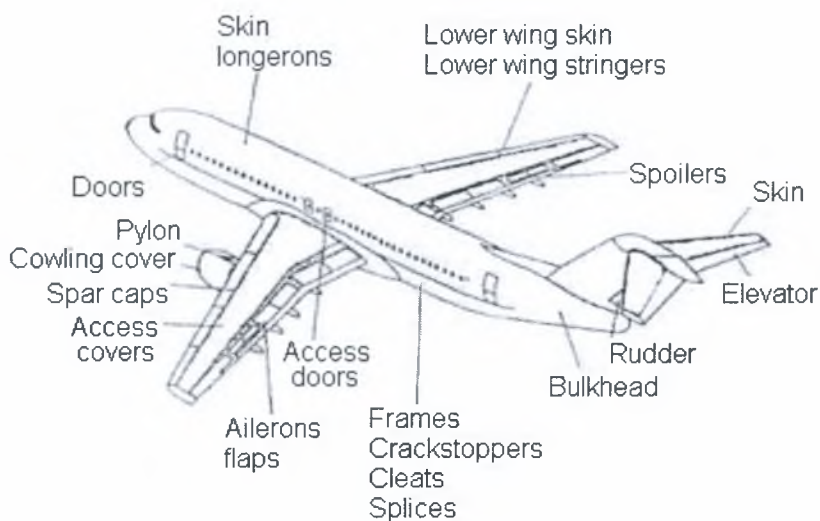


Σχήμα 2.12: Απορρόφηση υγρασίας από Al 2024-T3, Glare 3/2 και prepreg [15].

2.3.4 Εφαρμογή του Glare.

Οι ιδιότητες του Glare που περιγράφηκαν παραπάνω δείχνουν πως πρόκειται για ένα ιδιαίτερα προηγμένο υλικό με πολύ καλό δυναμικό χρήσης σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών περιοχών των αεροσκαφών, κάθε μια με ξεχωριστές απαιτήσεις.

Η πολύ καλή συμπεριφορά του σε κόπωση και κρούση το καθιστούν ιδανικό για πολλά σημεία του περιβλήματος της ατράκτου και των φτερών. Επίσης είναι μια καλή επιλογή για τα πατώματα των αεροσκαφών, τόσο στο χώρο αποσκευών όσο και στην καμπίνα, όπου η δραστηριοποίηση του ανθρώπου επιφέρει συχνά χτυπήματα. Τέλος, η αντίσταση που προβάλλει το Glare στη φωτιά το καθιστά ιδανικό για την προστασία των επιβατών. Τα υποψήφια σημεία ενός αεροσκάφους για την εφαρμογή του Glare φαίνονται στο σχήμα 2.13.

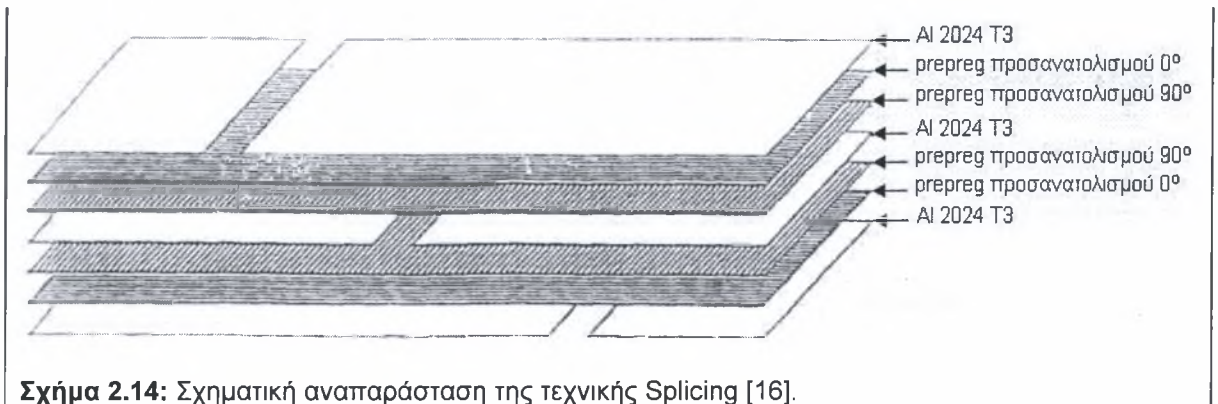


Σχήμα 2.13: Υποψήφια σημεία εφαρμογής του Glare [16].

2.3.5 Τεχνική παραγωγής υλικού μεγάλων διαστάσεων (splicing technique).

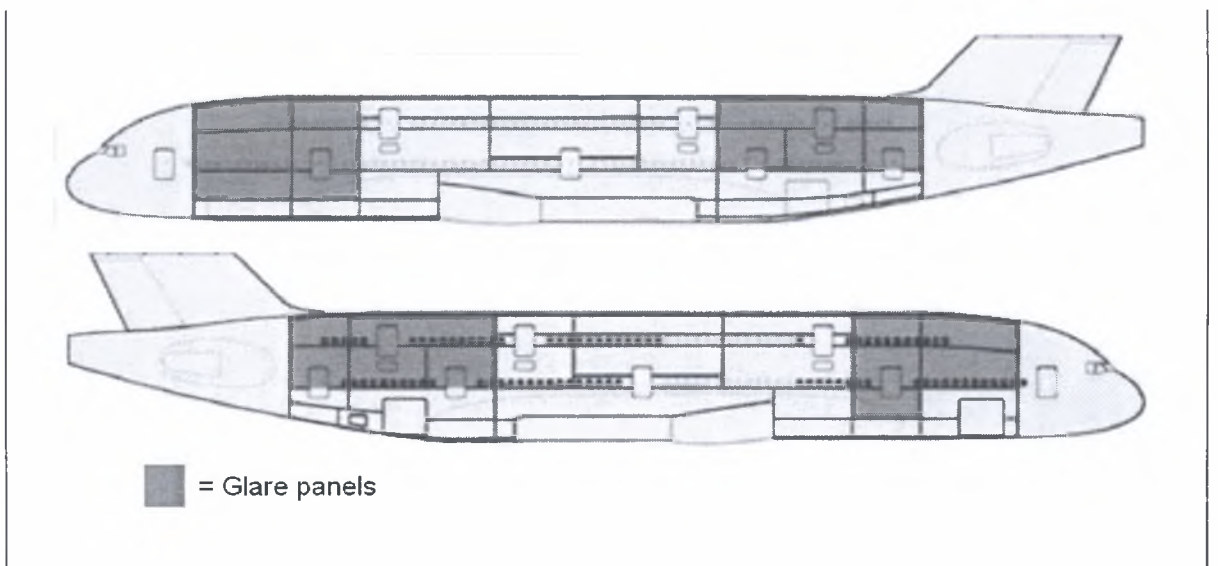
Στο μεγάλο αριθμό επιλογών εφαρμογής του Glare έχει συμβάλλει και η δυνατότητα παραγωγής πλακών υλικού σε διαστάσεις μεγαλύτερες από αυτές που είναι δυνατόν να παραχθούν με την έλαση του αλουμινίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη τεχνική του «splicing» (σχήμα 2.14). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή κατά τη σύνθεση του υλικού το κάθε στρώμα αλουμινίου αποτελείται από περισσότερα από ένα φύλλα αλουμινίου τοποθετημένα στη σειρά. Η τοποθέτησή τους γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι ακμές των φύλλων του ενός στρώματος να μην συμπέφτουν με τις ακμές των φύλλων κάποιου άλλου στρώματος. Η διάταξη αυτή ακολουθείται σε όλο το εύρος του υλικού και στις περιοχές όπου υπάρχουν ακμές φύλλων αλουμινίου τοποθετούνται πρόσθετα φύλλα αλουμινίου εξωτερικά για την τοπική ενίσχυση του υλικού. Με τον τρόπο αυτό αποτρέπεται η δημιουργία αδύναμων

περιοχών όπου διατμητικές τάσεις παράλληλες με την ακμή των φύλλων αλουμινίου θα μπορούσαν να τα ξεκολλήσουν.



Σχήμα 2.14: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής Splicing [16].

Αποτέλεσμα της τεχνικής αυτής είναι η κατασκευή τμημάτων, των οποίων οι διαστάσεις περιορίζονται μόνο από το μέγεθος των κλιβάνων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του Glare. Η χρήση μεγάλων κομματιών υλικού μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων συνδέσεων σε μια κατασκευή. Κατασκευάζοντας το περίβλημα της ατράκτου ενός αεροσκάφους με “spliced” Glare (σχήμα 2.15) είναι δυνατόν να επιτευχθεί έως και 3% μείωση του βάρους της μόνο από τον μικρότερο αριθμό συνδέσεων που θα χρειαστούν. Η διαφορά είναι σημαντική αν αναλογιστούμε ότι στα σύγχρονα αεροσκάφη μόλις ένα ποσοστό 20% είναι ωφέλιμο βάρος. Επίσης σημαντική είναι η ελάττωση του αρχικού κόστους του αεροσκάφους που επιτυγχάνεται χάρη στον μικρότερο αριθμό συνδέσεων και το χαμηλότερο κόστος συναρμολόγησης [16].



Σχήμα 2.15: Εφαρμογή του Glare στο περίβλημα της ατράκτου του A380 [14].

Συνοψίζοντας, το Glare παρουσιάζει μια σειρά από χαρακτηριστικές, βελτιωμένες σε σχέση με τα κράματα αλουμινίου, ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές συνδέονται τόσο με την βελτίωση της ασφάλειας των αεροσκαφών, όσο και με τη μείωση του λειτουργικού αλλά και του κατασκευαστικού κόστους. Η βελτίωση της ασφάλειας έγκειται στην αυξημένη αντοχή του Glare σε κόπωση, την ανοχή σε βλάβη, την αντίσταση σε διάβρωση και τη χαμηλή διαπερατότητα από φωτιά. Το λειτουργικό κόστος βελτιώνεται καταρχήν εξαιτίας της μείωσης του βάρους των αεροσκαφών. Οποιοδήποτε ποσό εξοικονόμησης βάρους αντιστοιχεί σε εκμετάλλευση μεγαλύτερου ωφέλιμου φορτίου ή εξοικονόμηση καυσίμων. Επίσης το λειτουργικό κόστος βελτιώνεται χάρη στη δυνατότητα παρεμβολής μεγάλων χρονικών διαστημάτων ανάμεσα στις επιθεωρήσεις και τις επισκευές των αεροσκαφών. Τέλος χάρη στην τεχνική των “spliced laminates” είναι δυνατή η δημιουργία μεγάλων κομματιών υλικού, οδηγώντας σε απλούστερες και φθηνότερες κατασκευές.

Αναφορές

- [1] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Επιλογή υλικών στο μηχανολογικό σχεδιασμό, Βόλος, 2004
- [2] Materials for sporting, Advanced Materials and Processes, September 2004.
- [3] E. C. Botelho, L. C. Pardini, M. C. Rezende, Hygrothermal effects on damping behaviour of metal/ glass fibre/ epoxy hybrid composites, Materials Science and Engineering A 399 (2005) 190–198
- [4] T.S. Gates, G. M. Odegard, F. J. V. Frankland and T. C. Clancy, Computational materials: Multi-scale modeling and simulation of nanostructured materials, Composites Science and Technology 65 (2005) 2416-2434
- [5] A. Vlot, J. W. Gunnink, Fibre Metal Laminates, an introduction, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [6] D. R. Askeland, The Science and Engineering of Materials, Chapman and Hall, London, UK, 1996.
- [7] ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1993.
- [8] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική μεταλλουργία, Θεμελιώδεις αρχές, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2000.
- [9] E. Kamoutsi, Corrosion induced Hydrogen Embrittlement in High Strength Al-Alloys, Phd-Thesis, Volos, 2004.
- [10] BR[®] 127 Corrosion Inhibiting Primer, Technical Datasheet, Cytec Engineered Materials, 1996.
- [11] FM[®] 94 Modified Epoxy Film, Technical Datasheet, Cytec Engineered Materials, 1997.
- [12] http://web.mit.edu/3.082/www/team3_f02/pages/materials.html
- [13] http://www.amalgacomposites.com/eng_mp.htm
- [14] Guocai Wu, J.-M. Yang, The Mechanical Behaviour of GLARE Laminates for Aircraft Structures, Journal of materials, p 72-79, January 2005

- [15]** E. C. Botelho, L. C. Pardini, M. C. Rezende, Hygrothermal effects on damping behaviour of metal/glass fiber/epoxy hybrid composites, *Materials Science and Engineering A* 399, p 190–198, 2005
- [16]** A. Asundi, Alta Y. N. Choi, Fibre Metal Laminates: An Advanced Material for Future Aircraft, *Journal of Materials Processing Technology* 63, p 384-394, 1997
- [17]** FM[®] 73 Toughened Epoxy Film, Technical Datasheet, Cytac Engineered Materials, 1998.

Κεφάλαιο 3: Διάβρωση.

3.1 Εισαγωγή.

Με τον όρο διάβρωση εννοούμε την καταστροφή ενός μεταλλικού υλικού κάτω από την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων [1]. Η διάβρωση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό οικονομικό και τεχνολογικό πρόβλημα. Προκαλεί την υποβάθμιση των ιδιοτήτων των υλικών με αποτέλεσμα την απαίτηση τακτικής συντήρησης και επιθεώρησης των κατασκευών και επομένως την αύξηση του λειτουργικού τους κόστους. Σε περίπτωση ελλιπούς συντήρησης είναι πιθανή η αστοχία του υλικού επηρεάζοντας τη δομική και λειτουργική ακεραιότητα των κατασκευών με δυσάρεστα αποτελέσματα, είτε είναι οικονομική απώλεια ή ακόμα χειρότερα απώλεια ανθρώπινων ζωών. Ιδιαίτερη πρόνοια πρέπει να λαμβάνεται για την προστασία των κατασκευών από τα διαβρωτικά φαινόμενα αυξάνοντας το κατασκευαστικό πάγιο κόστος τους.

Η διαβρωτική διεργασία είναι μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία εμπλέκει περισσότερες από μια επιστημονικές περιοχές. Θερμοδυναμικά, ηλεκτροχημικά και φυσικοχημικά φαινόμενα λαμβάνουν ταυτόχρονα χώρα σε μια διαβρωτική διεργασία. Η κατανόηση των παραπάνω φαινομένων είναι προαπαιτούμενη για τη ορθή περιγραφή της διαβρωτικής δράσης.

Χαρακτηριστικό των διαβρωτικών φαινομένων είναι η πολλαπλότητα των μορφών με τις οποίες μπορεί να εμφανιστούν. Τρημματική, γαλβανική, εργοδιάβρωση, κλπ, είναι όλες μορφές διάβρωσης με σημαντικές διαφορές αλλά και ομοιότητες πολλές φορές. Προσπάθειες για τη συγκρότηση κατηγοριών με γενικά χαρακτηριστικά έχουν γίνει αλλά δεν είναι καθολικές, καθώς δύο μορφές διάβρωσης μπορούν να είναι τόσο διαφορετικές όσο και όμοιες μεταξύ τους με αποτέλεσμα τη δυσκολία ένταξής του σε κάποια συγκεκριμένη κατηγορία. Οι πιο σημαντικές κατηγοριοποιήσεις που έχουν προταθεί είναι ως προς τα οπτικά χαρακτηριστικά της μορφολογίας και ως προς το μηχανισμό της διαβρωτικής δράσης.

Η γνώση της θεωρίας των διαβρωτικών φαινομένων και των μορφών με τις οποίες εμφανίζονται είναι απαραίτητη για τη σωστή αντιμετώπιση των συνεπειών τους. Σημαντικό είναι να αντιμετωπίζεται η διάβρωση εξ αρχής με την πρόληψη και τον περιορισμό της διαβρωτικής προσβολής των κατασκευών. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η συχνότητα των απαιτούμενων επισκευών και βελτιώνεται κατά πολύ η ωφέλιμη διάρκεια ζωής των κατασκευών, χωρίς αυτό να σημαίνει ελάττωση της συχνότητας των ελέγχων. Υπάρχει μεγάλο πλήθος διαφορετικών μεθόδων προστασίας των υλικών από τις οποίες ο μηχανικός

καλείται να επιλέξει την κατάλληλη για μια δεδομένη κατάσταση περιβαλλοντικών και άλλων παραγόντων.

Η διάβρωση είναι ένα φαινόμενο που απασχολεί σε μεγάλο βαθμό την αεροπορική βιομηχανία. Η δομή και η λειτουργία των αεροσκαφών δημιουργεί πλήθος περιοχών ευαίσθητων σε διάβρωση. Η ανάγκη για ελαφριές κατασκευές οδήγησε στην εκτεταμένη χρήση του αλουμινίου και ειδικά των κραμάτων υψηλής αντοχής της σειράς 2xxx, τα οποία όμως εμφανίζουν μειωμένη αντίσταση σε διάβρωση.

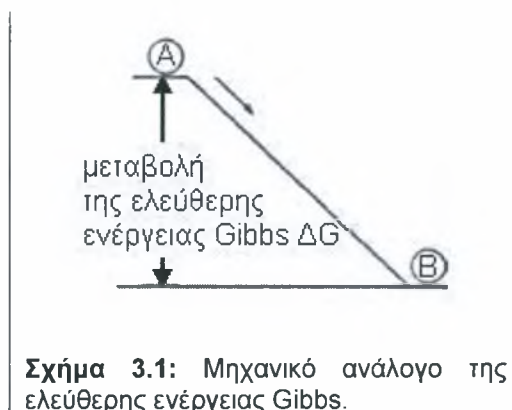
Παρακάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών της διάβρωσης και μερικών συχνά εμφανιζόμενων μορφών διάβρωσης. Ακολουθούν κάποιοι βασικοί κανόνες για την προστασία των κατασκευών από τη διαβρωτική δράση. Ακόμα επιχειρείται μια εισαγωγή στην επιρροή των διαβρωτικών φαινομένων στις αεροπορικές κατασκευές και τις κύριες μορφές με τις οποίες εμφανίζεται η διάβρωση σε αυτές. Τέλος γίνεται περιγραφή των βασικών ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου 2xxx που επηρεάζουν την διαβρωτική δράση καθώς και των βασικών μορφών διάβρωσης που συναντώνται στα κράματα αυτά.

3.2 Θεωρία της διάβρωσης.

Η πρώτη επιχείρηση κατανόησης των διαβρωτικών φαινομένων έγινε μέσω της θερμοδυναμικής. Η θερμοδυναμική όμως από μόνη της δεν ήταν αρκετή για να εξηγήσει πλήρως τη διαβρωτική δράση καθώς αρκείται στο αν είναι εφικτή μια διαβρωτική διαδικασία ή όχι. Η μεταφορά ηλεκτρονίων που συμβαίνει κατά τη διάβρωση των υλικών εμπλέκει φαινόμενα ηλεκτροχημείας. Ταυτόχρονα μεταλλουργικοί παράγοντες και φυσικά φαινόμενα επηρεάζουν το είδος προσβολής και την εξέλιξη της διαβρωτικής δράσης σε ένα υλικό. Τρεις τύποι διάβρωσης υπάρχουν, διάβρωση σε υδάτινο περιβάλλον, διάβρωση σε τηγμένα άλατα και υγρά μέταλλα και διάβρωση σε αέριο περιβάλλον. Η αέρια διάβρωση εξελίσσεται σε ρευστά μη αγώγιμα μέσα. Οφείλεται στην αλληλεπίδραση του οξειδίου με την επιφάνεια του μεταλλικού υλικού προς το σχηματισμό του αντίστοιχου οξειδίου. Η υδατική διάβρωση περιλαμβάνει την παρουσία ενός αγώγιμου μέσου και την ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος. Η διάβρωση σε τηγμένα μέταλλα ή άλατα είναι μια ενδιάμεση κατάσταση των δύο προηγούμενων. Σε κάθε τύπο διάβρωσης οι μηχανισμοί της ηλεκτροχημείας, της μεταλλουργίας και της φυσικοχημείας λειτουργούν διαφορετικά. Παρακάτω περιγράφονται εν συντομία οι μηχανισμοί που εμφανίζονται στην αέρια και την υδατική διάβρωση, που είναι οι πιο κοινοί τύποι διάβρωσης, με έμφαση στην υδατική που θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία.

3.2.1 Θερμοδυναμική της διάβρωσης.

Κάθε φυσικό σύστημα επιδιώκει τη θερμοδυναμική ισορροπία. Κάθε σύστημα στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας έχει τη χαμηλότερη ελεύθερη ενέργεια. Για συστήματα σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας η ενέργεια αυτή ονομάζεται ελεύθερη ενέργεια Gibbs και δίνεται από τον τύπο $G=H-TS$ όπου "H" η ενθαλπία, "S" η εντροπία και "T" η απόλυτη θερμοκρασία του συστήματος. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs για μια διαδικασία δείχνει αν αυτή είναι αυθόρμητα πραγματοποιήσιμη ή αν χρειάζεται να προσδοθεί ενέργεια για την πραγματοποίησή της. Η τάση κάθε συστήματος προς την κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας και το γεγονός ότι στην κατάσταση αυτή η ελεύθερη ενέργεια Gibbs είναι η ελάχιστη δυνατή σημαίνει πως για μια διαδικασία μόνο όταν η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs είναι αρνητική εξελίσσεται αυθόρμητα. Σε αντίθετη περίπτωση χρειάζεται να προσδοθεί κάποια μορφή εξωτερικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό είναι το μηχανικό ανάλογο της ελεύθερης ενέργειας Gibbs (σχήμα 3.1). Η θέση ισορροπίας είναι η B επομένως $G_B < G_A$. Η κίνηση της σφαίρας από το σημείο A στο B γίνεται αυθόρμητα αφού $G_B < G_A \Rightarrow G_B - G_A < 0 \Rightarrow \Delta G < 0$. Αντίθετα για την κίνηση της σφαίρας από τη θέση B στην A, $\Delta G > 0$ οπότε χρειάζεται να προσδοθεί στο σύστημα ενέργεια ίση με την απαιτούμενη μεταβολή δυναμικής ενέργειας.



Όπως όλα τα φυσικά φαινόμενα, έτσι και η διάβρωση των μεταλλικών υλικών υπόκειται στους νόμους της θερμοδυναμικής. Κανένα από τα μεταλλικά στοιχεία δεν βρίσκεται ελεύθερο στη φύση. Εκτός από ορισμένες εξαιρέσεις όπως ο χρυσός και η πλατίνα, όλα τα υπόλοιπα στοιχεία βρίσκονται υπό τη μορφή ενώσεων όπως οξείδια και θειούχες και ανθρακικές ενώσεις. Αυτή είναι η κατάσταση ισορροπίας των ενώσεων και αντιστοιχεί στη θέση B του μηχανικού αναλόγου. Για την εξαγωγή καθαρών στοιχείων από την ορυκτή τους μορφή χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας, τα οποία μεταβιβάζουν τα στοιχεία σε μια θέση με υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο, τη θέση A. Η παραγωγή του αλουμινίου για παράδειγμα γίνεται με την αναγωγή του οξειδίου Al_2O_3 (αλουμίνα προερχόμενη από ορυκτό βωξίτη) με υψηλά απαιτούμενα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας [4]. Η φυσική τάση για την αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας θα προκαλέσει τη διάβρωση του υλικού και θα μετατρέψει το καθαρό αλουμίνιο και πάλι σε αλουμίνα με το πέρασμα του χρόνου.

Η θερμοδυναμική της διάβρωσης δείχνει μόνο αν είναι εφικτή η αντίδραση της διάβρωσης. Δεν παρέχει κανένα στοιχείο για την ταχύτητα της διαβρωτικής δράσης. Αυτό σημαίνει πως η θερμοδυναμική δεν μπορεί να περιγράψει από μόνη της τα διαβρωτικά φαινόμενα. Η ταχύτητα εξέλιξης της διάβρωσης καθορίζεται από την κινητική της, η οποία εμπλέκει ηλεκτροχημικά και φυσικοχημικά φαινόμενα. Σημαντική επίσης για την κατανόηση των διαβρωτικών διεργασιών στα μέταλλα είναι η κατανόηση βασικών αρχών της μεταλλουργίας.

3.2.2 Διάβρωση σε μη αγώγιμο περιβάλλον (αέρια διάβρωση).

Η διάβρωση σε μη αγώγιμο περιβάλλον ονομάζεται και χημική διάβρωση ή οξειδωση. Εξελίσσεται και περιορίζεται στην επιφάνεια των μεταλλικών υλικών και των προϊόντων της διάβρωσης. Η χημική διάβρωση εξελίσσεται κατά την αντίδραση $(2x/y)M + O_2 \rightarrow (2/y)M_xO_y$. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs για μια χημική εξίσωση της μορφής $\alpha A + \beta B \rightarrow \gamma C + \delta D$ δίνεται από τον τύπο $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(a_C^\gamma a_D^\delta / a_A^\alpha a_B^\beta)$ όπου a_A , a_B , a_C και a_D είναι οι ενεργότητες των αντίστοιχων στοιχείων, α , β , γ και δ είναι οι στοιχειομετρικοί συντελεστές της εξίσωσης, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T η απόλυτη θερμοκρασία και ΔG° είναι οι standard τιμή ελεύθερης ενέργειας Gibbs για το σχηματισμό των οξειδίων σε αυτή τη θερμοκρασία. Αρνητική μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας σημαίνει πως η διαβρωτική διεργασία είναι πραγματοποιήσιμη.

Κατά την οξειδωση ενός μετάλλου το οξυγόνο του περιβάλλοντος αντιδρά με την επιφάνεια του υλικού σχηματίζοντας το αντίστοιχο οξείδιό του. Τα σχηματιζόμενα οξείδια παραμένουν συνήθως στην επιφάνεια του κυρίως μετάλλου επηρεάζοντας την μετέπειτα εξέλιξη της διάβρωσης. Η διεργασία της οξειδωσης ενός μετάλλου "M" περιγράφεται από δύο βασικές εξισώσεις, την οξειδωση του μετάλλου $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$ και την αναγωγή του οξυγόνου $O_2 + ne^- \rightarrow (n/2)O^{2-}$ που συνοψίζονται στην γενική εξίσωση που δόθηκε στην αρχή του παρόντος υποκεφαλαίου. Η πραγματοποίηση της παραπάνω αντίδρασης εξαρτάται από το λόγο της τάσης διάσπασης του σχηματιζόμενου οξειδίου προς τη μερική πίεση του οξυγόνου.

Μετά το σχηματισμό του πρώτου στρώματος οξειδίου οι ιδιότητες αυτού καθορίζουν τη μετέπειτα εξέλιξη της διαβρωτικής διεργασίας. Ένα οξείδιο συνεχές (χωρίς ρωγμές), συμπαγές (χωρίς πόρους), και με καλή σύμφυση με το μεταλλικό υλικό είναι δυνατό να ανακόψει την πορεία της διάβρωσης εμποδίζοντας το «καθαρό» υλικό να έρθει σε επαφή με το οξυγόνο. Χαρακτηριστικό είναι το οξείδιο Al_2O_3 που σχηματίζεται κατά τη διάβρωση του αλουμινίου το οποίο είναι υπεύθυνο για την πολύ καλή αντίσταση του αλουμινίου σε διάβρωση. Αντίθετα υλικά τα οποία δεν δύνανται να σχηματίσουν συνεχές οξείδιο συνεχίζουν να διαβρώνονται γραμμικά με την πάροδο του χρόνου.

3.2.3 Διάβρωση σε αγώγιμο περιβάλλον (υδατική διάβρωση).

Η διαφορά της υδατικής από την αέρια διάβρωση είναι ότι στην πρώτη το περιβάλλον στο οποίο εξελίσσεται η διάβρωση είναι αγώγιμο με αποτέλεσμα την εξέλιξη της διαβρωτικής δράσης λόγω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στη διεπιφάνεια υλικού/υδατικού διαλύματος.

Όταν ένα κομμάτι μετάλλου (ηλεκτρόδιο) βυθίζεται σε αγώγιμο διάλυμα (ηλεκτρολύτης) υπάρχει η έμφυτη τάση για μεταξύ τους εναλλαγή φορτίων (ηλεκτροχημική αντίδραση). Κινούσα δύναμη για αυτή τη διεργασία είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs που φέρει το ηλεκτρόδιο. Η ηλεκτροχημική αντίδραση που συμβαίνει στην διεπιφάνεια του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη οδηγεί στο σχηματισμό του διπλού ηλεκτροχημικού στρώματος (σχήμα 3.2). Ο ιονισμός του μετάλλου, η συσσωμάτωση των ηλεκτρονίων στη μεταλλική επιφάνεια, η μεταφορά ηλεκτρονίων μέσω της διεπιφάνειας και η προσρόφηση φορτισμένων και μη σωματιδίων σε αυτή είναι οι διεργασίες που σχηματίζουν το διπλό ηλεκτροχημικό στρώμα. Αποτέλεσμα του διπλού ηλεκτροχημικού στρώματος είναι η ηλεκτρική φόρτιση του ηλεκτροδίου σε σχέση με τον ηλεκτρολύτη.

Διαφορετικά μεταλλικά υλικά όταν βυθίζονται στον ίδιο ηλεκτρολύτη προκαλούν και διαφορετική τιμή ηλεκτροδιακού δυναμικού. Η τιμή αυτή εξαρτάται από το είδος του ηλεκτρολύτη και την ελεύθερη ενέργεια Gibbs του υλικού του ηλεκτροδίου. Στον πίνακα 3.1 φαίνεται η πρότυπη σειρά ηλεκτρεγερτικών δυναμικών ως προς το πρότυπο δυναμικό του υδρογόνου. Αποτέλεσμα είναι, όταν

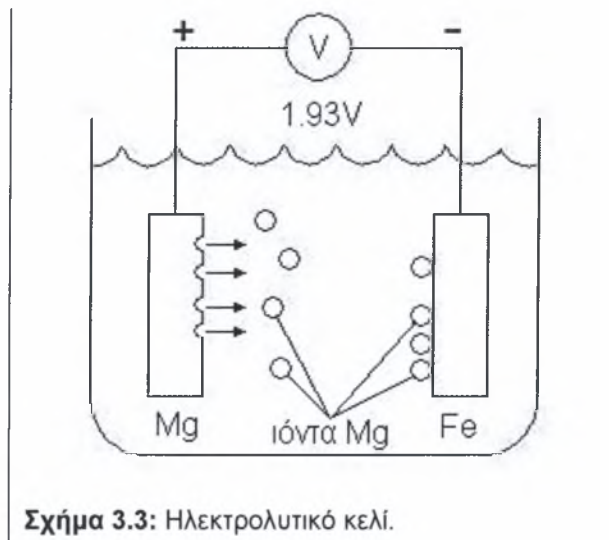


Σχήμα 3.2: Το διπλό ηλεκτροχημικό στρώμα [2].

Πίνακας 3.1: Μέρος της πρότυπης σειράς ηλεκτρεγερτικών δυναμικών [3].

Electrode reaction	Standard potential at 25°C, Volts versus SHE
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	1.50
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	0.800
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0.337
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	(reference), 0.000
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.250
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0.440
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2.37

αποκατασταθεί ηλεκτρική επαφή, μέσα σε κάποιον ηλεκτρολύτη, μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών να δημιουργείται διαφορά δυναμικού εξαιτίας των διαφορετικών φορτίων των ηλεκτροδίων τους κάτι που προκαλεί τη διάβρωση του πιο ενεργού υλικού. Το υλικό της καθόδου παραμένει ανέπαφο από τη διαβρωτική διεργασία. Στο σχήμα 3.3 το μαγνήσιο έχει δυναμικό $E_{Mg}=-2.37V$ και ο σίδηρος $E_{Fe}=-0.44V$. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία διαφοράς δυναμικού $|E_{Mg}-E_{Fe}|=1.93V$ με συνέπεια την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων από το ανοδικότερο υλικό (μαγνήσιο) στο λιγότερο ανοδικό (σίδηρος) και την κατανάλωση (διάβρωση) του ηλεκτροδίου της ανόδου.

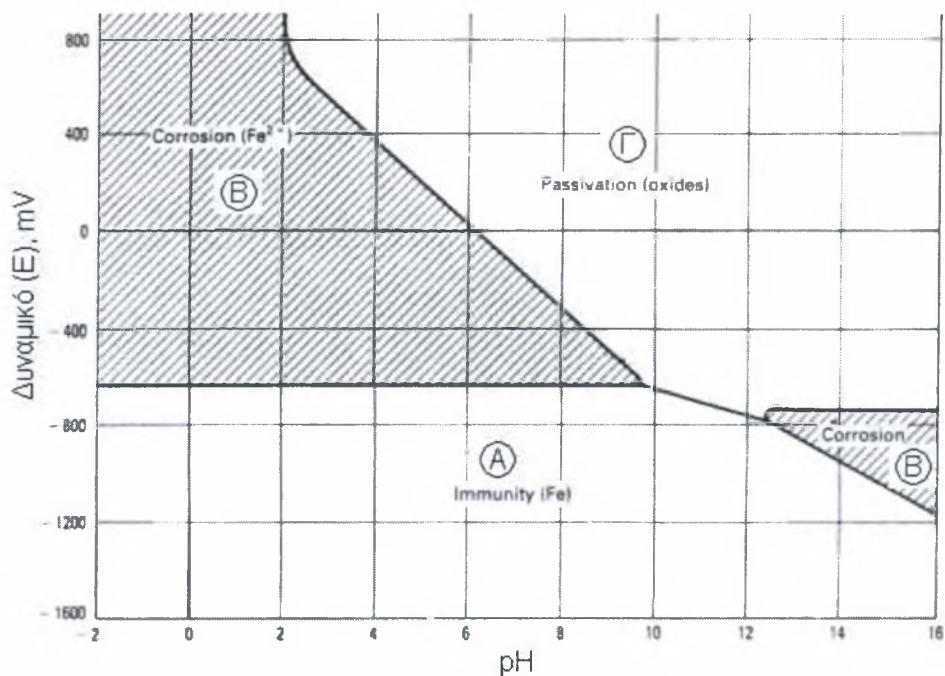


Σχήμα 3.3: Ηλεκτρολυτικό κελί.

Για την ηλεκτροχημική αντίδραση της παραπάνω διεργασίας η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs δίνεται από τον τύπο $\Delta G=-nFE$, όπου "n" είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά άτομο των συμμετεχόντων, "F" η σταθερά του Faraday (96480 J/volt) και "E" το δυναμικό του κελιού.

Στην περίπτωση που ο ηλεκτρολύτης είναι το νερό η ηλεκτροχημική διάβρωση απαρτίζεται από δύο διεργασίες: την παραγωγή ηλεκτρονίων στην άνοδο επομένως την κατανάλωσή της σύμφωνα με την αντίδραση $M_a \rightarrow M_a^{+n} + ne^-$ (οξειδωση) και την απορρόφηση ηλεκτρονίων από την κάθοδο με χημική αντίδραση την $M_b^{+n} + ne^- \rightarrow M_b$ (αναγωγή).

Σημαντική βοήθεια στο να αποφανθούμε αν μια διεργασία ηλεκτροχημικής διάβρωσης είναι εφικτή δίνουν τα διαγράμματα ηλεκτροδιακού δυναμικού-οξύτητας του ηλεκτρολύτη (διαγράμματα Pourbaix, σχήμα 3.4). Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν την αλληλεπίδραση του υλικού με το είδος του ηλεκτρολύτη, την οξύτητά του και το ηλεκτροδιακό δυναμικό. Παρέχονται οι περιοχές σταθερότητας του μεταλλικού υλικού (περιοχή Α) όπου δεν πραγματοποιείται καμία διεργασία διάβρωσης και οι αντίστοιχες των προϊόντων της διάβρωσης (περιοχή Β), όπου το μεταλλικό υλικό είναι ασταθές και μετασχηματίζεται. Επίσης, υπάρχουν περιοχές (περιοχή Γ) όπου δημιουργείται ένα ισχυρά προσκολλημένο προστατευτικό επίστρωμα στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού με αποτέλεσμα την παθητικοποίηση και προστασία του.



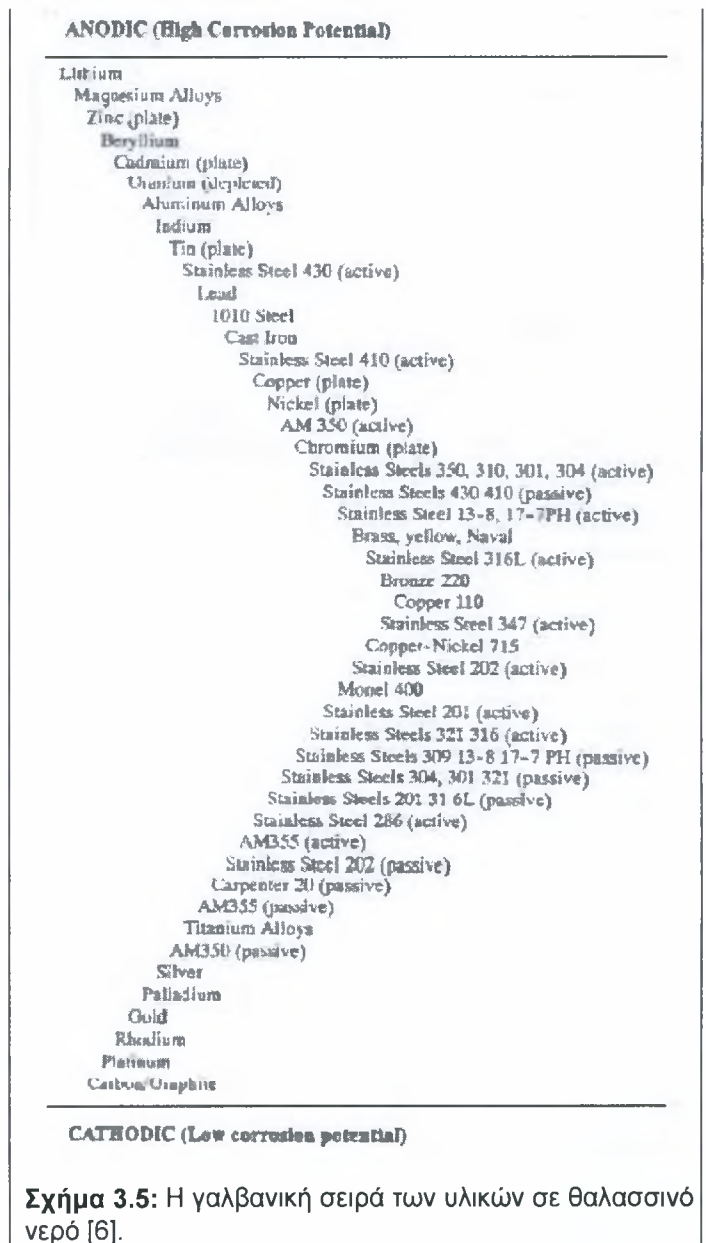
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα Pourbaix για τον σίδηρο [3].

Πολλαπλοί παράγοντες επηρεάζουν την ταχύτητα, πολλές φορές ακόμα και την πραγματοποίηση, μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είτε μεταλλουργικοί ή περιβαλλοντικοί. Οι μεταλλουργικοί παράγοντες αφορούν κυρίως την κατανομή των φάσεων στη μικροδομή ενός κράματος. Λόγω ανομοιόμορφης κατανομής αυτών μπορούν να δημιουργηθούν περιοχές με υψηλή διακύμανση του ηλεκτρεγερτικού δυναμικού. Αποτέλεσμα είναι η παρουσία κάποιου ηλεκτρολύτη να δημιουργήσει τοπικά ηλεκτρολυτικά κελιά και να προκαλέσει την επιλεκτική διάβρωση των ανοδικών περιοχών. Παρόμοια συμπεριφορά μπορούν να προκαλέσουν τυχόν πλαστικές παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις στα υλικά.

Οι σημαντικότεροι περιβαλλοντικοί παράγοντες οι οποίοι μπορούν να μεταβάλλουν την εξέλιξη μιας ηλεκτροχημικής διεργασίας διάβρωσης είναι το pH και η θερμοκρασία του ηλεκτρολυτικού διαλύματος, η ταχύτητα του ηλεκτρολύτη εφόσον υπάρχει ροή και η συγκέντρωση των συστατικών του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Οι παραπάνω παράγοντες συνήθως αλληλεπιδρούν και δεν υπάρχει γενικός κανόνας της επίδρασής τους στη διάβρωση. Για παράδειγμα εφαρμογή εξωτερικής πηγής δυναμικού μπορεί να επιφέρει την πόλωση της καθόδου και την επιβράδυνση της διάβρωσης. Αύξηση του δυναμικού όμως συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας λόγω μεγαλύτερης έντασης ρεύματος. Αυξημένη θερμοκρασία συνήθως σημαίνει επιτάχυνση των διαβρωτικών φαινομένων, όμως επίσης μπορεί να προκαλέσει πτώση της διαλυτότητας του οξυγόνου στο νερό με ευνοϊκά για τη διάβρωση αποτελέσματα. Η συνδυασμένη μεταβολή του pH του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδιακού δυναμικού μπορεί να επιφέρει τις συνθήκες παθητικοποίησης ή ανοσίας του

υλικού σύμφωνα με το κατάλληλο διάγραμμα Pourbaix. Προσθήκη διάφορων ουσιών στον ηλεκτρολύτη μπορεί να περιορίσει τη διαβρωτική δράση παραδείγματος χάριν με τη ρύθμιση του pH.

Τέλος, σημαντική μείωση του ρυθμού της διάβρωσης συμβαίνει όταν τα υλικά που σχηματίζουν ηλεκτροχημικό κελί δεν διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ως προς την ενεργότητά τους. Σημαντική είναι λοιπόν η γνώση της ηλεκτροχημικής σειράς των υλικών σε συγκεκριμένο ηλεκτρολύτη. Το δυναμικό του κελιού είναι το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών των ημιστοιχείων. Το δυναμικό ενός ηλεκτροδίου εξαρτάται από το υλικό του και το ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Ο υπολογισμός των δυναμικών των ημιστοιχείων για όλους τους συνδυασμούς υλικών και η καταγραφή τους σε πίνακες δεν ενδείκνυται για προφανείς λόγους. Για μηχανολογικούς σκοπούς δεν είναι απαραίτητη η γνώση του δυναμικού των ημιστοιχείων και των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν. Αρκεί η γνώση της σχετικής θέσης δύο υλικών στη σειρά ηλεκτρεγερτικών δυναμικών για τον προσδιορισμό του υλικού που θα διαβρωθεί και της σχετικής ταχύτητας της διαβρωτικής διεργασίας. Με τον όρο σχετική ταχύτητα εννοούμε ότι όταν δύο υλικά βρίσκονται πολύ κοντά στην ηλεκτρεγερτική σειρά η διαβρωτική διεργασία θα εξελιχθεί με αργό ρυθμό. Ποιοτικές ηλεκτρεγερτικές σειρές έχουν παραχθεί για ορισμένους ηλεκτρολύτες. Παράδειγμα αποτελεί η γαλβανική σειρά σε θαλασσινό νερό (σχήμα 3.5) η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί και για τους περισσότερους κοινούς υδατικούς ηλεκτρολύτες.



3.3 Μορφές διάβρωσης.

Η ταξινόμηση των διάφορων μορφών διάβρωσης δεν είναι εύκολη υπόθεση. Ο λόγος είναι ότι ναι μεν υπάρχουν μορφές διάβρωσης με πολλές ομοιότητες που θα μπορούσαν να αποτελούν μια κατηγορία, όμως υπάρχουν περιπτώσεις όπου μια μορφή διάβρωσης περιλαμβάνει και συνδυάζει χαρακτηριστικά από μορφές άλλων κατηγοριών. Η πιο κοινή κατηγοριοποίηση είναι αυτή που έχει γίνει από τους Fontana και Greene. Η κατηγοριοποίηση αυτή έγινε με βάση τα οπτικά χαρακτηριστικά της μορφολογίας της κάθε διαβρωτικής δράσης και περιλαμβάνει τις εξής κατηγορίες, ομοιόμορφη προσβολή, σχισματική διάβρωση, τρημματική διάβρωση, περικρυσταλλική διάβρωση, επιλεκτική διάβρωση (leaching), διάβρωση με εκτριβή, εργοδιάβρωση (SCC) και ψαθυροποίηση υδρογόνου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές σημαντικές μορφές διάβρωσης κατηγοριοποιημένες ως προς το μηχανισμό της διαβρωτικής δράσης σύμφωνα με το Corrosion Handbook της ASM [3]. Οι κατηγορίες αυτές είναι πέντε, γενική διάβρωση, συγκεντρωμένη διάβρωση, διάβρωση υποκινούμενη από μεταλλουργικούς παράγοντες, υποβάθμιση υποβοηθούμενη από μηχανικά αίτια και ρηγμάτωση επιβαλλόμενη από περιβαλλοντικά αίτια.

3.3.1 Γενική διάβρωση.

Με τον όρο γενική διάβρωση εννοούμε της διαβρωτικές διεργασίες κατά τις οποίες παρατηρείται ομοιόμορφη διάβρωση και κατανάλωση υλικού. Περιλαμβάνει τις ατμοσφαιρική, γαλβανική και γενική βιολογική διάβρωση, και τη διάβρωση σε τηγμένα άλατα, σε υγρά μέταλλα (τηγμένα) και σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι πιο συνηθισμένες μορφές γενικής διάβρωσης είναι η ατμοσφαιρική και η γαλβανική διάβρωση.

Η υποβάθμιση των μεταλλικών υλικών που συμβαίνει στο ρυπασμένο ατμοσφαιρικό αέρα ονομάζεται ατμοσφαιρική διάβρωση. Διακρίνεται σε ξηρή, σε διάβρωση παρουσία υγρασίας και σε υγρή διάβρωση λόγω των διαφορετικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα όταν εμπλέκεται ηλεκτρολύτης. Η ξηρή διάβρωση χαρακτηρίζεται από την αντίδραση των υλικών με το οξυγόνο προς σχηματισμό των σταθερότερων συγκριτικά οξειδίων τους. Αυξημένα ποσοστά υγρασίας οδηγούν στη δημιουργία ενός ορατού υγρού φιλμ στην επιφάνεια του υλικού. Στην υγρή διάβρωση υπάρχουν σημεία των κατασκευών όπου κατακρατείται νερό από βροχές ή άλλους παράγοντες. Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις η παρουσία ηλεκτρολύτη οδηγεί σε ηλεκτροχημικά φαινόμενα. Σημαντική επιρροή στην ατμοσφαιρική διάβρωση ασκεί η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε σκόνη, διοξείδιο του θείου, υδρόθειο και ενώσεις αζώτου. Ρύποι όπως οι παραπάνω αυξάνουν την

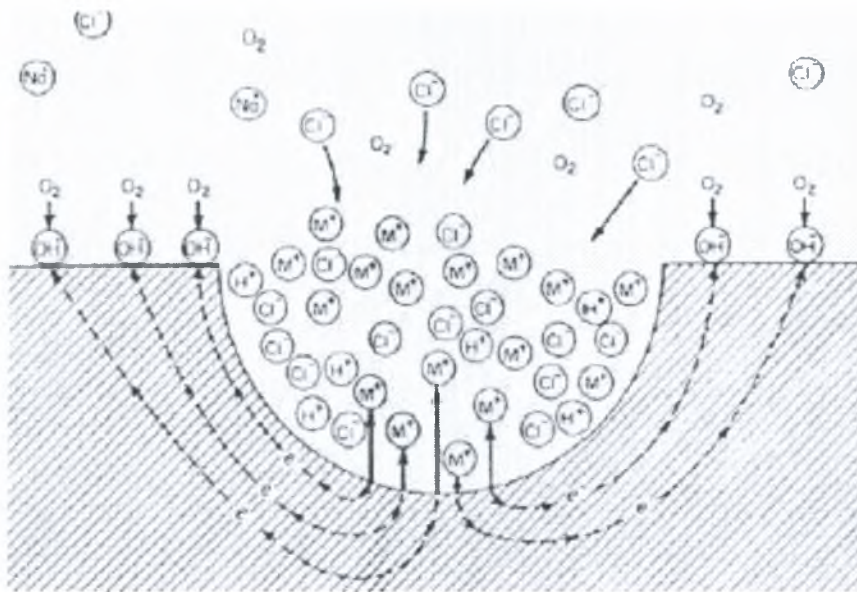
διαβρωτική δράση. Σημαντικό ρόλο στο ρυθμό της διάβρωσης παίζουν επίσης η θερμοκρασία των μεταλλικών επιφανειών και η συχνότητα διαβροχής τους.

Γαλβανική διάβρωση συμβαίνει όταν αποκατασταθεί ηλεκτρική επαφή ανάμεσα σε υλικά που βρίσκονται στον ίδιο ηλεκτρολύτη. Για την ύπαρξη γαλβανικής διάβρωσης απαιτούνται υλικά με διαφορετικό ηλεκτροδιακό δυναμικό στην επιφάνειά τους, ένας κοινός ηλεκτρολύτης και ένα κοινό «μονοπάτι» (ηλεκτρική επαφή και ηλεκτρολύτης) για τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Μπορεί να συμβεί ανάμεσα σε μεταλλικά υλικά διαφορετικού ηλεκτροδιακού δυναμικού, ανάμεσα σε μεταλλικό και μη μεταλλικό αλλά ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό. Όταν πρόκειται για δύο μεταλλικά υλικά η πρόβλεψη της ροής της διάβρωσης γίνεται με χρήση γαλβανικών σειρών. Σπουδαίο ρόλο στην ταχύτητα της διαβρωτικής δράσης παίζει η απόσταση των υλικών στη γαλβανική σειρά που καθορίζει τη διαφορά δυναμικού, ο λόγος των επιφανειών ανόδου προς καθόδου και τέλος οι δυσκολίες που εμφανίζονται στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που συνοψίζονται στην απόσταση και τη γεωμετρία της τροχιάς του. Οι μέθοδοι προστασίας των υλικών από γαλβανική διάβρωση εστιάζονται στη ρύθμιση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος ή την εισαγωγή στο σύστημα υλικών ανοδικών προς το προστατευόμενο υλικό που θυσιάζονται. Οι μεταλλικές επικαλύψεις χρησιμοποιούνται συχνά για την προστασία μεταλλικών υλικών και προσφέρουν είτε καθοδική προστασία, σε περίπτωση που είναι ανοδικές ως προς το μέταλλο βάσης, ή αποτρέπουν την επαφή του ενεργού μεταλλικού υλικού από το διαβρωτικό περιβάλλον.

3.3.2 Συγκεντρωμένη διάβρωση (localized).

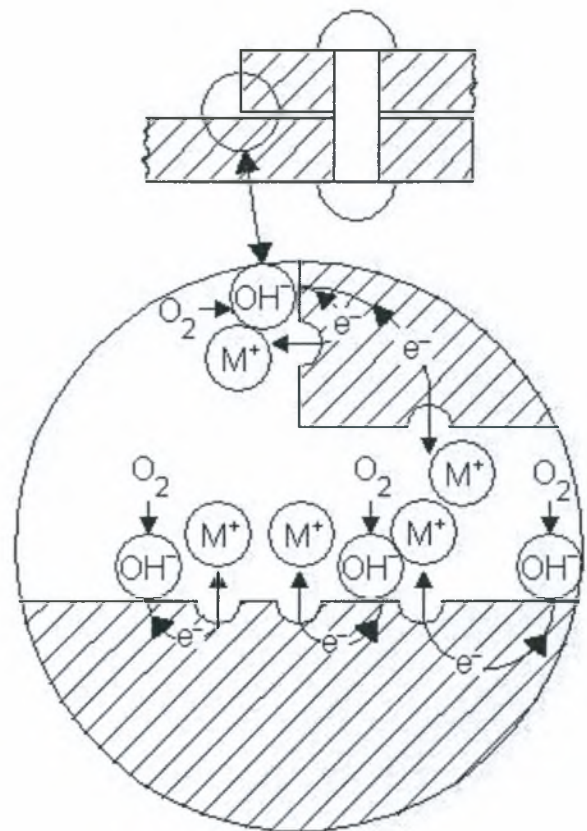
Όταν μιλάμε για συγκεντρωμένη διάβρωση εννοούμε τις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες η διάβρωση δεν εξελίσσεται σε όλη την επιφάνεια του υλικού παρά σε τοπικές διάσπαρτες περιοχές. Η συγκεντρωμένη διάβρωση εμφανίζεται σαν τρημματική, σχισματική, νηματοειδής και τοπική βιολογική διάβρωση.

Η τρημματική διάβρωση είναι μια πολύ σοβαρή μορφή διάβρωσης εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας με την οποία μπορεί να διατρηθεί το υλικό. Συμβαίνει σε συνθήκες παθητικοποίησης του μετάλλου και υπό την ύπαρξη ιόντων αλογόνων στοιχείων. Άρχεται από σημεία όπου το παθητικό στρώμα διαλύεται. Στα σημεία αυτά δημιουργούνται τοπικά ηλεκτρολυτικά κελιά. Τα σημεία έναρξης των τρημμάτων αποτελούν την άνοδο. Η συγκριτικά πολύ μεγαλύτερη καθοδική επιφάνεια ευθύνεται για την ύπαρξη σημαντικής ροής ρεύματος και την ταχεία διάβρωση της ανόδου με αποτέλεσμα τον σχηματισμό των τρημμάτων. Στη συνέχεια στον πυθμένα των τρημμάτων η υδρόλυση των ιόντων μετάλλου που έχουν δημιουργηθεί προκαλεί την τοπική αύξηση της οξύτητας του ηλεκτρολύτη και τη συνέχιση της ανάπτυξης των τρημμάτων. Ο μηχανισμός εξέλιξης της τρημματικής διάβρωσης φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Μηχανισμός τρηματικής διάβρωσης.

Η σχισματική διάβρωση συμβαίνει σε σημεία όπου υπάρχουν μικρά κενά ανάμεσα σε μεταλλικά ή μεταλλικό και μη μεταλλικό υλικό. Η πρόκληση έντονης τοπικής διάβρωσης στις περιοχές των σχισμών οφείλεται στη διαφορά του τοπικού περιβάλλοντος ως προς την συνολική κατάσταση του που προκαλείται από την ίδια τη διαβρωτική δράση. Η πιο απλή εκδοχή για το μηχανισμό σχισματικής διάβρωσης είναι αυτή κατά την οποία δημιουργείται διαφορά στη συγκέντρωση του οξυγόνου εντός και εκτός της σχισμής. Τα ηλεκτρόνια που παράγονται στη σχισμή δεσμεύονται από το οξυγόνο του ηλεκτρολύτη το οποίο μετατρέπεται σε υδροξυλιόντα (σχήμα 3.7). Αποτέλεσμα είναι οι περιοχές μακριά από τη σχισμή που είναι εκτεθειμένες στον ατμοσφαιρικό αέρα να είναι πλούσιες σε οξυγόνο και επομένως καθοδικές ως προς τη σχισμή. Συνέπεια αυτού είναι η συνέχιση της διαβρωτικής δράσης στο



Σχήμα 3.7: Μηχανισμός σχισματικής διάβρωσης.

εσωτερικό της σχισμής. Η παρουσία χλωριόντων στον ηλεκτρολύτη περιπλέκει το μηχανισμό της διάβρωσης, ο οποίος όμως άρχεται με τη διαδικασία που μόλις περιγράφηκε. Οι σχισμές μπορεί να οφείλονται είτε σε κατασκευαστικούς παράγοντες ή να είναι αποτέλεσμα φυσικών φαινομένων. Παράδειγμα αποτελούν η ύπαρξη άμμου ή αποβλήτων στην επιφάνεια των υλικών ή ακόμα και η προσκόλληση φυσικών οργανισμών όπως συμβαίνει με τις πεταλίδες στα σκάφη.

Η νηματοειδής διάβρωση είναι μια υποπερίπτωση της σχισματικής διάβρωσης. Συμβαίνει σε μεταλλικές επιφάνειες οι οποίες είναι καλυμμένες με λεπτές οργανικές επιστρώσεις. Έχουν τη μορφή νημάτων τα οποία είναι μικροσκοπικά τούνελ με τα προϊόντα της διάβρωσης κάτω από την οργανική επίστρωση. Η παρουσία υγρασίας είναι απαραίτητη για την ανάπτυξή της και η παρουσία αλάτων επιταχύνει τη δράση της. Τα σημεία όπου έχει τραυματιστεί η οργανική επικάλυψη αποτελούν τα σημεία έναρξης της διαβρωτικής δράσης. Στα σημεία αυτά σχηματίζεται η κεφαλή του νήματος στην οποία δημιουργείται μια κινούμενη ποσότητα ηλεκτρολύτη χαμηλού pH. Στη συνέχεια η διάχυση υγρασίας και η διαφορά της συγκέντρωσης οξυγόνου στην κεφαλή και την ουρά του νήματος είναι αυτή που ωθεί τη διαβρωτική διεργασία.

3.3.3 Διάβρωση υποκινούμενη από μεταλλουργικούς παράγοντες.

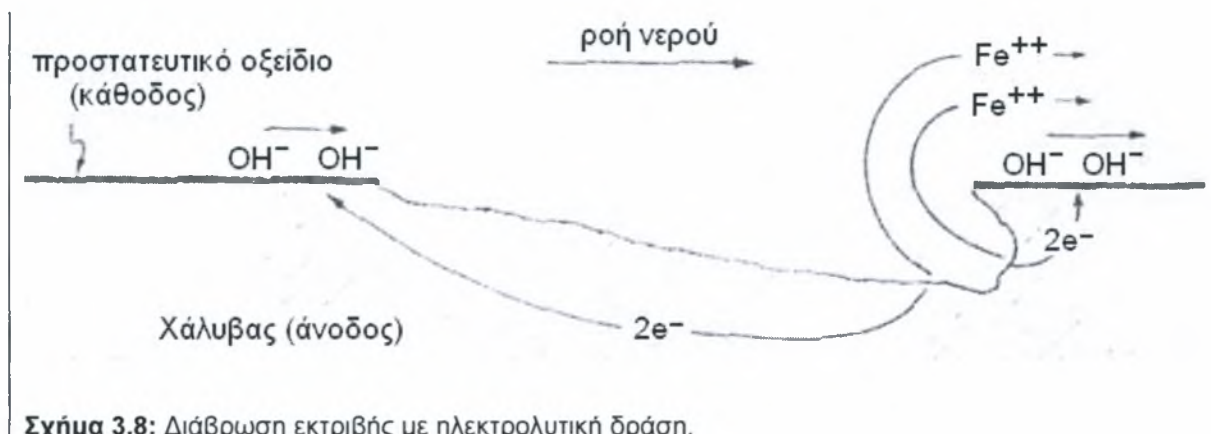
Η φυσική μεταλλουργία των κραμάτων παίζει σπουδαίο ρόλο σε όλες τις μορφές της διάβρωσης. Η κατηγορία αυτή δημιουργήθηκε για να συμπεριλάβει την περικρυσταλλική διάβρωση και τη διάβρωση αποκραμάτωσης (dealloying) στις οποίες είναι ιδιαίτερα έντονη η συμβολή μεταλλουργικών παραγόντων. Παράγοντες όπως η σχετική σταθερότητα των συστατικών ενός κράματος, οι διάφορες φάσεις και τοπικές διαφορές στην περιεκτικότητα συστατικών στην ίδια φάση επηρεάζουν τη διαβρωτική δράση.

Η περικρυσταλλική διάβρωση συμβαίνει όταν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στο ρυθμό διάβρωσης των ορίων και του εσωτερικού των κόκκων. Η διαφορά στο ρυθμό τις περισσότερες φορές οφείλεται στις διαφορετική χημική σύσταση των ορίων από το υπόλοιπο του κόκκου, που προσδίδει διαφορετικούς ρυθμούς διάβρωσης, και όχι σε διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο φάσεις. Οι λόγοι που μπορεί να προκαλέσουν περικρυσταλλική διάβρωση είναι καθίζηση φάσεων στα σύνορα των κόκκων, οι οποίες μεταβάλλουν τη χημική σύσταση των κόκκων στα όρια τους και ύπαρξη, στα σύνορα των κόκκων, φάσεων ανοδικών ως προς την κύρια φάση ή διαλυτών σωματιδίων τα οποία τοπικά επιταχύνουν τη διαβρωτική δράση.

3.3.4 Υποβάθμιση υποβοηθούμενη από μηχανικά αίτια, (Mechanically assisted degradation).

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τις μορφές διάβρωσης στις οποίες εμπλέκονται μηχανικά φαινόμενα όπως τριβή, ταχύτητα ροής, υδροδυναμική κλπ. Οι μορφές διάβρωσης που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι η διάβρωση εκτριβής (erosion) και τριβής (fretting), η απώλεια υλικού λόγω σπηλαιώσης (cavitation erosion) και λόγω πρόσκρουσης σταγόνων νερού (water drop impingement) και η διάβρωση με κόπωση (corrosion fatigue).

Ως διάβρωση εκτριβής ορίζεται η αφαίρεση επιφανειακών στρωμάτων υλικού εξαιτίας συγκρούσεων με στερεά ή και ρευστά σωματίδια. Συναντάται πολύ συχνά σε αγωγούς μεταφοράς ρευστών. Τα διάφορα σωματίδια που περιέχονται σε αυτά συγκρούονται με τα τοιχώματα των αγωγών και αφαιρούν υλικό. Μεταβλητές όπως η σχετική ταχύτητα του ρευστού, η γωνία πρόσκρουσης, το μέγεθος, το σχήμα, η σύσταση και η σκληρότητα των σωματιδίων, η κατανομή και η πυκνότητά τους στο ρευστό μέσο, η πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού καθορίζουν το εύρος της προσβολής. Σε πολλές περιπτώσεις η διάβρωση εκτριβής είναι δυνατόν να φθείρει επιφανειακά προστατευτικά στρώματα δημιουργώντας ανοδικές και καθοδικές περιοχές επιταχύνοντας με αυτόν τον τρόπο τη διαβρωτική δράση (σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Διάβρωση εκτριβής με ηλεκτρολυτική δράση.

Η διάβρωση με κόπωση συμπεριλήφθηκε σε αυτή την κατηγορία λόγω της δυναμικής καταπόνησης. Έχει να κάνει με τη δημιουργία (initiation) ρηγμάτων κάτι που μειώνει κατά πολύ την διάρκεια ζωής σε κόπωση καθώς σε τέτοιες περιπτώσεις το 95% του χρόνου καταναλίσκεται για τη δημιουργία ρηγμάτων και μόλις το 5% για την προώθηση του ρήγματος ως την τελική αστοχία. Συχνά η τρημματική διάβρωση προσφέρει σημεία για την ανάπτυξη των ρηγμάτων. Η προώθηση των ρηγμάτων από εκεί και πέρα εξαρτάται αφενός από τους μηχανικούς παράγοντες οι οποίοι εμπλέκονται σε περιπτώσεις κόπωσης (όπως εύρος τάσης, συχνότητα φόρτισης κ.ά.) και αφετέρου από παράγοντες που επηρεάζουν τη

διαβρωτική δράση όπως το ηλεκτροδιακό δυναμικό, η σύσταση και η θερμοκρασία του υδατικού περιβάλλοντος και μεταλλουργικές μεταβλητές.

3.3.5 Ρηγμάτωση επιβαλλόμενη από περιβαλλοντικά αίτια (Environmentally induced cracking).

Η τελευταία αυτή κατηγορία περιλαμβάνει τις μορφές διάβρωσης κατά τις οποίες δημιουργούνται ρηγμάτα στα υλικά όταν εκτεθούν στο διαβρωτικό περιβάλλον σε συνδυασμό με δυναμική καταπόνηση. Η εργοδιάβρωση, η ψαθυροποίηση υδρογόνου, η ψαθυροποίηση υγρών μετάλλων και η ψαθυροποίηση επιβαλλόμενη από μεταλλικά στοιχεία (solid metal induced) περιλαμβάνονται στην κατηγορία αυτή.

Κατά την εργοδιάβρωση (SCC) η συνδυασμένη λειτουργία μηχανικής καταπόνησης και διαβρωτικής δράσης επιφέρει την ανάπτυξη των ρηγμάτων και εν τέλει την αστοχία του υλικού. Η συνδυασμένη λειτουργία σημαίνει ότι η ανάπτυξη των ρηγμάτων δεν είναι αποτέλεσμα ούτε μόνο συγκέντρωσης τάσεων, αλλά ούτε μόνο της διαβρωτικής δράσης. Εφελκυστική φόρτιση και συγκεκριμένο περιβάλλον χρειάζεται για την πρόκληση εργοδιάβρωσης. Η φόρτιση μπορεί να προέρχεται είτε από παραμένουσες τάσεις του υλικού ή από εξωτερική φόρτιση. Όσον αφορά το περιβάλλον είναι απαραίτητη αρχικά η ύπαρξη υγρασίας και η περαιτέρω χημική σύσταση ικανή να προκαλέσει SCC εξαρτάται από το υλικό. Στον πίνακα 3.2 φαίνονται τα στοιχεία του περιβάλλοντος που είναι απαραίτητα για την προξένηση SCC σε διάφορες κατηγορίες υλικών.

Πίνακας 3.2: Περιβάλλον και υλικό για SCC [3].

Alloy	Environment
Carbon steel	Hot nitrate, hydroxide and carbonate/bicarbonate solutions
High-strength steels	Aqueous electrolytes, particularly when containing H ₂ S
Austenitic stainless steels	Hot, concentrated chloride solutions; chloride-contaminated steam
High-nickel alloys	High-purity steam
α-brass	Ammoniacal solutions
Aluminum alloys	Aqueous Cl ⁻ , Br ⁻ and I ⁻ solutions
Titanium alloys	Aqueous Cl ⁻ , Br ⁻ and I ⁻ solutions; organic liquids; N ₂ O ₄
Magnesium alloys	Aqueous Cl ⁻ solutions
Zirconium alloys	Aqueous Cl ⁻ solutions; organic liquids; I ₂ at 350°C

Η ψαθυροποίηση υδρογόνου προκαλείται από τη συνδυασμένη δράση εφελκυστικών τάσεων και υδρογόνου. Εμφανίζεται με διάφορες μορφές στα υλικά όπως ρηγμάτωση, δημιουργία φουσκάλων (blistering), σχηματισμό υδριδίων (hydride formation) και μείωση της ολκιμότητας, προκαλώντας σημαντική υποβάθμιση του υλικού. Ο αριθμός των μορφών με τις οποίες εμφανίζεται οδήγησε σε πλήθος θεωριών για την εξήγηση του

φαινομένου όπως η θεωρία πίεσης, η θεωρία της επιφανειακής προσρόφησης κ.ά. Τέλος η φαθυροποίηση υδρογόνου επηρεάζει έναν μεγάλο αριθμό μεταλλικών υλικών ανάμεσα στα οποία είναι οι χάλυβες, τα κράματα αλουμινίου, το τιτάνιο κ.ά.

3.4 Αντιδιαβρωτική προστασία.

Όπως έχει αναφερθεί σημαντική είναι η πρόληψη και αντιμετώπιση μιας διαβρωτικής διαδικασίας πριν αυτή εκδηλωθεί. Για το σκοπό αυτό σε κάθε περίπτωση τεχνολογικού ενδιαφέροντος ακολουθείται μια σειρά από ενέργειες που αποσκοπούν τις περισσότερες φορές στη μείωση του ρυθμού διάβρωσης, αφού η ολοκληρωτική αποτροπή των διαβρωτικών φαινομένων είναι σπάνια απαιτούμενη. Οι ενέργειες αυτές περιλαμβάνουν την ρύθμιση των περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών, την αρχική επιλογή των υλικών, το σχεδιασμό των κατασκευών, τη χρήση κατάλληλων επικαλύψεων και την εφαρμογή μεθόδων βασισμένων σε θερμοδυναμικά και ηλεκτροχημικά φαινόμενα.

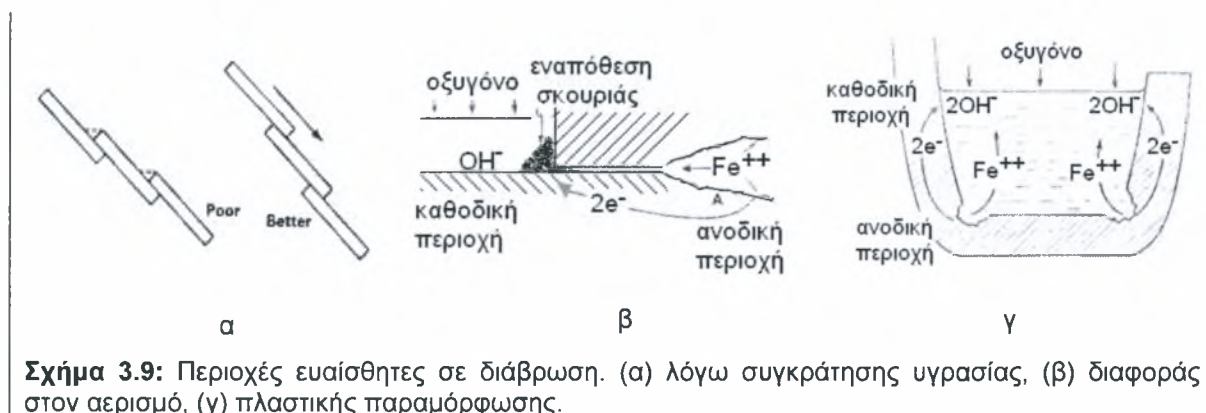
3.4.1 Ρύθμιση περιβαλλοντικών παραγόντων και επιλογή υλικού.

Σημαντική είναι καταρχήν η παρατήρηση και ανάλυση του περιβάλλοντος, φυσικού και χημικού, στο οποίο καλείται να λειτουργήσει μια κατασκευή. Τόσο φυσικοί, όσο χημικοί και βιολογικοί παράγοντες είναι δυνατόν να μεταβάλλουν την εξέλιξη της διαβρωτικής δράσης. Αυξημένη θερμοκρασία, υγρασία, αυξημένη οξύτητα, παρουσία επιθετικών χημικών ουσιών ή μικροοργανισμών είναι καταστάσεις που κατά κανόνα ευνοούν τα διαβρωτικά φαινόμενα. Οι λειτουργικές συνθήκες του εξοπλισμού είναι επίσης μεγάλης σημασίας. Παραδείγματος χάριν, η περιοδική εκτόνωση ενός αερίου από μια δεξαμενή μπορεί να προκαλέσει τοπική συμπύκνωση του αέρα και την εμφάνιση τοπικής υγρασίας στις σωληνώσεις του δικτύου με αποτέλεσμα τοπική διάβρωση. Η ρύθμιση παραγόντων όπως οι παραπάνω μπορεί να αποτρέψει την εξέλιξη της διάβρωσης, όμως είναι εφικτή συνήθως μόνο σε κλειστά συστήματα.

Η πλήρης επίγνωση των περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών είναι πρωταρχικής σημασίας για την επιλογή των κατάλληλων υλικών και προστατευτικών μεθόδων. Οι εξωτερικές συνθήκες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της διαβρωτικής διαδικασίας. Επίσης η διαβρωτική αντίσταση του κάθε υλικού είναι ανάλογη των εκάστοτε συνθηκών. Χαρακτηριστικό είναι ότι ένας απλός χάλυβας έχει πολύ καλύτερη αντίσταση σε εργοδιάβρωση από έναν ανοξείδωτο χάλυβα. Σε περιπτώσεις υδατικής διάβρωσης σημαντική βοήθεια στον προσδιορισμό της σταθερότητας ενός υλικού δίνουν τα διαγράμματα Pourbaix. Σημαντικό ρόλο στην αντίσταση ενός υλικού παίζουν μεταλλουργικοί παράγοντες όπως το μέγεθος των κόκκων, η ύπαρξη εγκλεισμάτων, η θερμική κατεργασία, η κατανομή και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των διαφόρων φάσεων κ.ά.

3.4.2 Κατάλληλος μηχανολογικός σχεδιασμός.

Η κατάλληλη επιλογή υλικού είναι το πρώτο βήμα για αποτελεσματική αντιδιαβρωτική προστασία. Το επόμενο βήμα είναι η αποφυγή δημιουργίας περιοχών, στην κατασκευή, ευαίσθητων σε διάβρωση. Παραδείγματα τέτοιων περιοχών είναι κοιλότητες και διατάξεις οι οποίες συγκρατούν υγρασία (σχήμα 3.9.α) ή διατάξεις από τις οποίες δημιουργείται διαφορά στον αερισμό περιοχών, π.χ. λόγω κακής συναρμογής (σχήμα 3.9.β). Η ύπαρξη επιφανειακών παραμενουσών τάσεων πρέπει να αποφεύγεται όταν αυτές είναι εφελκυστικές. Επίσης, η πλαστική παραμόρφωση δημιουργεί περιοχές αυξημένου ενεργειακού περιεχομένου και λειτουργούν ανοδικά (σχήμα 3.9.γ). Ακόμα σημαντική είναι η αποτροπή επαφής μεταξύ ανόμοιων υλικών για την αποφυγή φαινομένων γαλβανικής διάβρωσης. Αυτές είναι μόνο μερικές από τις περιπτώσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των κατασκευών.



Σχήμα 3.9: Περιοχές ευαίσθητες σε διάβρωση. (α) λόγω συγκράτησης υγρασίας, (β) διαφοράς στον αερισμό, (γ) πλαστικής παραμόρφωσης.

3.4.3 Προστατευτικές επικαλύψεις.

Αποτελεσματική αντιδιαβρωτική προστασία μπορεί να επιτευχθεί και με την χρήση επικαλύψεων που μπορούν να είναι μεταλλικές, ανόργανες ή οργανικές. Στις ανόργανες επικαλύψεις περιλαμβάνονται τα ανοδικά οξείδια και οι κεραμικές επικαλύψεις. Οι διαδικασίες ανοδίωσης χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη προστατευτικών οξειδίων στην επιφάνεια των υλικών, τα οποία σε διαβρωτικά περιβάλλοντα θυσιάζονται κρατώντας τον πυρήνα του υλικού ανέπαφο. Παράδειγμα είναι η χρωμική ανοδίωση στα κράματα αλουμινίου και ο γαλβανισμός των λαμαρίνων. Σε ορισμένες περιπτώσεις στην επιφάνεια των μεταλλικών υλικών εμφυτεύονται κεραμικές επικαλύψεις, οι οποίες εμποδίζουν την προσβολή της μεταλλικής επιφάνειας δρώντας σαν φράγμα. Επίσης δημιουργούν αλκαλικό περιβάλλον στη διεπιφάνεια κεραμικού/μεταλλικού υλικού όπου ο ρυθμός της διάβρωσης είναι πολύ μικρός. Ευρεία χρήση γίνεται των οργανικών επικαλύψεων που είναι τα χρώματα και οι αναχαιτιστές. Η δράση των αναχαιτιστών είναι παρόμοια με των κεραμικών

επικαλύψεων. Εμποδίζουν την εισχώρηση της διάβρωσης στο προστατευόμενο υλικό. Τα χρώματα χρησιμοποιούνται για την αποφυγή απευθείας επαφής του υλικού με τον αέρα και το νερό.

3.4.4 Προστασία πάνω σε θερμοδυναμική και ηλεκτροχημική βάση.

Σημαντικός περιορισμός των διαβρωτικών φαινομένων μπορεί να επιτευχθεί επεμβαίνοντας στη θερμοδυναμική ή την ηλεκτροχημική φύση αυτών. Κάθε υλικό περιέχει ένα ποσό ελεύθερης ενέργειας Gibbs. Όταν το ποσό αυτό είναι μικρότερο από το ποσό που φέρουν τα αντίστοιχα σχηματιζόμενα οξείδια τότε δεν είναι δυνατή θερμοδυναμικά η διεργασία της διάβρωσης. Αυτό δεν συμβαίνει τις περισσότερες φορές, σε ορισμένα μέταλλα όμως είναι δυνατό να επιτευχθεί με την εφαρμογή κατάλληλου εξωτερικού δυναμικού. Επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο «θερμοδυναμική» προστασία του υλικού. Κατά την «ηλεκτροχημική» προστασία του υλικού επιδιώκεται η πόλωση της καθόδου που έχει αποτέλεσμα των περιορισμό της διάβρωσης. Η πόλωση επιτυγχάνεται είτε με εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού, είτε με ρύθμιση του λόγου καθοδικών προς ανοδικών επιφανειών. Περιορισμένη καθοδική επιφάνεια σε σχέση με την ανοδική προκαλεί την πόλωση της καθόδου και την παύση της διαβρωτικής δράσης. Παράδειγμα αποτελεί η χρήση χάλκινων καρφιών (κάθοδος) σε χαλύβδινα φύλλα (άνοδος).

Συμπερασματικά η κατανόηση των διαβρωτικών μηχανισμών είναι το πρώτο και βασικό βήμα προς την αντιμετώπιση της διάβρωσης. Η συνδυασμένη εφαρμογή αρχών της θερμοδυναμικής, της ηλεκτροχημείας, της φυσικής, της μεταλλουργίας και της μηχανικής απαιτούνται για μια αποτελεσματική βελτίωση των κατασκευών στη συμπεριφορά τους σε διάβρωση. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ασφαλέστερων κατασκευών με χαμηλότερο συνολικό κόστος.

3.5 Διάβρωση των αεροπορικών κραμάτων αλουμινίου 2xxx.

Ο τομέας της αεροπορικής βιομηχανίας είναι άμεσα επηρεαζόμενος από τα φαινόμενα της διάβρωσης. Τόσο η πολεμική όσο και η πολιτική αεροπορία επηρεάζονται άμεσα από τα διαβρωτικά φαινόμενα. Η διάρκεια ζωής μερικών δεκάδων ετών των αεροσκαφών σε συνδυασμό με το ότι συχνά καλούνται να λειτουργήσουν σε ιδιαίτερα διαβρωτικά περιβάλλοντα (π.χ. ταξίδια πάνω από ωκεανούς) αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης διαβρωτικής προσβολής σε αυτά. Η αντιμετώπιση της διάβρωσης είναι ύψιστης σημασίας για την ετοιμότητα των πολεμικών αεροσκαφών και τη διασφάλιση της εθνικής ασφάλειας. Στην πολιτική αεροπορία τίθεται το εξίσου σημαντικό θέμα της διασφάλισης της ασφάλειας. Η απαίτηση για δομική ακεραιότητα των αεροσκαφών κατά την διάρκεια των πτήσεων επιβάλλει την συχνή λεπτομερή εξέταση αυτών για την αναγνώριση και

επιδιόρθωση τυχόν διαβρωμένων περιοχών. Η υποβάθμιση που προκαλείται από την διαβρωτική δράση είναι δυνατόν να προκαλέσει δυστυχήματα όπως αυτό των αερογραμμών της Aloha το 1988 (σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Αποκόλληση μέρους τους ατράκτου, πιθανή αιτία η διάβρωση [7].

3.5.1 Διάβρωση στα αεροσκάφη.

Κάθε αεροσκάφος φέρει πληθώρα σημείων ευπαθών στη διάβρωση. Τόσο τα δομικά μέρη του αεροσκάφους όσο και οι κινητήρες υποφέρουν από διάφορες μορφές διάβρωσης που μπορούν να προκαλέσουν εξίσου σημαντικά προβλήματα.

Η ακεραιότητα των δομικών μερών του αεροσκάφους είναι σημαντική για τη διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών στο εσωτερικό του, αλλά και για τη διατήρηση της πτήσης. Μεγάλο μέρος των δομικών μερών ενός αεροσκάφους είναι κατασκευασμένα από κράματα που προσφέρουν υψηλή αντιδιαβρωτική προστασία. Ο συνδυασμός όμως με τη δυναμική φόρτιση που συνεπάγεται η λειτουργία των αεροσκαφών μπορεί να μεγεθύνει τα αποτελέσματα της όποιας διαβρωτικής δράσης όσο μικρή και αν είναι αυτή.

Οι πιο συνηθισμένες μορφές διάβρωσης που εμφανίζονται στο δομικό μέρος των αεροσκαφών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως τοπικές μονοδιάστατες ανωμαλίες (τρημματική και σχισματική διάβρωση), δισδιάστατες ασυνέχειες (επιφανειακή προσβολή και εμφάνιση ρωγμών, SCC) και πλήρης τρισδιάστατη υποβάθμιση υλικού (αποφλοίωση και γαλβανική διάβρωση).

Η ορθή λειτουργία των κινητήρων είναι απαραίτητη για την απογείωση των αεροσκαφών, τη διατήρηση της πτήσης αλλά και την αποφυγή έντονης αστοχίας κατά τη

διάρκεια πτήσης η οποία μπορεί να προκαλέσει και δομικά προβλήματα. Η απροβλημάτιστη λειτουργία των κινητήρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αντιμετώπιση των διαβρωτικών φαινομένων. Η κύρια μορφή διάβρωσης που εμφανίζεται στα διάφορα μέρη των κινητήρων είναι η υψηλής θερμοκρασίας διάβρωση σε συνδυασμό με SCC. Στις ψυχρές περιοχές των κινητήρων εμφανίζονται τρημματική διάβρωση και διάβρωση τριβής. Τέλος σημαντική είναι η ύπαρξη του καυσίμου και των λιπαντικών τα οποία προκαλούν χημική διάβρωση, ενώ επίσης συχνή είναι η διάβρωση εκτριβής.

3.5.2 Διάβρωση του αλουμινίου.

Το αλουμίνιο όπως φαίνεται από την σειρά ηλεκτρεγερτικού δυναμικού είναι θερμοδυναμικά ενεργό μέταλλο. Λίγα μέταλλα είναι περισσότερο ανοδικά από το αλουμίνιο. Η πολύ καλή αντίσταση του αλουμινίου στη διάβρωση οφείλεται στο λεπτό προστατευτικό στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνειά του. Σε συνθήκες συνθήκες το πάχος του οξειδίου δεν υπερβαίνει το 1nm και ξανασχηματίζεται αυτόματα σε περίπτωση που φθαρεί. Η διαβρωτική αντίσταση των κραμάτων αλουμινίου εξαρτάται από την κραμάτωσή τους και τη θερμική επεξεργασία που έχουν υποστεί. Στο κράμα 2024-T3 για παράδειγμα όταν κατά τη βαφή επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί ψύξης αποφεύγεται η καθίζηση δευτερευουσών φάσεων στα όρια των κόκκων με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του κράματος και την βελτίωση της διαβρωτικής αντίστασης. Η θερμική επεξεργασία γενικά καθορίζει τη σύσταση των διαφορετικών φάσεων της μικροδομής επομένως και το ηλεκτροδιακό δυναμικό τους. Το συνολικό δυναμικό του κράματος όμως καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την πλούσια σε αλουμίνιο φάση. Ο πίνακας 3.3. περιλαμβάνει τα ηλεκτροδιακά δυναμικά ορισμένων κραμάτων και των δευτερευουσών φάσεων που μπορούν να εμφανιστούν σε αυτά.

Πίνακας 3.3: Ηλεκτροδιακό δυναμικό κραμάτων αλουμινίου και δευτερευουσών φάσεων [3].

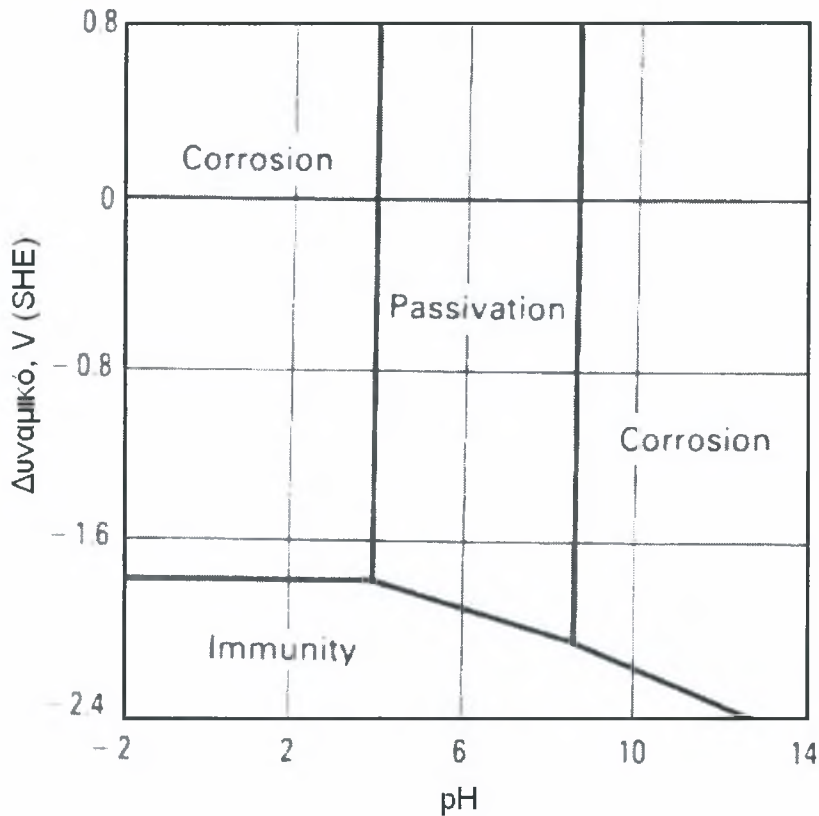
σειρά (°)	κράμα	ηλεκτροδιακό δυναμικό (V) ^{**}	πιθανή φάση	ηλεκτροδιακό δυναμικό (V) ^{**}	διαφορά δυναμικού (ΔV) ^{***}
1xxx (99% Al)	1100	-0.83	Al ₃ Fe	-0.56	-27
2xxx (Cu)	2024 T3	-0.69	Al ₂ Cu	-0.73	4
	2024 T6	-0.81	Al ₂ Cu	-0.73	-8
3xxx (Mn)	3004	-0.84	Al ₆ Mn	-0.85	1
			Al ₆ Mn	-0.85	-2
5xxx (Mg)	5056	-0.87	Al ₈ Mg ₅	-1.24	37

* Στην παρένθεση βρίσκεται το κύριο κραματικό στοιχείο της σειράς.

** Δυναμικά με βάση το πρότυπο ηλεκτρόδιο calomel.

*** ΔV=V(κύριας)-V(δευτ/σας), αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι η κύρια φάση είναι ανοδικότερη.

Το διάγραμμα Pourbaix του αλουμινίου δίνεται στο σχήμα 3.11. Φαίνεται πως μόνο ακραίες τιμές του pH μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στο αλουμίνιο. Στο ουδέτερο πεδίο pH μεταξύ 4 και 8.5 το αλουμίνιο παθητικοποιείται και προστατεύεται ικανοποιητικά από το οξείδιο Al_2O_3 .



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα Pourbaix για το αλουμίνιο [3].

Η αντίσταση σε διάβρωση του αλουμινίου αυξάνεται όταν χρησιμοποιούνται προστατευτικές επιστρώσεις τύπου clad ή όταν το υλικό είναι ανοδιωμένο. Στις επιστρώσεις τύπου clad ένα στρώμα υψηλά ενεργού υλικού «κολλιέται» μεταλλουργικά στην επιφάνεια του κυρίως υλικού. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο επιφέρει καθοδική προστασία στο κυρίως υλικό. Για παράδειγμα το κράμα 2024 Alclad (στρώμα clad:1230) όταν βρεθεί σε διαβρωτικό περιβάλλον, το επιφανειακό στρώμα (1230) θυσιάζεται κρατώντας ανέπαφο τον πυρήνα του υλικού (2024). Οι ανοδικές επικαλύψεις προβάλλουν σημαντική αντίσταση στη διάβρωση. Παρόλο που ιδιαίτερα όξινα ή αλκαλικά περιβάλλοντα τις επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό, επιβραδύνουν σημαντικά τη διαβρωτική δράση όταν το pH του διαβρωτικού περιβάλλοντος είναι μεταξύ 4 και 8.5. Η βέλτιστη απόδοσή τους επιτυγχάνεται σε ουδέτερα περιβάλλοντα.

Οι κύριες μορφές διάβρωσης που εμφανίζουν τα κράματα αλουμινίου είναι τρηματική, γαλβανική και περικρυσταλλική διάβρωση, διάβρωση από εναπόθεση

(deposition corrosion), εργοδιάβρωση, ψαθυροποίηση υδρογόνου, διάβρωση αποφλοίωσης, και νηματοειδής διάβρωση.

Η τρημματική διάβρωση συναντάται συχνά στα κράματα αλουμινίου όταν υπάρχει παθητικοποίηση. Στα σημεία όπου διακόπτεται η συνέχεια του προστατευτικού οξειδίου τα ιόντα αλογόνων στοιχείων (F, Cl, Br, I) είναι αυτά που προκαλούν την τρημματική διάβρωση.

Το γεγονός ότι το αλουμίνιο βρίσκεται ψηλά στην ηλεκτρεγερτική σειρά το καθιστά ευαίσθητο σε γαλβανική διάβρωση. Κάτω από συνήθεις περιβαλλοντικές συνθήκες το αλουμίνιο σε ηλεκτρική επαφή με οποιοδήποτε μεταλλικό υλικό, πέραν των ανοδικότερων μαγνήσιο και ψευδάργυρο, αποτελεί την άνοδο του ηλεκτρολυτικού κελιού και διαβρώνεται. Η ηλεκτρική επαφή του αλουμινίου με καθοδικότερα μέταλλα πρέπει να αποφεύγεται, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου το αλουμίνιο είναι ευπαθές σε τρημματική διάβρωση. Το επιπλέον ρεύμα που προκαλεί η γαλβανική διάβρωση επιταχύνει κατά πολύ την ανάπτυξη των τρημμάτων.

Σημαντική διαβρωτική προσβολή μπορούν να προκαλέσουν στο αλουμίνιο βαρέα μέταλλα όπως ο χαλκός, ο μόλυβδος, το νικέλιο κ.ά. προκαλώντας διάβρωση εναπόθεσης. Τα ιόντα των μετάλλων αυτών ανάγονται εύκολα από το αλουμίνιο και τα μόρια πλέον των μετάλλων εναποτίθενται στην επιφάνειά του. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μικροσκοπικών τοπικών ηλεκτρολυτικών κελιών που οδηγούν σε έντονη τρημματική διάβρωση. Αιτία της χαμηλής αντιδιαβρωτικής ικανότητας των κραμάτων 2xxx είναι το υψηλό ποσοστό χαλκού. Τα προϊόντα της διάβρωσης του αλουμινίου απελευθερώνουν ιόντα χαλκού τα οποία στη συνέχεια ανάγονται από το απρόσβλητο αλουμίνιο επιταχύνοντας την οξειδωσή του.

Τα κράματα αλουμινίου που περιέχουν μεγάλα ποσά κραματικών στοιχείων όπως ο χαλκός, το μαγνήσιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος είναι ευαίσθητα σε SCC. Η SCC στα κράματα αλουμινίου συνδέεται με την περικρυσταλλική διάβρωση. Στα κράματα που περιέχουν τα προαναφερθέντα κραματικά στοιχεία δημιουργούνται ανοδικές περιοχές στα όρια των κόκκων τους οι οποίες διαβρώνονται επιλεκτικά προσφέροντας «μονοπάτια» για την ανάπτυξη ρωγμών και την αστοχία του υλικού κάτω από φόρτιση. Στα κράματα 2xxx τα ανοδικά μονοπάτια σχηματίζονται από ζώνες εκατέρωθεν των ορίων των κόκκων που είναι φτωχές σε χαλκό λόγω της διάχυσης και καθίζησης φάσεων του χαλκού στα όρια αυτά. Η περικρυσταλλική διάβρωση είναι επίσης υπεύθυνη για την εμφάνιση διάβρωσης αποφλοίωσης στα ίδια κράματα.

Η ψαθυροποίηση υδρογόνου συμβαίνει και στα κράματα αλουμινίου. Προκαλεί σημαντική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων μειώνοντας την ολκιμότητά τους. Επίσης είναι δυνατόν να προκαλέσει περικρυσταλλικά ή ενδοκρυσταλλικά ρήγματα στο υλικό, όπως επίσης και «φουσκάλες» (hydrogen blistering). Μάλιστα στο αλουμίνιο

αντίθετα με άλλα μεταλλικά υλικά είναι δυνατή η ενοποίηση τέτοιων φουσκαλών προς σχηματισμό μεγαλύτερων.

Σημαντική είναι επίσης η νηματοειδής διάβρωση σε κράματα αλουμινίου που φέρουν οργανικές επιστρώσεις. Το φαινόμενο της νηματοειδούς διάβρωσης εμφανίζεται εντονότερο σε θερμές παραθαλάσσιες περιοχές και έντονα ρυπασμένα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η σχετική υγρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξή του. Σχετική υγρασία χαμηλότερη από 75% ή υψηλότερη από 95% αποτρέπει το σχηματισμό νηματοειδούς διάβρωσης στο αλουμίνιο. Ωστόσο, η χρωμική ανοδίσωση στο αλουμίνιο σχεδόν μηδενίζει την πιθανότητα εμφάνισης της.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η πολύ καλή αντίσταση του αλουμινίου σε ατμοσφαιρική διάβρωση, αποτέλεσμα του ισχυρά προστατευτικού σχηματιζόμενου οξειδίου. Κατασκευές από αλουμίνιο μπορούν να σταθούν για δεκαετίες χωρίς την οποιαδήποτε υποβάθμιση ιδιοτήτων τους και χωρίς καν προστατευτικά επιστρώματα όπως χρώματα.

Αναφορές

- [1] M. Pourbaix, Lectures on Electrochemical Corrosion, Plenum Press, New York, 1973
- [2].N.Δ Χασιώτης, Διάβρωση μετάλλων και κραμάτων, Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος 2000
- [3] ASM Handbook, Corrosion. Ninth ed. ASM Handbook, ed. A.I.H. Committee. Vol. 13. 1987, USA.
- [4] ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1993.
- [5] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική μεταλλουργία, Θεμελιώδεις αρχές, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2000.
- [6] Aircraft Weapon Systems Cleaning and Control, NAVAIR 01-1A-509, TO 1-1-691, 1 May 2001, page 2-6.
- [7] E. Kamoutsi, Corrosion induced Hydrogen Embrittlement in High Strength Al-Alloys, Phd-Thesis, Volos, 2004.

Κεφάλαιο 4: Πειραματικό μέρος.

4.1 Εισαγωγή-σκοπός των πειραμάτων.

Οι πειραματικές δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για την μελέτη της διαβρωτικής συμπεριφοράς νέων υλικών εξοικονομώντας άπλετο χρόνο συγκριτικά με τις δοκιμές φυσικής έκθεσης δοκιμίων. Παρόλο που δεν είναι δυνατή άμεσα η ακριβής συσχέτιση με τη μακροχρόνια συμπεριφορά του υλικού οι δοκιμές αυτές είναι ιδανικές για μια πρώτη σύγκριση διαφορετικών υλικών όσων αφορά την αντίστασή τους σε διάβρωση έχοντας εκτεθεί σε συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον.

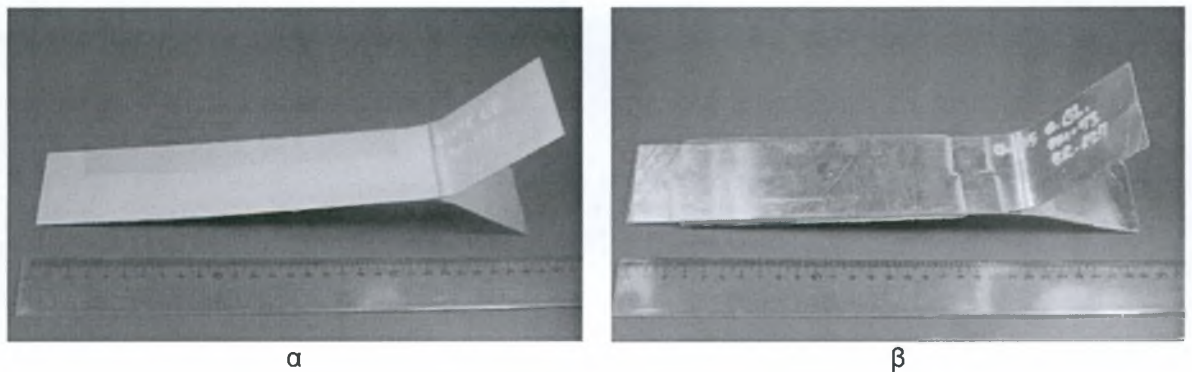
Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην πραγματοποίηση μελέτης διάβρωσης πάνω σε υλικό Glare με σκοπό την διερεύνηση του μηχανισμού εξέλιξης και του εύρους προσβολής της διάβρωσης στο συγκεκριμένο υλικό. Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης, η δοκιμή διάβρωσης αποφλοίωσης και η δοκιμή διαδοχικών εμβαπτίσεων, σε υλικό τύπου Glare. Το μέρος του Glare που είναι δυνατό να διαβρωθεί είναι τα στρώματα των μεταλλικών φύλλων αλουμινίου Al 2024-T3. Το συγκεκριμένο κράμα έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον σε αεροναυπηγικές εφαρμογές και έχει διερευνηθεί σε βάθος η συμπεριφορά του σε διάβρωση. Όμως το ιδιαίτερα μικρό πάχος των φύλλων αλουμινίου που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του Glare (0.4mm - sheet), καθώς και η επιπλέον θερμική κατεργασία, αν και ήπια, που έχουν υποστεί αυτά κατά την «συναρμολόγηση» του Glare είναι πιθανό να έχουν επηρεάσει την διαβρωτική συμπεριφορά του υλικού. Σκοπός των πειραμάτων λοιπόν είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για το είδος της διαβρωτικής προσβολής και την εξέλιξη της διαβρωτικής δράσης στο υλικό. Διερευνάται επίσης ο ρόλος των ενδιάμεσων στρωμάτων των προεμποτισμένων σε ρητίνη γυάλινων ινών για πιθανή λειτουργία τους σαν φράγματα της διάβρωσης.

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάζεται το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη διάβρωσης της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια περιγράφονται οι διαδικασίες που είναι κοινές για κάθε πειραματική δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης, όπως η προετοιμασία των δοκιμίων για το πείραμα και ο καθαρισμός αυτών μετά το πέρας των πειραμάτων σε συνδυασμό με τη μέτρηση της απώλειας μάζας. Επίσης, περιγράφεται η διαδικασία ετοιμασίας μεταλλογραφικών δοκιμίων. Τέλος, γίνεται περιγραφή των βασικών σημείων των δύο πειραματικών μεθόδων.

4.2 Περιγραφή του υλικού που χρησιμοποιήθηκε.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης κατασκευάστηκε και παραχωρήθηκε από την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία (Ε.Α.Β.). Δεν άνηκε σε κάποιον από τους καθιερωμένους τύπους Glare. Η απόκλιση από την προκαθορισμένη δομή των τύπων Glare είχε να κάνει μόνο με τα ενδιάμεσα στρώματα prepreg όσων αφορά το συνολικό πάχος τους, το ποσοστό όγκου των περιεχόμενων ινών και το γεγονός ότι στο σύνολο του υλικού που χρησιμοποιήθηκε το ενδιάμεσο στρώμα ρητίνης/ινών αποτελείτο από ένα μόνο prepreg. Παραλήφθηκαν συνολικά τέσσερις παρτίδες υλικού. Και οι τέσσερις ήταν τύπου Glare 2/1 με φύλλα αλουμινίου 2024-T3.

Η πρώτη παρτίδα υλικού αποτελείτο από δύο λωρίδες διαστάσεων 50x200mm (σχήμα 4.1). Για τα δύο αυτά stripes τύπου Glare 2/1 το prepreg περιείχε ίνες E-glass (Electrical-glass) οι οποίες ήταν μοιρασμένες 50-50 σε διάταξη πλέξης προσανατολισμού $\pm 45^\circ$ ως προς τη διεύθυνση έλασης (woven $\pm 45^\circ$). Ήταν προεμπτισμένες σε εποξική ρητίνη FM 73 [17], μια ρητίνη παρόμοια με την FM 94 που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.2.γ. Η διαφορά τους είναι ότι η FM 94 έχει σχεδιαστεί για να διατηρεί τις ιδιότητές της σε ένα μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Τα φύλλα αλουμινίου ήταν και στις δύο λωρίδες 2024-T3 πάχους 0.4mm με τη διαφορά ότι τα φύλλα της πρώτης λωρίδας είχαν υποβληθεί σε χρωμική ανοδίωση (chromic stripe, σχήμα 4.1.α) και της δεύτερης σε θειική ανοδίωση (sulfuric stripe, σχήμα 4.1.β). Επίσης και στα δύο stripes οι πλευρές του αλουμινίου που θα έρχονταν σε επαφή με το prepreg είχαν καλυφθεί με BR 127 primer.



Σχήμα 4.1: Πρώτη παρτίδα υλικού, stripes διαστάσεων 50x200mm (α) chromic, (β) sulfuric stripe.

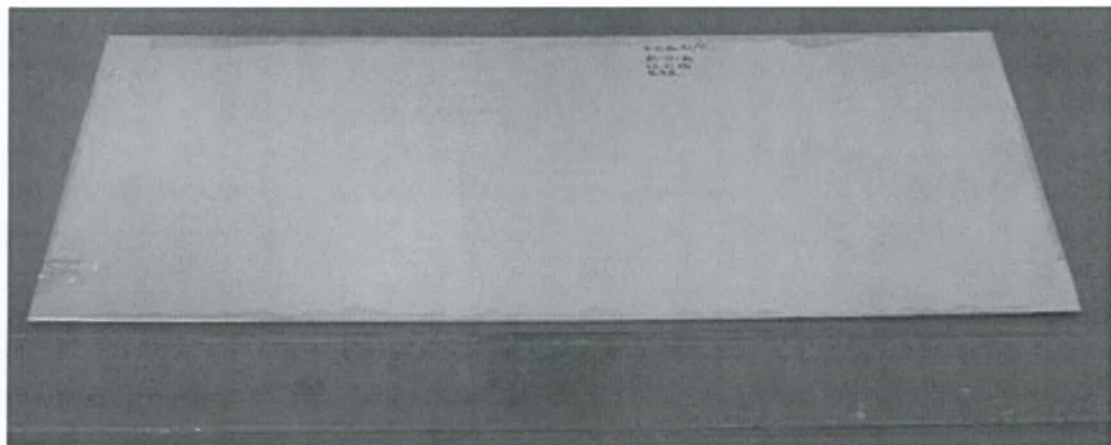
Από τα δύο αυτά stripes κόπηκαν συνολικά τέσσερα δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή διάβρωσης αποφλοίωσης, τα δύο για χρονικό διάστημα δύο ημερών και τα άλλα δύο για τέσσερις ημέρες με σκοπό να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της εξέλιξης της διαβρωτικής δράσης.

Τη δεύτερη παρτίδα υλικού που παραλήφθηκε αποτελούσαν δύο πλάκες διαστάσεων 160×400mm με κωδικούς FCG2-a και FCG3-a. Και οι δύο αυτές πλάκες ήταν τύπου Glare 2/1 με φύλλα αλουμινίου 2024-T3 πάχους 0.4mm, τα οποία όλα είχαν χρωμική ανοδίσωση και επιπλέον επίστρωση με BR 127 στην εσωτερική τους μόνο πλευρά. Για το σχηματισμό του prepreg χρησιμοποιήθηκε και στα δύο plates FM 73 εποξική ρητίνη όμως στο μεν FCG2-a οι ίνες ήταν E-glass με διάταξη πλέξης προσανατολισμού $\pm 45^\circ$ ως προς τη διεύθυνση έλασης (woven $\pm 45^\circ$) ενώ στο FCG3-a ίνες “boron” μονής κατεύθυνσης, παράλληλες στη διεύθυνση έλασης (unidirectional 0°). Από το plate FCG2-a κόπηκαν εννέα δοκίμια διαστάσεων περίπου 50×100mm, όπως στο σχήμα 4.2, για να υποβληθούν σε δοκιμή διάβρωσης διαδοχικών εμβαπτίσεων. Χαρακτηριστικό ήταν πώς οι επιφάνειες και των δύο plates περιείχαν χτυπήματα και γδαρσίματα, γι’ αυτό και από το FCG2-a επιλέχθηκαν τα δοκίμια με τις «καθαρότερες» επιφάνειες.



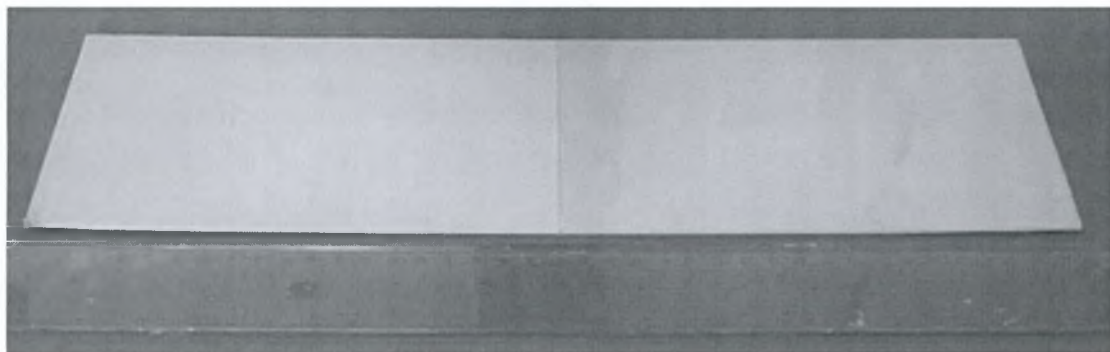
Σχήμα 4.2: Επιλογή δοκιμίων από το plate FCG2-a.

Η επόμενη παρτίδα ήταν ένα φύλλο τύπου Glare 2/1 διαστάσεων 160×400mm με κωδικό FCG4-c (σχήμα 4.3) και ήταν το πρώτο υλικό που παραλήφθηκε κατασκευασμένο με τα προτεινόμενα από τη βιβλιογραφία υλικά. Πιο συγκεκριμένα, τα φύλλα αλουμινίου ήταν 2024-T3 πάχους 0.4mm με χρωμική ανοδίσωση και επιπλέον προστατευτικό επίστρωμα BR 127 στην εσωτερική μόνο πλευρά. Για το σχηματισμό του prepreg χρησιμοποιήθηκε ρητίνη FM 94 και ίνες S-glass μονής κατεύθυνσης, παράλληλα στη διεύθυνση έλασης του αλουμινίου (unidirectional 0°). Από την πλάκα αυτή κόπηκαν επτά δοκίμια διαστάσεων 50×100mm για τη διεξαγωγή της δοκιμής διάβρωσης αποφλοίωσης και κάλυψαν χρόνους έκθεσης από δύο ώρες έως τέσσερις μέρες (96 ώρες).



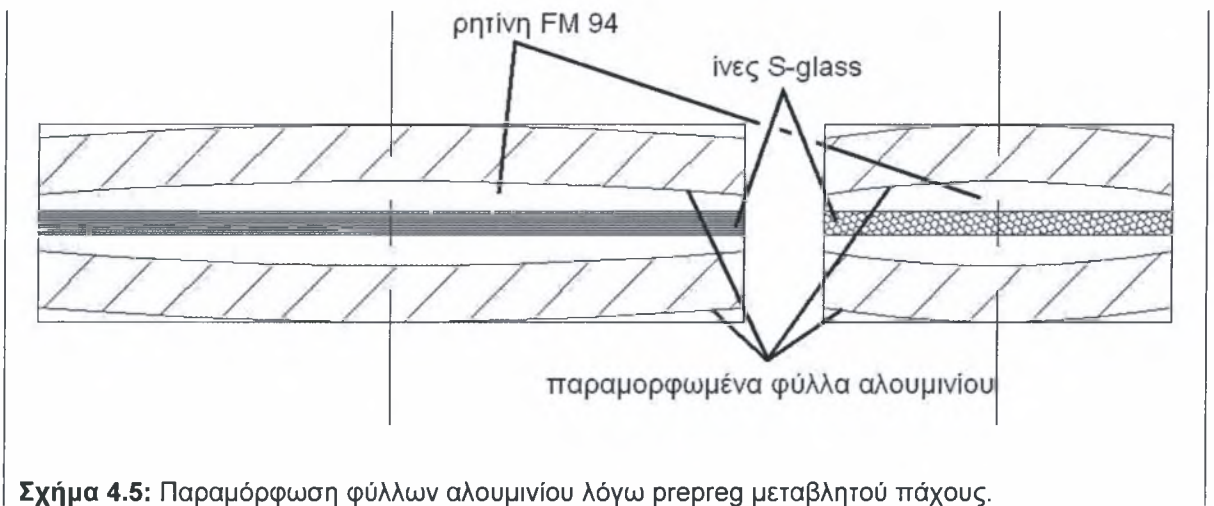
Σχήμα 4.3: Τρίτη παρτίδα υλικού, FCG4-c διαστάσεων 160×400mm.

Τέλος παραλήφθηκε μια ακόμα πλάκα υλικού διαστάσεων 120×400mm με κωδικό FCG4-c (σχήμα 4.4). Αυτό σημαίνει πως είχε ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη παρτίδα υλικού. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι η μισή πλάκα ήταν βαμμένη με αστάρι (πράσινο) και η υπόλοιπη με αστάρι και χρώμα (γκρι).



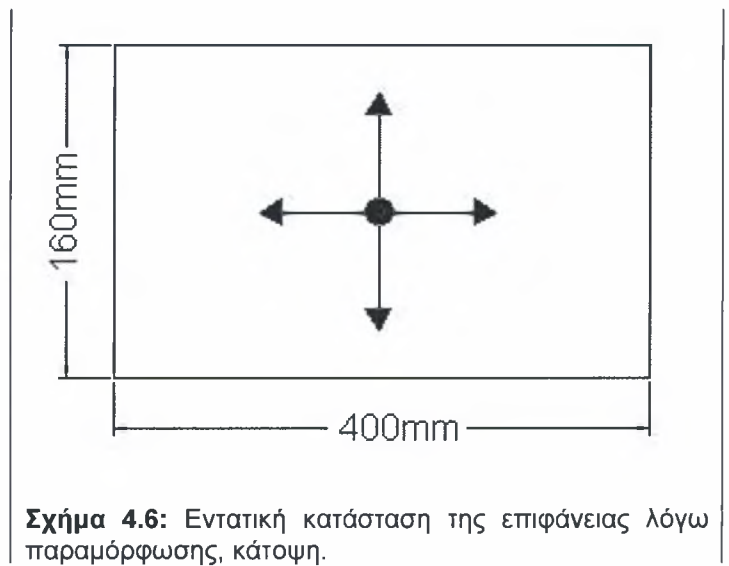
Σχήμα 4.4: Τέταρτη παρτίδα υλικού, FCG4-c διαστάσεων 120×400mm.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις παρτίδες του υλικού που παραλήφθηκαν υπήρχε ανομοιογενής κατανομή της ρητίνης του εσωτερικού στρώματος. Αιτία ήταν μάλλον η μη επιβολή της απαιτούμενης πίεσης κατά τον κύκλο συναρμολόγησης του υλικού (curing cycle). Αυτό που παρατηρήθηκε είναι πως στις ακμές των υλικών το πάχος ήταν αρκετά μικρότερο απ' ότι στο κέντρο τους. Αποτέλεσμα είναι η παραμόρφωση των φύλλων αλουμινίου τόσο κατά των διαμήκη όσο και κατά τον εγκάρσιο άξονα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Παραμόρφωση φύλλων αλουμινίου λόγω prepreg μεταβλητού πάχους.

Η παραμόρφωση αυτή έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία παραμένουσας εφελκυστικής τάσης στα εξωτερικά επίπεδα του υλικού (σχήμα 4.6), η οποία είναι γνωστό ότι ευνοεί την εξέλιξη της διαβρωτικής δράσης. Τέλος ο πίνακας 4.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των υλικών που παραλήφθηκαν.



Σχήμα 4.6: Εντατική κατάσταση της επιφάνειας λόγω παραμόρφωσης, κάτοψη.

Πίνακας 4.1: Σύνοψη χαρακτηριστικών των παρτίδων υλικού που παρελήφθησαν.

υλικό	chr. stripe	sul. stripe	FCG2-a	FCG3-a	FCG4-c	FCG4-c
παρτίδα υλικού	1 ^η	1 ^η	2 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
αλουμίνιο	Al 2024-T3					
ανοδίωση BR 127	χρωμική	θειική	χρωμική	χρωμική	χρωμική	χρωμική
ρητίνη	FM 73	FM 73	FM 73	FM 73	FM 94	FM 94
ίνες	E-glass	E-glass	E-glass	Boron	S-glass	S-glass
προσανατολισμός	45° woven	45° woven	45° woven	uni 0°	uni 0°	uni 0°
επιπλέον επιφανειακή προστασία	όχι	όχι	όχι	όχι	όχι	½ primer, ½ primer+ χρώμα
κωδικός δοκιμών	E1	E2	Al	-	E4	-

4.3 Διαδικασίες επεξεργασίας δοκιμίων.

Κάθε δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης επιβάλλει να γίνει συγκεκριμένη επεξεργασία των δοκιμίων πριν την έναρξη και μετά το πέρας του πειράματος. Η επεξεργασία αυτή έχει απώτερο σκοπό την εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικών αποτελεσμάτων από την κάθε δοκιμή. Στοχεύει λοιπόν στο μηδενισμό κάθε εξωτερικού τυχαίου παράγοντα ο οποίος μπορεί να αλλοιώσει τα αποτελέσματα και περιλαμβάνει:

- την προετοιμασία δοκιμίων για την διεξαγωγή του πειράματος
- τον καθαρισμό και τη μέτρηση της απώλειας βάρους των δοκιμίων μετά το πέρας του πειράματος και
- την προετοιμασία μεταλλογραφικών δοκιμίων.

Οι παραπάνω διαδικασίες εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το υλικό των δοκιμίων και όχι από την κάθε δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης. Θεωρήθηκε λοιπόν σκόπιμο να περιγραφούν οι παραπάνω διαδικασίες πριν την περιγραφή των πειραματικών δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης που διεξήχθησαν.

Όλες οι πειραματικές δοκιμές διάβρωσης καθώς και οι διαδικασίες επεξεργασίας δοκιμίων, οι οποίες περιγράφονται αμέσως στη συνέχεια, διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας λόγω της ύπαρξης του αναγκαίου εξοπλισμού και του ελεγχόμενου περιβάλλοντος ως προς τη θερμοκρασία και την υγρασία. Ακόμα ο ελεγχόμενος και επιτηρούμενος χώρος του εργαστηρίου εξασφαλίζει την ασφαλή και ομαλή διεξαγωγή των πειραμάτων.

4.3.1 Προετοιμασία δοκιμίων για το πείραμα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το υλικό παραλήφθηκε σε φύλλα διαστάσεων 160×400mm και stripes των 50×200mm απ' τα οποία κόπηκαν τα πειραματικά δοκίμια. Η κοπή των δοκιμίων έγινε με κοπτικό εργαλείο *Struers Unitom-2* στις 2775rpm με τροχό σκληρότητας 56 UNI . Τυχόν παραμένουσες τάσεις στις ακμές των δοκιμίων ή ύπαρξη ακαθαρσιών στην επιφάνειά τους είναι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την εξέλιξη της διαβρωτικής διεργασίας επιταχύνοντας ή επιβραδύνοντάς την. Η προετοιμασία των δοκιμίων εστιάζεται στον καθαρισμό τους και την επεξεργασία των ακμών τους.

Η προετοιμασία των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή G1 της ASTM [1]. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε δοκίμιο είναι η εξής. Προηγήθηκε ο καθαρισμός και των δύο πλευρών του δοκιμίου με χρήση οργανικού διαλύτη (αιθυλική αλκοόλη) και η έκθεση αυτού σε θερμό ρεύμα αέρα για να στεγνώσει. Ακολούθησε επιπλέον καθαρισμός με βύθιση σε αραιό διάλυμα νιτρικού οξέως (pickling σε HNO₃ 10% κ.β.), ξέπλυμα του δοκιμίου με απιονισμένο νερό και αιθυλική αλκοόλη και στέγνωμα σε θερμό ρεύμα αέρα. Η επιλογή

του αραιού διαλύματος νιτρικού οξέως έγινε βάση του πίνακα A1.1 της προδιαγραφής G1 μέρος του οποίου φαίνεται στο σχήμα 4.7.

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
C.1.1	Aluminum and Aluminum Alloys	50 mL phosphoric acid (H_3PO_4 , sp gr 1.69) 20 g chromium trioxide (CrO_3) Reagent water to make 1000 mL	5 to 10 min	90°C to Boiling	If corrosion product films remain, rinse, then follow with nitric acid procedure (C.1.2).
C.1.2		Nitric acid (HNO_3 , sp gr 1.42)	1 to 5 min	20 to 25°C	Remove extraneous deposits and bulky corrosion products to avoid reactions that may result in excessive removal of base metal.
C.2.1	Copper and Copper Alloys	500 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.19) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3 min	20 to 25°C	Deaeration of solution with purified nitrogen will minimize base metal removal.
C.2.2		4.9 g sodium cyanide (NaCN) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3 min	20 to 25°C	Removes copper sulfide corrosion products that may not be removed by hydrochloric acid treatment (C.2.1).
C.2.3		100 mL sulfuric acid (H_2SO_4 , sp gr 1.84) Reagent water to make 1000 mL	1 to 3 min	20 to 25°C	Remove bulky corrosion products before treatment to minimize copper redeposition on specimen surface.

Σχήμα 4.7: Μέρος πίνακα επιλογής χημικής διεργασίας καθαρισμού από τα προϊόντα διάβρωσης [1].

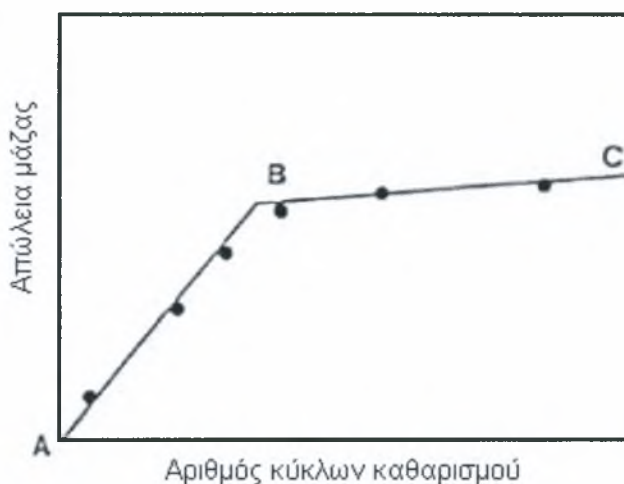
Στη συνέχεια κατεργάστηκαν σε συσκευή λείανσης *Struers Knuth-Rotor-3* με αδιάβροχους λειαντικούς τροχούς καρβιδίου του πυριτίου μεγέθους κόκκων 320 grit όλες οι ακμές του δοκιμίου για να απομακρυνθούν οι ατέλειες που είχαν σχηματιστεί από την κοπή τους. Τέλος το δοκίμιο πλύθηκε με απιονισμένο νερό και αιθυλική αλκοόλη για την απομάκρυνση των αποβλήτων της λείανσης και στέγνωσε σε θερμό ρεύμα αέρα.

Μετά τον καθαρισμό των δοκιμίων μετρήθηκαν και καταγράφηκαν σε ειδικό μητρώο για το καθένα οι διαστάσεις και το βάρος τους. Η μέτρηση των διαστάσεων έγινε με παχύμετρο *Fimec* ακρίβειας 0.02mm και τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε ζυγαριά *Electronic Balance, Libror EB-430D, Shimadzu Corporation* ακρίβειας 0.001g. Τα μητρώα των δοκιμίων περιέχουν επιπλέον πληροφορίες για τη δοκιμή και είναι διαφορετικά για τις δύο δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης (σχήματα 4.12 και 4.14).

4.3.2 Καθαρισμός δοκιμίων μετά το πέρας του πειράματος και μέτρηση της απώλειας μάζας.

Ο καθαρισμός των διαβρωμένων δοκιμίων μετά το πέρας του πειράματος είναι συνυφασμένος με την μέτρηση της απώλειας μάζας. Στοχεύει στην απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης και των υπολειμμάτων του διαβρωτικού διαλύματος από την επιφάνεια των δοκιμίων ώστε να αποφευχθεί περαιτέρω συνέχιση της διαβρωτικής διεργασίας. Επίσης σκοπός του καθαρισμού είναι να μετρηθεί η μάζα του εναπομείνοντος «καθαρού» υλικού (base metal) και να υπολογιστεί η επί τοις εκατό απώλεια μάζας του κάθε δοκιμίου. Όπως και η προετοιμασία των δοκιμίων πριν το πείραμα, η διαδικασία καθαρισμού των δοκιμίων περιγράφεται στην προδιαγραφή G1.

Ο καθαρισμός ενός δοκιμίου είναι μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία κατά την οποία λαμβάνουν χώρα πολλαπλοί καθαρισμοί. Κάθε δοκίμιο μετά την έξοδο από το διαβρωτικό διάλυμα αρχικά ξεπλένεται με άφθονο απιονισμένο νερό στη συνέχεια με αιθυλική αλκοόλη και στεγνώνεται σε θερμό ρεύμα αέρα. Ακολουθεί μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία καθαρισμού κατά την οποία γίνεται βύθιση του δοκιμίου σε αραιό διάλυμα νιτρικού οξέως (pickling) και ελαφρό καθάρισμα της επιφάνειας με μαλακό πινέλο, πλύσιμο με άφθονο απιονισμένο νερό στη συνέχεια με αιθυλική αλκοόλη και τέλος στέγνωμα σε θερμό ρεύμα αέρα. Τον κάθε καθαρισμό ακολουθεί μέτρηση της μάζας του δοκιμίου ώστε να προσδιοριστεί η στιγμή κατά την οποία έχει απομακρυνθεί η κύρια μάζα των προϊόντων της διάβρωσης και ξεκινάει η αφαίρεση «καθαρού» υλικού (base metal). Αυτό επιτυγχάνεται με την χάραξη του διαγράμματος απώλειας μάζας - αριθμός κυκλών καθαρισμού. Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 4.8 η καμπύλη του οποίου αποτελείται από δύο ευθείες, τις AB και BC, με διαφορετική κλίση. Κατά την AB ο καθαρισμός αφαιρεί τα προϊόντα της διάβρωσης. Κατά την BC έχει ολοκληρωθεί η απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης και η αύξηση της απώλειας μάζας οφείλεται πλέον στην αφαίρεση «καθαρού» υλικού. Η πραγματική απώλεια μάζας του δοκιμίου βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο B. Η τιμή της απώλειας μάζας που λαμβάνουμε υπόψη είναι αυτή του σημείου B. Τέλος, καταγράφεται στο μητρώο του δοκιμίου η τελική τιμή της μάζας του.



Σχήμα 4.8: Απώλεια μάζας των διαβρωμένων δοκιμίων εξαιτίας των επαναλαμβανόμενων καθαρισμών [1].

4.3.3 Προετοιμασία μεταλλογραφικών δοκιμίων.

Η απώλεια μάζας των δοκιμίων είναι μια πρώτη ένδειξη του εύρους της διαβρωτικής προσβολής των δοκιμίων. Για λεπτομερέστερη εξέταση και περιγραφή της προσβολής του υλικού πραγματοποιούνται τομές των δοκιμίων κατά τον διαμήκη και εγκάρσιο, ως προς τη διεύθυνση έλασης, άξονα και ετοιμάζονται μεταλλογραφικά δοκίμια. Με την παρατήρηση των δοκιμίων αυτών μετά από κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να γίνει προσδιορισμός του βάθους και του είδους της διαβρωτικής προσβολής του υλικού.

Η προετοιμασία των μεταλλογραφικών δοκιμίων είναι πολύ σημαντική. Παρόλο που είναι μια τετριμμένη διαδικασία πρέπει να γίνεται με προσοχή ώστε να μην αλλοιωθούν οι πληροφορίες που φέρουν τα δοκίμια.

Καταρχήν γίνεται κοπή των διαβρωμένων δοκιμίων σε μικρότερα τεμάχια ώστε να είναι εφικτός ο εγκιβωτισμός τους. Η κοπή μικρότερων τεμαχίων από τα δοκίμια αποτελεί κατά κάποιο τρόπο δειγματοληψία, οπότε η παρατηρούμενη επιφάνεια της τομής πρέπει να έχει τέτοιο μήκος ώστε να περιέχει αρκετή πληροφόρηση για τη διαβρωτική προσβολή και να είναι αντιπροσωπευτική της συνολικής κατάστασης που εμφανίζει το δοκίμιο. Η κοπή γίνεται σε μικροτόμο, συσκευή κοπής ακριβείας, *Struers Accutom-5*. Η χρήση του μεγαλύτερου κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε για την κοπή των πειραματικών δοκιμίων θα έκανε πιο σύντομη την κοπή όμως θα μπορούσε να αλλοιώσει τη διαβρωμένη επιφάνεια απομακρύνοντας ταυτόχρονα με την κοπή μέρος του διαβρωμένου υλικού. Αντιθέτως, η κοπή σε μικροτόμο είναι περισσότερο λεπτεπίλεπτη οπότε ελαχιστοποιείται η επίδραση της κοπής στα δοκίμια.

Για τον εγκιβωτισμό των δοκιμίων που κόπηκαν χρησιμοποιήθηκε ακρυλική ρητίνη *Acryfix* με αναλογία σκόνης προς υγρό 2:1.

Τα εγκιβωτισμένα πλέον δοκίμια λειάνθηκαν, στιλβώθηκαν και υποβλήθηκαν σε χημική προσβολή ώστε να αποκαλυφθεί η μικροδομή του αλουμινίου. Για την λείανση χρησιμοποιήθηκε συσκευή λείανσης *Struers Knuth-Rotor-3* με λειαντικούς τροχούς καρβιδίου του πυριτίου κόκκων μεγέθους 320, 500, 800 και 1000 grit και συνεχή ροή νερού. Η συνεχής ροή νερού είναι απαραίτητη για την απομάκρυνση των αποβλήτων της λείανσης και την ψύξη του δοκιμίου. Η στίλβωση έγινε σε συσκευή *Struers Dap-V* στις 400rpm σε συνολικά τρία στάδια, δύο πρώτα στάδια σε δίσκο *Struers DP-Mol* με χρήση διαμαντόπαστας *DP-Paste-P 3* και 1μm σε συνδυασμό με στιλβωτικό υγρό *DP-Lubricant Green* και ένα τελικό στάδιο σε βελούδινο δίσκο *DP-Nap* με χρήση εναιωρήματος *OP-S* (αλουμίνα). Η χημική προσβολή των δοκιμίων έγινε με βύθιση της παρατηρούμενης επιφάνειας σε αντιδραστήριο Keller's (95mL απεσταγμένο νερό, 2.5mL HNO₃, 1.5mL HCl, και 1mL HF [2]) για 15 δευτερόλεπτα. Η παραπάνω διαδικασία αποκάλυψε την μικροδομή του υλικού προσφέροντας πληροφορίες για το είδος της διαβρωτικής προσβολής.

4.4 Δοκιμή διάβρωσης αποφλοίωσης (exfoliation corrosion test).

Η δοκιμή διάβρωσης αποφλοίωσης (δοκιμή EXCO) περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM G 34 [3]. Πρόκειται για μια δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης κατά την οποία δοκίμια προκαθορισμένων διαστάσεων υπόκεινται σε συνεχή και σταθερή εμβάπτιση σε διαβρωτικό διάλυμα ορισμένης χημικής σύστασης. Ο όρος «αποφλοίωση» αναφέρεται σε διάβρωση η

οποία εξελίσσεται κατά μήκος επιπέδων παράλληλων στην επιφάνεια όπου άρχεται η διαβρωτική διεργασία (σχήμα 4.9). Εξελίσσεται κατά κύριο λόγο περικρυσταλλικά (intergranular), διαδίδεται δηλαδή μέσω των ορίων των κόκκων (σχήμα 4.10). Τα προϊόντα της διάβρωσης ανασηκώνουν φύλλα υλικού, τα οποία τείνουν να αποκολληθούν από το κυρίως σώμα του με αποτέλεσμα την αποφλοίωση.

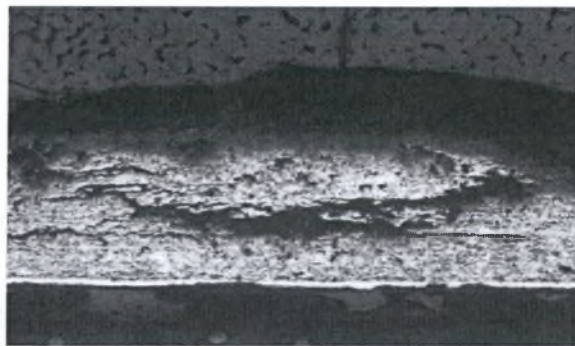
Η συγκεκριμένη μέθοδος επιταχυνόμενης διάβρωσης προτείνεται για τα υψηλής αντοχής κράματα αλουμινίου των σειρών 2xxx και 7xxx. Τα φύλλα αλουμινίου που αποτελούν τα εξωτερικά στρώματα του υλικού που χρησιμοποιήθηκε

για τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν της σειράς 2xxx, για αυτό και επιλέχθηκε η συγκεκριμένη πειραματική μέθοδος.

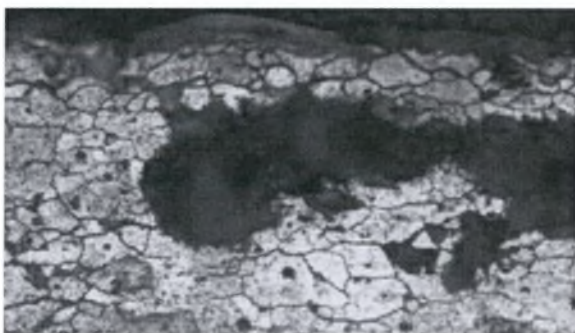
Αρχικά η δοκιμή EXCO αναπτύχθηκε με σκοπό την έρευνα και ανάπτυξη νέων υλικών διερευνώντας την αντίστασή τους σε διάβρωση. Έως και το έτος 2001, οπότε και έγινε η επανέγκριση της προδιαγραφής G34 που ήταν διαθέσιμη (G34-01), δεν ήταν δυνατή η ακριβής συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της δοκιμής EXCO και του εύρους της προσβολής των κραμάτων αλουμινίου υπό πραγματικές συνθήκες. Ωστόσο η δοκιμή EXCO παραμένει χρήσιμη καθώς προσφέρει τη δυνατότητα διερεύνησης της αιτίας και του μηχανισμού προσβολής του υλικού με μεγάλη οικονομία χρόνου.

4.4.1 Σύσταση και παρασκευή του διαβρωτικού διαλύματος.

Το διαβρωτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή EXCO χαρακτηρίζεται ως αρκετά επιθετικό. Αντικατοπτρίζει συνθήκες οι οποίες συναντώνται σε ιδιαίτερα διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως παραθαλάσσιες ή βιομηχανικές περιοχές, με την υπόθεση ότι δεν παραβρίσκονται ιδιαίτερα ασυνήθιστες και επιθετικές χημικές ουσίες. Το διάλυμα περιέχει 4M χλωριούχο νάτριο (NaCl), 0.5M νιτρικό κάλιο (KNO_3) και 0.1M νιτρικό οξύ (HNO_3). Για την επίτευξη των παραπάνω συγκεντρώσεων χρειάζεται να διαλυθούν 234g NaCl , 50g KNO_3 και 6.3mL συμπυκνωμένου HNO_3 70% κ.β. σε 1L νερού. Η ονομαστική τιμή του



Σχήμα 4.9: Διάβρωση αποφλοίωσης.



Σχήμα 4.10: Περικρυσταλλική διάβρωση.

pH του διαλύματος είναι 0.4. Η ποσότητα του διαλύματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει μια αναλογία όγκου προς επιφάνεια μετάλλου από 10 έως 30mL/cm².

Το νερό προδιαγράφεται να είναι τύπου IV απιονισμένο ή απεσταγμένο χημικό νερό. Σύμφωνα με την προδιαγραφή D 1193 της ASTM [4] και αγνοώντας τις τιμές της συγκέντρωσης για το νάτριο και τα χλωρίδια όπως υπαγορεύει η G34, το νερό που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα μικρότερη από 5.0μS/cm, ειδική αντίσταση μεγαλύτερη από 0.2MΩ cm (ειδική αντίσταση = αγωγιμότητα⁻¹) και pH από 5.0 έως 8.0. Και οι τρεις παραπάνω τιμές αφορούν τη θερμοκρασία των 25°C.

Για την παρασκευή του διαλύματος χρησιμοποιήθηκαν χημικά NaCl, KNO₃ και HNO₃. Από την Εταιρία Βιομηχανικής Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης Μετάλλων (EBETAM A.E.) προμηθεύτηκε απιονισμένο νερό με ηλεκτρική αγωγιμότητα 1.94μS/cm, επομένως η ειδική του αντίσταση είναι 0.52MΩ cm, ενώ το pH μετρήθηκε 6.54. Οι μετρήσεις της αγωγιμότητας και της οξύτητας έγιναν με *Consort C231 electrochemical multimeter*.

4.4.2 Προετοιμασία των δοκιμών.

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμή EXCO κόπηκαν σε διαστάσεις 50×100mm που είναι το ελάχιστο μέγεθος το οποίο προτείνει η προδιαγραφή της δοκιμής. Στο καθένα δόθηκε κωδικοποιημένο όνομα της μορφής Εα(#), όπου το “Ε” σημαίνει ότι πρόκειται για δοκίμιο EXCO, το “α” είναι ένας αριθμός από 1 έως 4 που αντιστοιχεί στο υλικό από το οποίο προήλθε και ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στον χρόνο έκθεσης, σε ώρες, του δοκιμίου στο διαβρωτικό περιβάλλον. Τα δοκίμια αυτά αφού προετοιμάστηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 4.3.1, καλύφθηκε η όπισθεν επιφάνειά τους με προστατευτικό αυτοκόλλητο για την ελαχιστοποίηση της διάβρωσης στη μη ενδιαφερόμενη επιφάνεια, όπως ορίζει η G 34. Τέλος, ο πίνακας 4.2 περιέχει τις ακριβείς διαστάσεις, το αρχικό βάρος, το χρόνο έκθεσης και το υλικό προέλευσης των δοκιμών.

Πίνακας 4.2: Βάρος, διαστάσεις, χρόνος έκθεσης και τύπος υλικού των δοκιμών EXCO.

Δοκίμιο	Βάρος (g)	Διαστάσεις (mm)	Χρόνος (hr)	Υλικό	“α”
E1(48)	12.79	99.22×50.18	48	chr. stripe	1
E1(96)	13.09	100.48×50.04	96	chr. stripe	
E2(48)	13.65	100.08×50.12	48	sul. stripe	2
E2(96)	13.42	99.06×49.96	96	sul. stripe	
E4(02)	16.31	100.36×50.66	2	FCG4-c	4
E4(24)	16.19	100.42×50.60	24	FCG4-c	
E4(30)	15.878	100.08×50.14	30	FCG4-c	
E4(36)	16.023	100.16×50.10	36	FCG4-c	
E4(48)	16.09	100.54×50.18	48	FCG4-c	
E4(96)	16.13	100.60×50.26	96	FCG4-c	

4.4.3 Πειραματική διαδικασία.

Κατά τη δοκιμή EXCO τα δοκίμια παραμένουν για ένα χρονικό διάστημα βυθισμένα στο διαβρωτικό διάλυμα με την κύρια επιφάνειά τους παράλληλη στον οριζόντιο άξονα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν αδρανή πλαστικά δοχεία μέγιστης χωρητικότητας 8 λίτρων. Τα δοκίμια στερεώθηκαν στον πυθμένα των δοχείων με αδρανή πλαστικά στηρίγματα και ταινία διπλής όψεως με την προς μελέτη επιφάνεια άνωθεν (σχήμα 4.11). Εισήχθη το διαβρωτικό διάλυμα με αναλογία όγκου διαλύματος προς επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου περίπου $30\text{mL}/\text{cm}^2$ καθώς παρασκευάστηκε 1.5L διαλύματος για το κάθε δοκίμιο. Η οξύτητα του διαλύματος μετρήθηκε και καταγράφηκε στο ειδικό μητρώο. Κατόπιν σκεπάστηκαν τα δοχεία για την ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού από εξάτμιση. Ο λόγος ήταν ότι η εξάτμιση αρκετά μεγάλης ποσότητας νερού θα είχε σαν συνέπεια την αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου στο διάλυμα με αποτέλεσμα την αυξημένη οξύτητά του (χαμηλή τιμή pH) και την επιτάχυνση της διαβρωτικής διεργασίας.



Σχήμα 4.11: Πειραματική διάταξη δοκιμής EXCO.

Μετά το πέρας του προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος το κάθε δοκίμιο εξήχθη από το διάλυμα και υποβλήθηκε σε μακροσκοπική φωτογράφιση και στερεοσκοπικό έλεγχο της διαβρωμένης επιφάνειας. Στη συνέχεια αφού αφαιρέθηκε η αυτοκόλλητη επικάλυψη της πίσω, μη μελετούμενης επιφάνειας έγινε ο καθαρισμός και η μέτρηση της απώλειας βάρους του δοκιμίου σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 4.3.2. Ακολούθησε η μέτρηση της τελικής τιμής pH του διαλύματος και καταγραφή των μετρήσεων στο μητρώο του δοκιμίου. Τα μητρώα της δοκιμής EXCO έχουν τη μορφή του σχήματος 4.12. Όλα τα μητρώα της δοκιμής EXCO βρίσκονται στο παράρτημα Α.

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: Ε () Υλικό:	Χρόνος έκθεσης (hr):
Διαστάσεις δοκιμίου: μήκος (mm) =	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: ώρα:
πλάτος (mm) =	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: ώρα:
πάχος (mm) =	
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) =	
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²):	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): W_{in} =	Αρχική οξύτητα διαλύτος: pH_{in} =
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): W_{out} =	Τελική οξύτητα διαλύτος: pH_{out} =
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W)$ =	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH)$ =
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34:	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα 4.12: Μητρώα δοκιμίων για τη δοκιμή αποφλοίωσης (EXCO).

Τέλος, κόπηκαν δοκίμια κατά το διαμήκη και τον εγκάρσιο άξονα της διεύθυνσης έλασης των φύλλων αλουμινίου, τα οποία εγκιβωτίστηκαν και προετοιμάστηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία του υποκεφαλαίου 4.3.3. για να παρατηρηθούν σε οπτικό μικροσκόπιο.

4.5 Δοκιμή διαδοχικών εμβαπτίσεων (alternate immersion test).

Η δοκιμή διαδοχικών εμβαπτίσεων (δοκιμή AI) περιγράφεται από την προδιαγραφή ASTM G-44 [5]. Είναι και αυτή μια δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης κατά την οποία τα πειραματικά δοκίμια υπόκεινται σε περιοδική εμβάπτιση σε υδατικό διάλυμα συγκεκριμένης περιεκτικότητας σε χλωριούχο νάτριο (NaCl).

Η δοκιμή AI χρησιμοποιείται για την διερεύνηση της ευαισθησίας σε ιόντα χλωρίου κυρίως των κραμάτων αλουμινίου και σιδήρου και προσομοιάζει την περιοδική έκθεση των υλικών σε συγκεκριμένες φυσικές συνθήκες όπως για παράδειγμα αυτές που επικρατούν σε παραθαλάσσιες περιοχές. Είναι χαρακτηριστικό πως η δοκιμή μπορεί να γίνει εναλλακτικά με υποκατάστατο θαλασσινό νερό συγκεκριμένης προδιαγραφής. Όπως όλες οι δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης έτσι και η δοκιμή AI δεν αντικατοπτρίζει την συμπεριφορά των υλικών σε περιβάλλοντα παρουσία διαφόρων χημικών ουσιών οι οποίες μπορεί να μεταβάλλουν την εξέλιξη και τη μορφή της διαβρωτικής δράσης.

Η δοκιμή AI καλύπτει ένα μεγάλο εύρος μηχανισμών διάβρωσης (εργοδιάβρωση, τρηματική διάβρωση, περικρυσταλλική διάβρωση κλπ) και χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη νέων υλικών προσφέροντας αποτελέσματα για την διαβρωτική τους αντίσταση σε

μικρό χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιείται επίσης ως δοκιμή ελέγχου κατά τον ποιοτικό έλεγχο δοκιμών και γι αυτό είναι απαραίτητη η διατήρηση των συνθηκών της δοκιμής στα επίπεδα που ορίζονται από την προδιαγραφή.

4.5.1 Σύσταση και παρασκευή του διαβρωτικού διαλύματος.

Για τη δοκιμή AI χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου περιεκτικότητας 3.5% κ.β. Για την επίτευξη της τιμής αυτής της συγκέντρωσης διαλύονται 36.27g NaCl σε 1L νερού. Το νερό, όπως και στη δοκιμή EXCO, πρέπει να είναι τύπου IV αγνοώντας τις τιμές που προδιαγράφονται όσον αφορά τη συγκέντρωση του νατρίου και του χλωρίου. Σύμφωνα με την προδιαγραφή D 1193 τα όρια για την οξύτητα (pH) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού είναι 5.0 έως 8.0 και λιγότερο από 5.0μS/cm αντίστοιχα.

Συγκριτικά με τη δοκιμή EXCO το διάλυμα της δοκιμής AI δεν είναι τόσο επιθετικό και γι' αυτό απαιτείται η έκθεση δοκιμών για μεγάλο χρονικό διάστημα το οποίο φθάνει έως και τους τρεις μήνες. Για τη διατήρηση της οξύτητας του διαλύματος στα ίδια επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος η προδιαγραφή προτείνει την περιοδική αντικατάσταση του διαβρωτικού διαλύματος ή τουλάχιστον την παρακολούθηση και περιοδική ρύθμιση της οξύτητάς του. Το pH του διαλύματος πρέπει να παραμένει μεταξύ των τιμών 6.4 και 7.2 ενώ η ρύθμιση του γίνεται με προσθήκη υδροχλωρίου (HCl) ή καυστικού νατρίου (NaOH). Η ποσότητα του διαλύματος ορίζεται να είναι το λιγότερο 32mL/cm² εκτιθέμενης επιφάνειας. Επίσης για την αποφυγή μεγάλων διακυμάνσεων της οξύτητας προτείνεται στην προδιαγραφή η χρησιμοποίηση του ελάχιστου δυνατού όγκου διαλύματος καθώς και η καθημερινή αναπλήρωση με νερό έως την αρχική ποσότητα διαλύματος. Τέλος η θερμοκρασία του διαλύματος αφήνεται να έρθει σε ισορροπία με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου πριν την χρησιμοποίησή του και πλέον δεν απαιτείται καμία ρύθμιση της.

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος προτιμήθηκε η αντικατάσταση του διαλύματος κάθε εβδομάδα όταν αυτό ήταν εφικτό ενώ τις υπόλοιπες φορές γινόταν ρύθμιση του pH εφόσον απαιτείτο. Για την παρασκευή του διαλύματος προμηθευόταν απιονισμένο νερό από την Εταιρία Βιομηχανικής Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης Μετάλλων (EBETAM A.E.) του οποίου γινόταν μέτρηση της οξύτητας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Κατόπιν γινόταν η παρασκευή του διαλύματος χρησιμοποιώντας χημικό NaCl και η ρύθμιση του pH εντός των προκαθορισμένων ορίων.

4.5.2 Προετοιμασία των δοκιμών.

Αντίθετα με την προδιαγραφή της δοκιμής EXCO για τη δοκιμή AI δεν ορίζεται συγκεκριμένο μέγεθος δοκιμών. Τα δοκίμια AI λοιπόν κόπηκαν στις ίδιες διαστάσεις με αυτά της δοκιμής EXCO, 100×50mm, καθώς το συγκεκριμένο μέγεθος δοκιμών κρίθηκε επαρκές.

Στο κάθε δοκίμιο AI δόθηκε κωδικοποιημένο όνομα της μορφής AI(#), όπου το "AI" δείχνει ότι πρόκειται για δοκιμή AI, και ο αριθμός στην παρένθεση αντιστοιχεί στον χρόνο έκθεσης σε μέρες του δοκιμίου στο διαβρωτικό περιβάλλον. Στη συνέχεια ανοίχτηκαν οπές στο πάνω μέρος των δοκιμίων ώστε να κρεμαστούν στη δεξαμενή της δοκιμής και ακολούθησε η προετοιμασία των δοκιμίων σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 4.3.1. Τέλος, ο πίνακας 4.3 περιέχει τις ακριβείς διαστάσεις, το αρχικό βάρος, ο χρόνο έκθεσης και το υλικό προέλευσης των δοκιμίων.

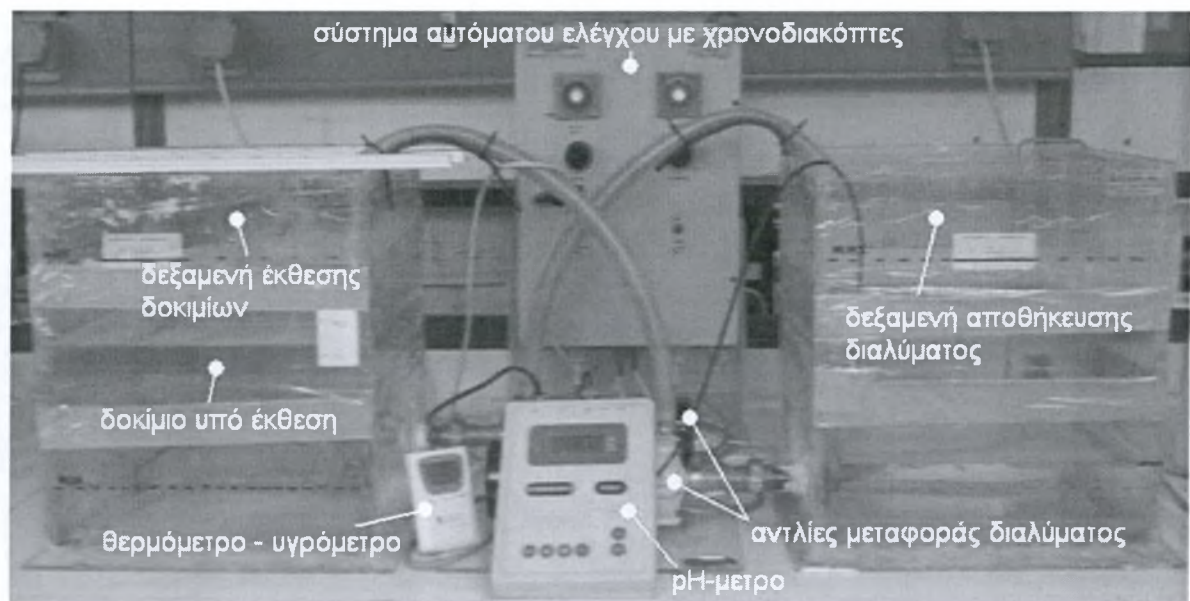
Πίνακας 4.3: Βάρος, διαστάσεις, χρόνος έκθεσης και τύπος υλικού των δοκιμίων AI.

Δοκίμιο	Βάρος (g)	Διαστάσεις (mm)	Χρόνος (ds)	Υλικό
AI(02)	13.006	98.20×49.22	2	
AI(05)	13.330	96.84×50.08	5	
AI(10)	13.142	97.34×50.06	10	
AI(15)	13.272	96.58×49.88	15	
AI(31)	13.118	97.86×49.88	31	FCG2a
AI(45)	13.780	98.00×48.96	45	
AI(60)	13.785	97.76×48.98	60	
AI(75)	13.273	96.82×49.70	75	
AI(90)	13.272	97.66×49.34	90	

4.5.3 Πειραματική διαδικασία.

Η δοκιμή AI είναι μια δοκιμή διαδοχικών εμβαπτίσεων. Σύμφωνα με την προδιαγραφή τα δοκίμια πρέπει να παραμένουν στο διαβρωτικό διάλυμα για δέκα λεπτά και στη συνέχεια να αφήνονται να στεγνώσουν για πενήντα λεπτά. Ο κύκλος αυτός της μιας ώρας επαναλαμβάνεται για όλη τη διάρκεια της συνολικής έκθεσης των δοκιμίων.

Για την επίτευξη του χρονικού κύκλου της δοκιμής AI έχει κατασκευαστεί από το εργαστήριο υλικών μια ιδιοσυσκευή δοκιμής διαδοχικών εμβαπτίσεων (σχήμα 4.13). Η λειτουργία της συσκευής βασίζεται στην ιδέα της μεταφοράς του διαβρωτικού διαλύματος. Για το λόγο αυτό αποτελείται από δύο δεξαμενές χωρητικότητας 25.2L, δύο αντλίες και ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο ενεργοποιεί τις αντλίες την κατάλληλη στιγμή ώστε να τηρείται ο χρονικός κύκλος της δοκιμής. Τα δοκίμια βρίσκονται αναρτημένα με πλαστικό αδρανές νήμα (πετονιά) σε κάθετη θέση μέσα στη μια δεξαμενή. Η δεύτερη δεξαμενή χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του διαβρωτικού διαλύματος τα πενήντα λεπτά κατά τα οποία τα δοκίμια αφήνονται να στεγνώσουν.



Σχήμα 4.13: Πειραματική διάταξη δοκιμής Al.

Αφού ελέγχθηκε και ρυθμίστηκε η λειτουργία της συσκευής ώστε να τηρείται ο απαιτούμενος χρονικός κύκλος εμπάπτισης τοποθετήθηκαν τα δοκίμια στη δεξαμενή για την έναρξη του πειράματος. Ο μέγιστος δυνατός όγκος των δεξαμενών της συσκευής σε συνδυασμό με τον ελάχιστο λόγο διαλύματος προς επιφάνειας έκθεσης περιορίζει τον μέγιστο αριθμό ταυτόχρονης έκθεσης των δοκιμίων στα επτά. Για το λόγο αυτό οργανώθηκε και τηρήθηκε το χρονοδιάγραμμα του πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Χρονοδιάγραμμα δοκιμής Al.

17/3/2006	έναρξη δοκιμής Al.	
17/3/2006	έναρξη έκθεσης των δοκιμίων	Al(02,10,15,60,75&90)
19/3/2006	πέρας έκθεσης του	Al(02)
24/3/2006	έναρξη έκθεσης του	Al(45)
27/3/2006	πέρας έκθεσης του	Al(10)
1/4/2006	πέρας έκθεσης του	Al(15)
7/4/2006	έναρξη έκθεσης του	Al(05)
12/4/2006	πέρας έκθεσης του	Al(05)
14/4/2006	έναρξη έκθεσης του	Al(31)
8/5/2006	πέρας έκθεσης του	Al(45)
15/5/2006	πέρας έκθεσης του	Al(31)
16/5/2006	πέρας έκθεσης του	Al(60)
31/5/2006	πέρας έκθεσης του	Al(75)
15/6/2006	πέρας έκθεσης του	Al(90)
15/6/2006	πέρας δοκιμής Al.	

Αφού ετοιμάστηκε το διάλυμα ελέγχθηκε η οξύτητά του και η έγινε η απαραίτητη ρύθμισή της σε τιμή εντός των ορίων της προδιαγραφής με προσθήκη καυστικού νατρίου και υδροχλωρίου. Έπειτα το διάλυμα αφέθηκε σε ηρεμία έως ότου εξισωθεί η θερμοκρασία του με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και στη συνέχεια έγινε η εισαγωγή του στη δεξαμενή με τα αναρτημένα δοκίμια ώστε να ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία και η λειτουργία των χρονοδιακοπών της συσκευής.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής γινόταν καθημερινή, όποτε αυτό ήταν δυνατό, παρακολούθηση της οξύτητας του διαλύματος καθώς και των τιμών της θερμοκρασίας και της υγρασίας του χώρου του εργαστηρίου με προσπάθεια ρύθμισης και διατήρησης των απαιτούμενων συνθηκών εκ του κλιματισμού του χώρου. Οι τιμές που ορίζονται από την προδιαγραφή είναι $27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$ για τη θερμοκρασία και $45\% \pm 10\%$ για τη σχετική υγρασία. Οι τιμές που καταγράφηκαν βρίσκονται στο παράρτημα Β. Επίσης ήταν αναγκαία η καθημερινή προσθήκη νερού στο διάλυμα. Λόγω της ελεύθερης επιφάνειας του διαλύματος εξατμιζόταν συνεχώς ποσότητα ύδατος από το διάλυμα η οποία έπρεπε να αναπληρώνεται ώστε να παραμένει σταθερή η περιεκτικότητα σε χλωριούχο νάτριο. Για το λόγο αυτό είχε σημειωθεί η αρχική στάθμη διαλύματος στη δεξαμενή με τα δοκίμια και γινόταν καθημερινά αναπλήρωση με απιονισμένο νερό ως το σημείο αυτό.

Μετά το πέρας του χρόνου έκθεσης του κάθε δοκιμίου τα βήματα που ακολουθούσαν ήταν τα ίδια με αυτά της δοκιμής EXCO με μόνη διαφορά ότι στη δοκιμή AI και οι δύο επιφάνειες των δοκιμίων ήταν εκτεθειμένες στο διάλυμα άρα και κατάλληλες για μελέτη. Γινόταν λοιπόν μακροσκοπική φωτογράφιση και στερεοσκοπικός έλεγχος και των δύο επιφανειών του δοκιμίου, καθαρισμός και μέτρηση της απώλειας βάρους του σύμφωνα με τη διαδικασία του υποκεφαλαίου 4.3.2 και καταγραφή στο μητρώο του δοκιμίου (σχήμα 4.14). Όλα τα μητρώα της δοκιμής AI βρίσκονται στο παράρτημα Α.

Τέλος, όπως και στη δοκιμή EXCO κόπηκαν δοκίμια κατά το διαμήκη και τον εγκάρσιο άξονα της διεύθυνσης έλασης του αλουμινίου, τα οποία εγκιβωτίστηκαν και προετοιμάστηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία του υποκεφαλαίου 4.3.3 για να παρατηρηθούν σε οπτικό μικροσκόπιο.

Μητρώο δοκιμίου Alternate Immersion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: Al(.)	Υλικό:
Διαστάσεις δοκιμίου: μήκος (mm) =	Χρόνος έκθεσης (ds):
πλάτος (mm) =	έναρξη έκθεσης δοκιμίου:
πάχος (mm) =	ώρα:
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) =	πέρας έκθεσης δοκιμίου:
Θέση στη συσκευή:	ώρα:
	Χρόνος εμβάπτισης: 10 min/hr
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): W_{in} =	Μέση τιμή οξύτητας του διαλύματος κατά την έκθεση του δοκιμίου: pH =
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): W_{out} =	
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W)$ =	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας I του δοκιμίου βάσει ASTM G34:	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας II του δοκιμίου βάσει ASTM G34:	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα 4.14: Μητρώα δοκιμίων για τη δοκιμή διαδοχικών εμβάπτισων (AI).

Αναφορές

- [1] Standard ASTM G1 – 90 (Reapproved 1999) "Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens", 1990.
- [2] Vander Voort, George F., Metallography principles and practice, McGraw-Hill, New Work, 1984.
- [3] Standard ASTM G34 – 01 "Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO test)", 2001.
- [4] Standard ASTM D1193 - 99 "Standard Specification for Reagent Water", 1999.
- [5] Standard ASTM G44 – 99 "Standard Practice for Exposure of Metals and Alloys by Alternate Immersion in Neutral 3.5% Sodium Chloride Solution", 1999.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης.

5.1 Εισαγωγή.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν ποσοτικά, ή αριθμητικά, και ποιοτικά. Τα ποσοτικά αποτελέσματα περιλαμβάνουν μετρήσεις της απώλειας βάρους των δοκιμίων, της μεταβολής του pH του διαβρωτικού διαλύματος και άλλες μετρήσεις, που εξαρτώνται από τη δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης και το είδος και εύρος της διαβρωτικής προσβολής. Τα ποιοτικά αποτελέσματα έχουν να κάνουν με τον χαρακτηρισμό του εύρους και του είδους της προσβολής του υλικού μετά την στερεοσκοπική και μεταλλογραφική εξέταση και σύγκριση με πρότυπες φωτογραφίες.

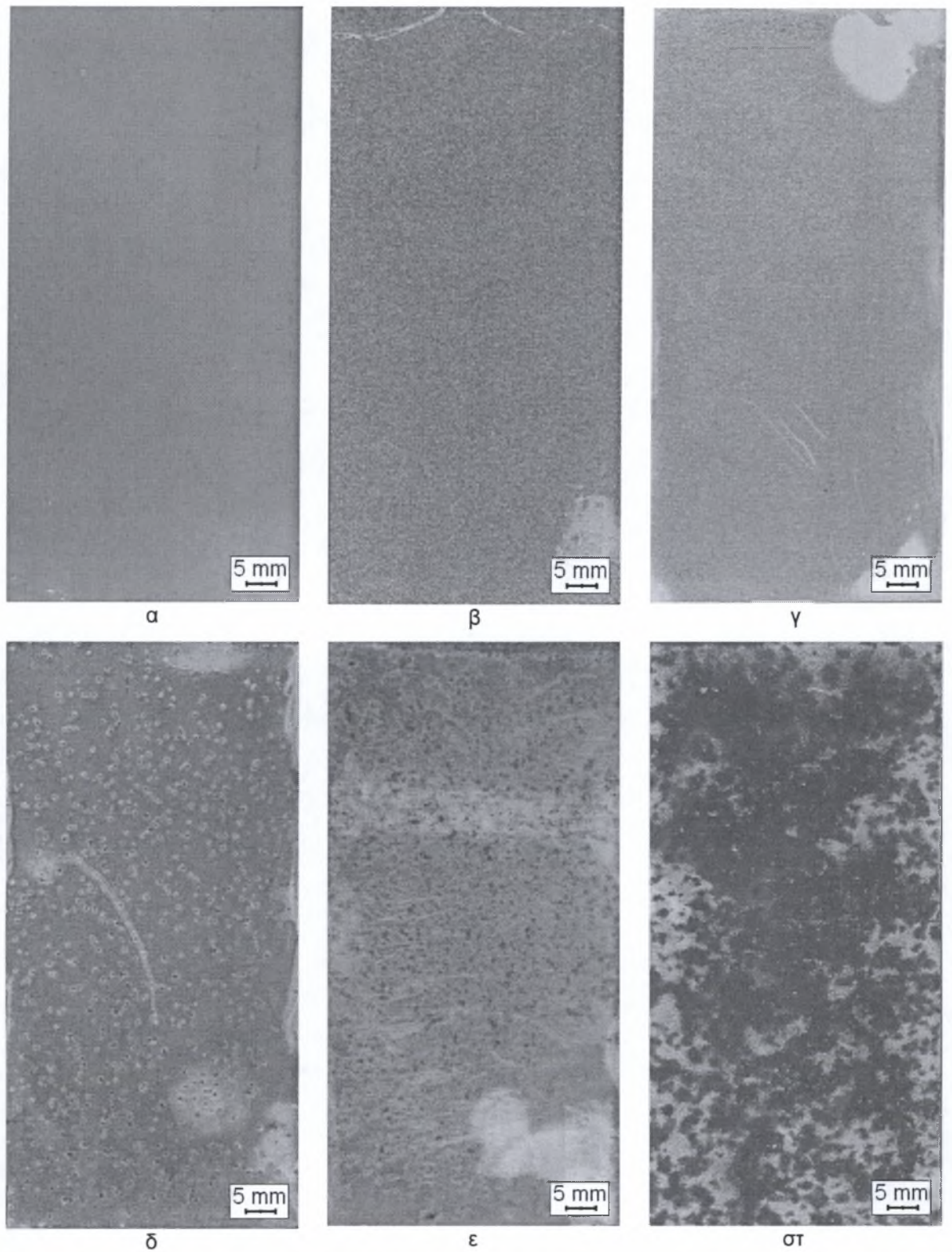
Αμέσως στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών EXCO και AI. Για την κάθε δοκιμή παρουσιάζονται φωτογραφίες της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων (μακροσκοπικές φωτογραφίες και στερεοσκοπικός έλεγχος), φωτογραφίες μεταλλογραφικών τομών, καθώς και ποσοτικά αποτελέσματα μαζί με σύντομο σχολιασμό.

5.2 Αποτελέσματα δοκιμής EXCO.

Στα ποσοτικά αποτελέσματα της δοκιμής EXCO περιλαμβάνονται οι μετρήσεις της απώλειας βάρους των δοκιμίων, της μεταβολής του pH του διαβρωτικού διαλύματος, του ρυθμού διάβρωσης (corrosion rate), του αριθμού των τρημάτων ανά μονάδα επιφάνειας (pits density) και του βάθους προσβολής του υλικού. Τα ποιοτικά αποτελέσματα αφορούν τον χαρακτηρισμό της διαβρωμένης επιφάνειας σύμφωνα με τις οδηγίες και τις φωτογραφίες διαφόρων προδιαγραφών. Αμέσως στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής EXCO με τη σειρά με την οποία εξήχθησαν.

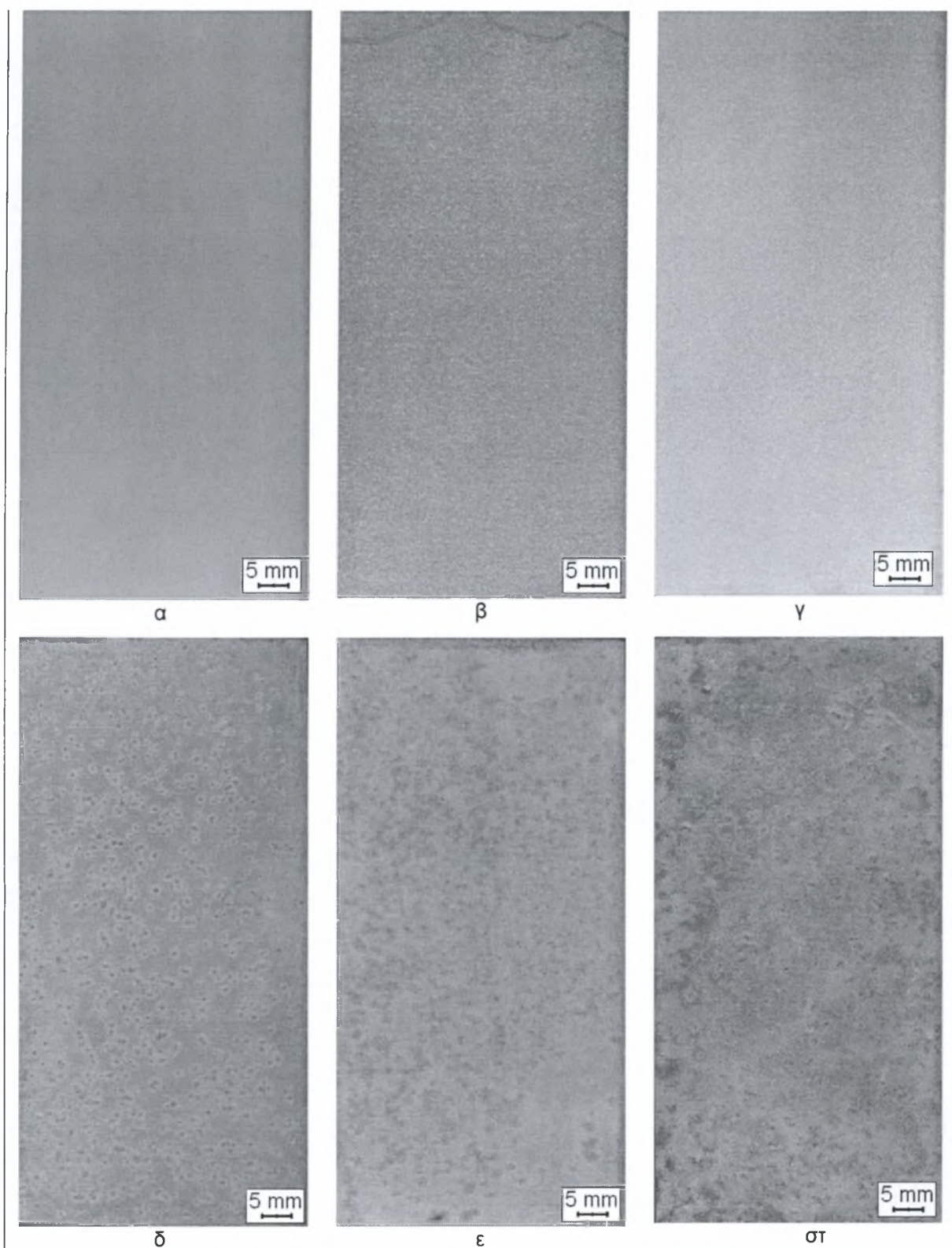
5.2.1 Μακροσκοπική φωτογράφιση.

Μετά το πέρας της έκθεσης των δοκιμίων και την εξαγωγή τους από το διαβρωτικό διάλυμα το καθένα φωτογραφήθηκε πριν και μετά τον καθαρισμό του. Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η όψη της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων E4 (FCG4-c) όπως ήταν αυτή αμέσως μόλις εξήχθησαν απ' το διαβρωτικό διάλυμα, χωρίς δηλαδή να έχουν αφαιρεθεί τα προϊόντα της διάβρωσης.



Σχήμα 5.1: Φωτογραφίες της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων E4 πριν τον καθαρισμό τους. (α) E4(02), (β) E4(24), (γ) E4(30), (δ) E4(36), (ε) E4(48), (στ) E4(96).

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει τη διαβρωμένη επιφάνεια των ίδιων δοκιμίων όπως αυτή ήταν αμέσως μετά τον καθαρισμό τους από τα προϊόντα της διάβρωσης. Η διαδικασία του καθαρισμού έχει περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 4.3.2.



Σχήμα 5.2: Φωτογραφίες της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων E4 μετά τον καθαρισμό τους. (α) E4(02), (β) E4(24), (γ) E4(30), (δ) E4(36), (ε) E4(48), (στ) E4(96).

Οι πρώτες ενδείξεις που παίρνουμε από τις παραπάνω φωτογραφίες είναι πως στο δοκίμιο E4(02) η επιφάνεια είναι στην ουσία απρόσβλητη, εκτός από τις περιοχές όπου

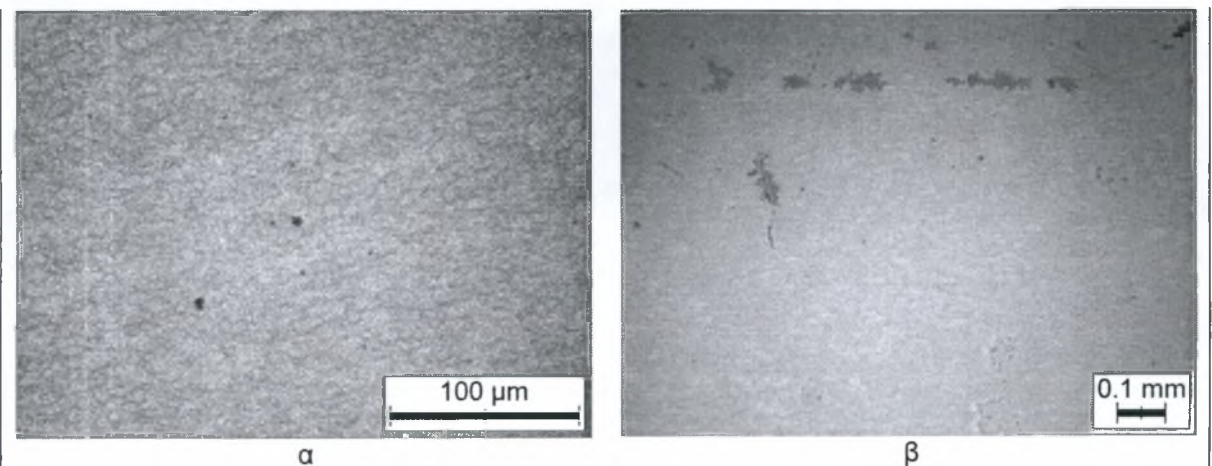
υπήρχαν κάποιες ατέλειες όπως γδαρσίματα. Τα δοκίμια E4(24) και E4(30) παρουσιάζουν μια ομοιόμορφα προσβεβλημένη επιφάνεια. Στα υπόλοιπα τρία δοκίμια είναι εμφανές ότι πρόκειται για προχωρημένα στάδια της διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο E4(36) φαίνεται να παρουσιάζει τρημματική διάβρωση και τα E4(48) και E4(96) διάβρωση αποφλοίωσης. Τέλος χρειάζεται να σημειωθεί ότι στο δοκίμιο E4(48) παρατηρείται μια μικρή «καθαρή» περιοχή στο κάτω δεξιά μέρος του. Αυτό οφείλεται στο ότι η περιοχή αυτή καλυπτόταν αρχικά από ρητίνη (adhesive film).

5.2.2 Στερεοσκοπικός έλεγχος.

Ο στερεοσκοπικός έλεγχος έρχεται να επιβεβαιώσει τις παραπάνω παρατηρήσεις. Το στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα *Leica Wild M3Z* με δυνατότητα μεγέθυνσης από $\times 6.5$ έως $\times 40$ φορές και οι φωτογραφίες προέρχονται από ψηφιακή φωτογραφική μηχανή *Leica DC 300*.

Παρακάτω στα σχήματα 5.3 έως 5.7 δίνονται χαρακτηριστικές περιοχές των δοκιμών E4 (FCG4-c) όπως φαίνονται στο στερεοσκόπιο.

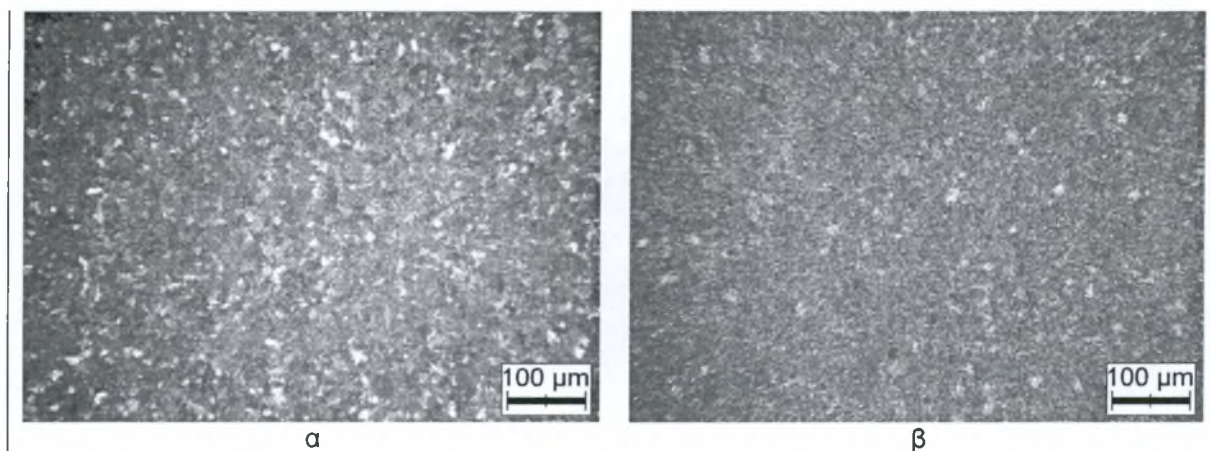
Η επιφάνεια του δοκιμίου E4(02) παρουσιάζει στο μεγαλύτερο μέρος της την όψη του σχήματος 5.3.α υπάρχει δηλαδή αραιή σημειακή προσβολή. Υπάρχουν όμως και περιοχές όπως αυτές στο σχήμα 5.3.β που αντιπροσωπεύουν σημεία όπου υπήρχαν εξ αρχής κάποιες επιφανειακές ατέλειες (γδαρσίματα). Το διαβρωτικό φαινόμενο εμφανίζεται εντονότερο στις περιοχές αυτές προφανώς επειδή είναι αυτά ακριβώς τα σημεία απ' όπου ξεκίνησε η διαβρωτική δράση.



Σχήμα 5.3: Στερεοσκοπική εξέταση του δοκιμίου E4(02). (α) αραιή σημειακή προσβολή, (β) έντονη προσβολή στις επιφανειακές ατέλειες.

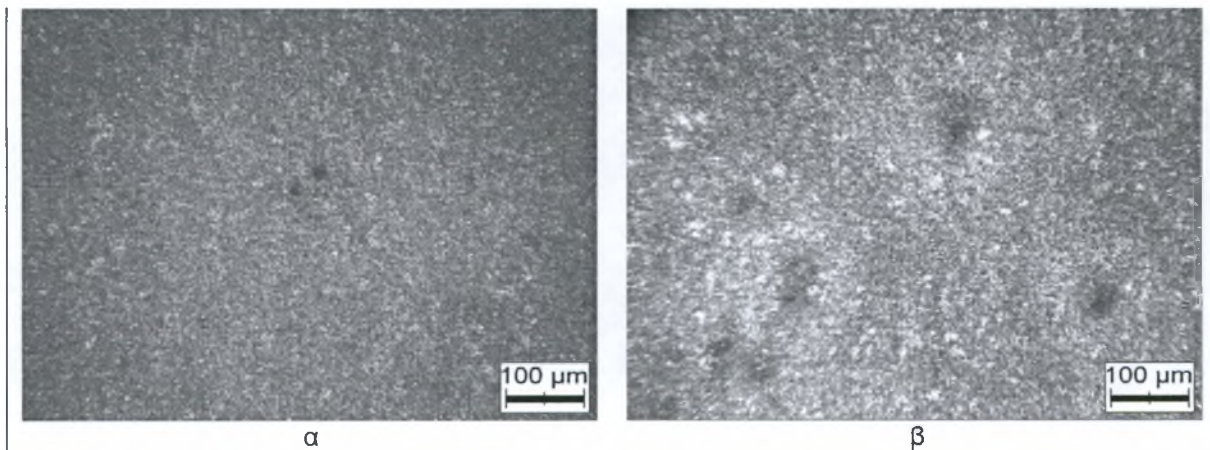
Τα επόμενα δύο δοκίμια, E4(24) και E4(30), η διαβρωτική προσβολή δεν είναι σημειακή, έχει καλύψει ομοιόμορφα την επιφάνεια των δοκιμών (σχήμα 5.4) χωρίς όμως να

υπάρχουν ενδείξεις τρηματικής διάβρωσης παρά μόνο σε μεμονωμένες περιοχές του E4(30) (σχήμα 5.5.α).



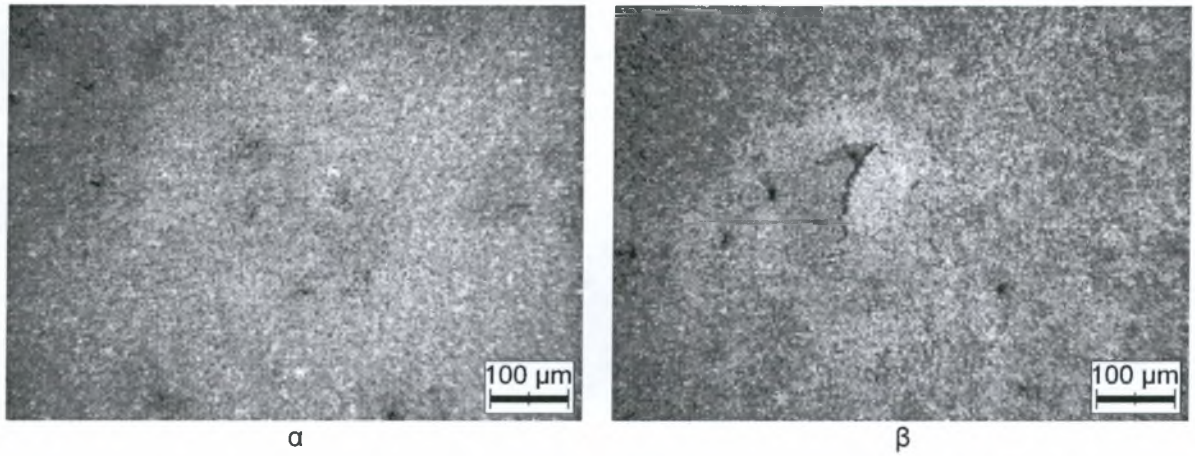
Σχήμα 5.4: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E4(24) και E4(30), ομοιόμορφη προσβολή της επιφάνειας. (α) δοκίμιο E4(24), (β) δοκίμιο E4(30).

Αντιθέτως, στο επόμενο δοκίμιο E4(36) (σχήμα 5.5.β), υπάρχουν εμφανή τρήματα ομοιόμορφα κατανομημένα στην επιφάνεια του δοκιμίου.



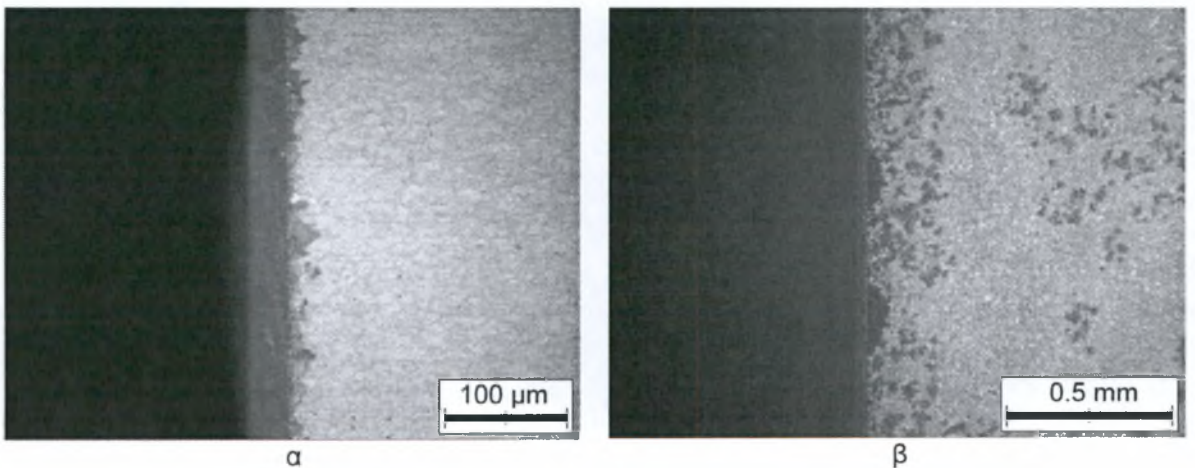
Σχήμα 5.5: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E4(30) και E4(36), τρηματική διάβρωση. (α) δοκίμιο E4(30), περιοχές με τρήματα, (β) δοκίμιο E4(36), ομοιόμορφη κατανομή των τρημάτων.

Τα επόμενα δύο δοκίμια, E4(48) και E4(96) (σχήμα 5.6), εμφανίζουν στο μεγαλύτερο εύρος της επιφάνειάς τους διάβρωση αποφλοίωσης.



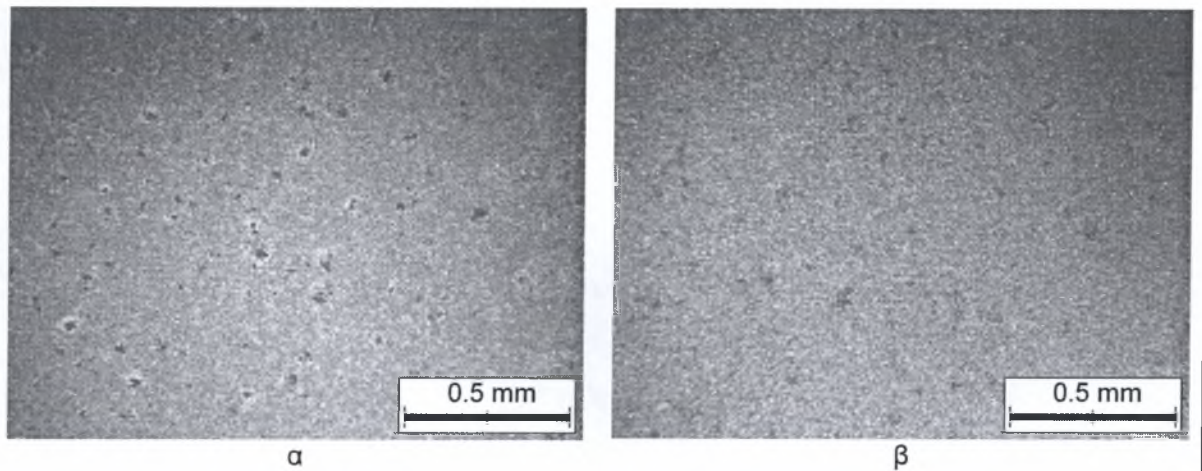
Σχήμα 5.6: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E4(48) και E4(96), διάβρωση αποφλοίωσης. (α) δοκίμιο E4(48), (β) δοκίμιο E4(96).

Τέλος αξίζει να σημειωθεί η έντονη, συγκριτικά με την υπόλοιπη επιφάνεια, προσβολή της μιας μόνο ακμής των δοκιμίων E4(30), E4(36), E4(48) (σχήμα 5.7.β) και E4(96) εν αντιθέσει με το δοκίμιο E4(02) (σχήμα 5.7.α) του οποίου και οι τέσσερις ακμές είχαν τον ίδιο βαθμό προσβολής, η οποία ήταν εντονότερη από την υπόλοιπη επιφάνεια του δοκιμίου.



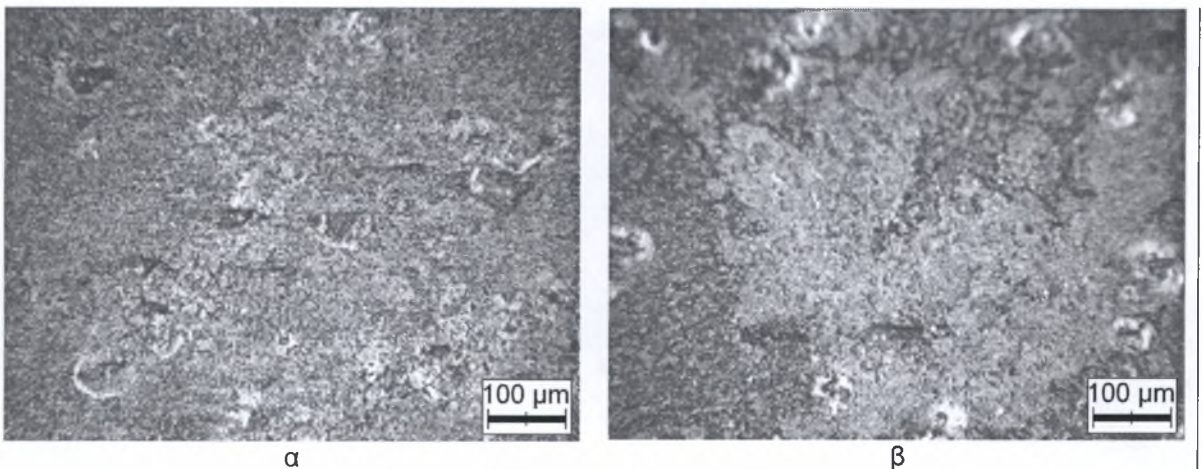
Σχήμα 5.7: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E4(02) και E4(48), έντονη προσβολή των ακμών. (α) δοκίμιο E4(02), (β) δοκίμιο E4(48).

Στο σχήματα 5.8 και 5.9 φαίνονται χαρακτηριστικές λεπτομέρειες της στερεοσκοπίας των δοκιμίων E1 (chromic stripe) και E2 (sulfuric stripe). Τα δοκίμια E1(48) και E2(48) (σχήμα 5.8) δεν φαίνεται να έχουν υποστεί τόσο έντονη τρημματική διάβρωση όσο και το δοκίμιο E4(36) παρόλο που είχαν μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα.



Σχήμα 5.8: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E1(48) και E2(48), τρημματική διάβρωση (:). (α) δοκίμιο E1(48), (β) δοκίμιο E2(48).

Αντιθέτως η κατάσταση της επιφάνειας των δοκιμίων E1(96) και E2(96) (σχήμα 5.9) είναι παρόμοια με αυτή του δοκιμίου E4(96), είναι εμφανής η διάβρωση αποφλοιώσης.



Σχήμα 5.9: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων E1(96) και E2(96), διάβρωση αποφλοιώσης, (α) δοκίμιο E1(96), (β) δοκίμιο E2(96).

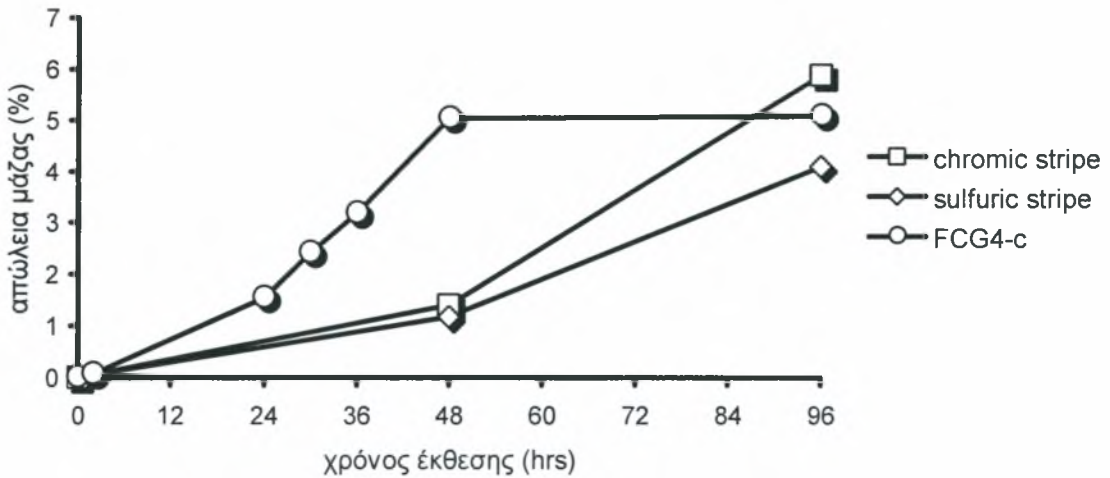
Στα δοκίμια των δύο stripes η διαβρωτική δράση εμφανίζεται εντονότερη σε αυτά που έχουν προέλθει από το stripe με τη χρωμική ανοδίωση, δοκίμια E1, συγκριτικά με τα δοκίμια E2. Περισσότερες λεπτομέρειες της στερεοσκοπικής εξέτασης των δοκιμίων EXCO υπάρχουν στο παράρτημα Γ.

5.2.3 Απώλεια μάζας, μεταβολή οξύτητας και ρυθμός διάβρωσης.

Την στερεοσκοπική εξέταση του κάθε δοκιμίου ακολούθησε η ζύγισή του, η μέτρηση του τελικού pH του διαλύματος και ο υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης. Η ζύγιση των δοκιμίων έγινε με ζυγαριά *Electronic Balance, Libror EB-430D, Shimadzu Corporation*

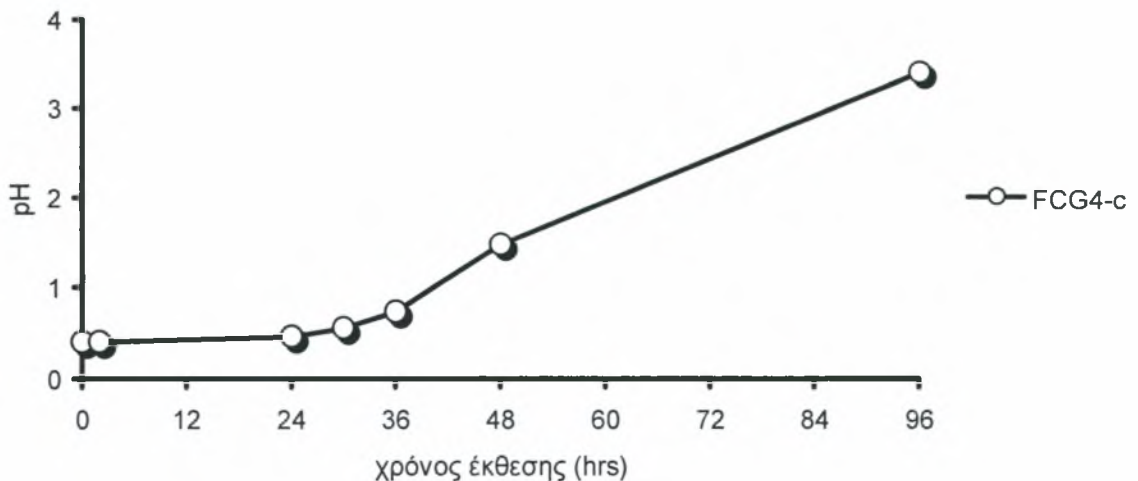
ακρίβειας 0.001 g και η μέτρηση της οξύτητας του διαλύματος με συσκευή *Consort C231 Electrochemical Multimeter*.

Στο σχήμα 5.10 φαίνεται η επί τοις εκατό απώλεια μάζας του υλικού σε συνάρτηση με τον χρόνο παραμονής στο διαβρωτικό διάλυμα. Οι τρεις καμπύλες αντιστοιχούν στο stripe με τη χρωμική ανοδίωση, δοκίμια E1, το stripe με τη θειική ανοδίωση, δοκίμια E2, και στο plate FCG4-c (δοκίμια E4).



Σχήμα 5.10: Επί τοις εκατό απώλεια βάρους των δοκιμών EXCO συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.

Το σχήμα 5.11 δείχνει την τιμή του pH του διαλύματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης του υλικού FCG4-c (δοκίμια E4). Δυστυχώς δεν υπάρχουν οι αντίστοιχες τιμές για τα δύο stripes (δοκίμια E1 και E2).



Σχήμα 5.11: Μεταβολή του pH του διαβρωτικού διαλύματος για τα δοκίμια E4.

Παρατηρεί κανείς ότι οι δύο καμπύλες που αφορούν το FCG4-c (δοκίμια E4) αποτελούνται από τέσσερα μέρη, αυτά ανάμεσα στις 2 έως 24, 24 έως 36, 36 έως 48 και 48 έως 96 ώρες, με παρόμοια συμπεριφορά ως προς την κλίση τους στα αντίστοιχα διαστήματα. Όσον αφορά τις δύο καμπύλες των stripes (δοκίμια E1 και E2) για την απώλεια μάζας βλέπουμε πως έχουν μεταξύ τους όμοια συμπεριφορά με το διαβρωτικό φαινόμενο να εμφανίζεται εντονότερο στο stripe με τη χρωμική ανοδίωση. Αξιοσημείωτη είναι η καθυστέρηση της διαβρωτικής διαδικασίας σε σχέση με το FCG4-c. Τα δοκίμια των stripes που έμειναν στο διάλυμα για δύο μέρες, E1(48) και E2(48), φαίνονται να έχουν μικρότερη απώλεια μάζας απ' το δοκίμιο E4(24) που έμεινε στο διαβρωτικό διάλυμα για μια μόλις ημέρα.

Τα ακριβή αριθμητικά δεδομένα των δύο διαγραμμάτων φαίνονται στους πίνακες 5.1 και 5.2, όπου W_{in} και W_{out} είναι το αρχικό και το τελικό βάρος του κάθε δοκιμίου αντίστοιχα και pH_{in} και pH_{out} είναι η αρχική και η τελική τιμή pH του διαβρωτικού διαλύματος.

Πίνακας 5.1: Απώλεια βάρους των δοκιμίων E1 και E2.

Δοκίμιο	W_{in} (g)	W_{out} (g)	% απώλεια
E1(48)	12.79	12.61	1.41
E1(96)	13.09	12.32	5.88
E2(48)	13.65	13.49	1.17
E2(96)	13.42	12.87	4.10

Πίνακας 5.2: Απώλεια βάρους και τιμές pH του διαλύματος για τα δοκίμια E4.

Δοκίμιο	W_{in} (g)	W_{out} (g)	απώλεια (%)	pH_{in}	pH_{out}
E4(02)	16.31	16.30	0,06	0,37	0.40
E4(24)	16.19	15.94	1.54	0,41	0.46
E4(30)	15.834	15.452	2.41	0.42	0.55
E4(36)	16.023	15.513	3.18	0,50	0.73
E4(48)	16.09	15.28	5.03	0,47	1.47
E4(96)	16.13	15.31	5.08	0,50	3.39

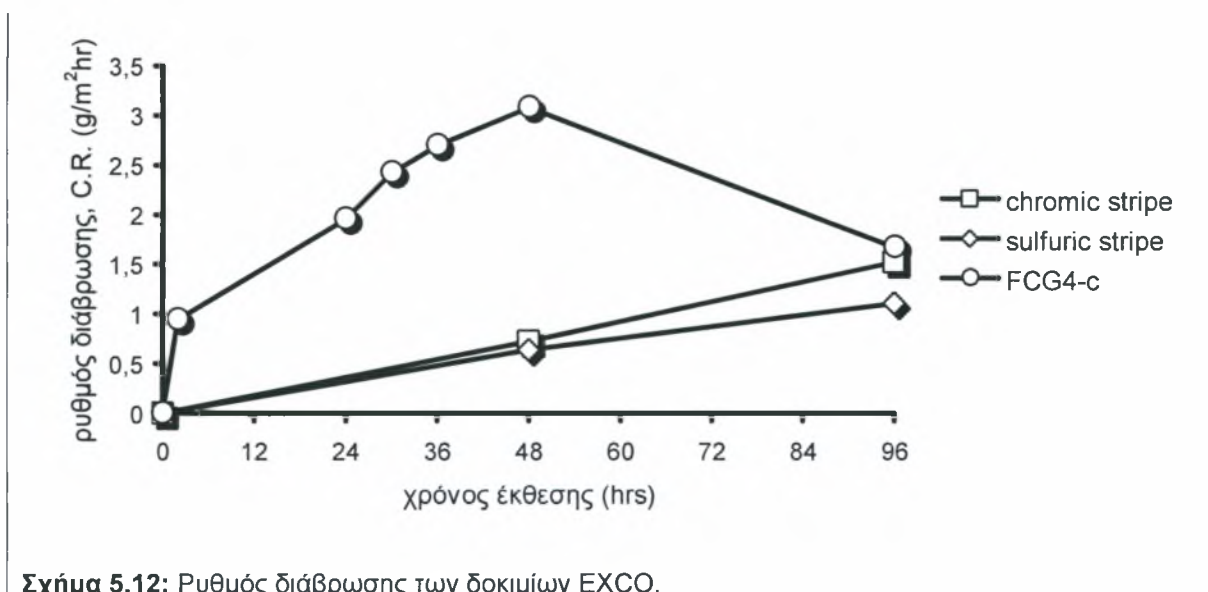
Ο ρυθμός διάβρωσης (corrosion rate, C.R.) υπολογίζεται από τον τύπο:
 $C.R. = (K \times W) / (A \times t \times D)$ [1], όπου:

- K = σταθερά, $K = 1.00 \times 10^4 \times D$ ώστε οι μονάδες του ρυθμού διάβρωσης να είναι γραμμάρια ανά τετραγωνικό μέτρο και ώρα ($g/m^2 \text{hr}$).
- W = η απώλεια μάζας του δοκιμίου σε γραμμάρια (g).
- A = η εκτιθέμενη στο διάλυμα επιφάνεια σε τετραγωνικά εκατοστά (cm^2).
- t = ο χρόνος έκθεσης σε ώρες (hr).
- D = η πυκνότητα του υλικού σε γραμμάρια ανά κυβικό εκατοστό (g/cm^3).

Στον πίνακα 5.3 φαίνονται τα παραπάνω στοιχεία για τα δοκίμια EXCO. Το σχήμα 5.12 απεικονίζει τον ρυθμό διάβρωσης των υλικών με την κάθε καμπύλη να σχηματίζεται από δεδομένα δοκιμών του ίδιου υλικού.

Πίνακας 5.3: Μεταβολή βάρους, επιφάνεια έκθεσης, χρόνος έκθεσης και ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών EXCO.

Δοκίμιο	ΔW (g)	A (cm ²)	t (hr)	C.R. (g/m ² hr)
E1(48)	0.18	51.179	48	0.719
E1(96)	0.77	52.689	96	1.522
E2(48)	0.16	52.563	48	0.634
E2(96)	0.55	51.875	96	1.104
E4(02)	0.01	53.259	2	0.939
E4(24)	0.25	53.229	24	1.957
E4(30)	0.382	52.584	30	2.422
E4(36)	0.51	52.584	36	2.694
E4(48)	0.78	52.781	48	3.079
E4(96)	0.85	52.975	96	1.671



Σχήμα 5.12: Ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών EXCO.

Η καμπύλη του ρυθμού διάβρωσης του FCG4-c παρουσιάζει ένα μέγιστο στο μέσο του συνολικού χρόνου έκθεσης. Αυτό σημαίνει ότι το δοκίμιο E4(48) είναι αυτό που είχε τη μεγαλύτερη απώλεια βάρους αναλογικά με το χρόνο παραμονής του στο διαβρωτικό περιβάλλον. Όπως και στο σχήμα 5.10 (% απώλεια μάζας) έτσι και εδώ παρατηρείται μια καθυστέρηση του διαβρωτικού φαινομένου στα δύο stripes σε σχέση με το FCG4-c. Οι καμπύλες των stripes είναι μονότονα αύξουσες, αυτό όμως ίσως να οφείλεται στον

περιορισμένο αριθμό δοκιμίων. Η μορφή των παραπάνω καμπύλων δεν είναι ακριβής -αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με την εξέταση μεγάλου αριθμού δοκιμίων με ενδιάμεσους χρόνους έκθεσης- είναι όμως απόλυτα αντιπροσωπευτική.

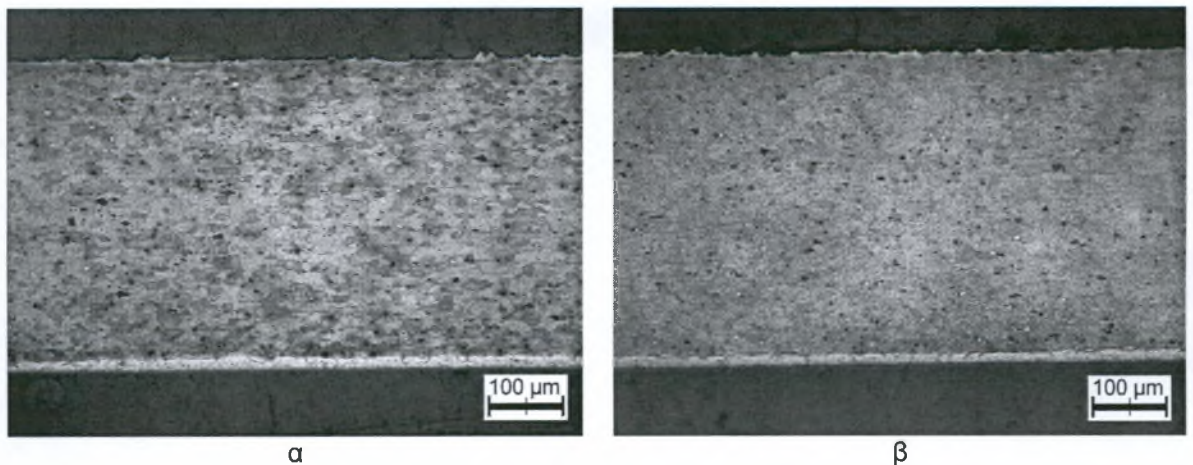
5.2.4 Οπτικός έλεγχος μεταλλογραφικών τομών.

Στη συνέχεια από το κάθε δοκίμιο κόπηκαν και προετοιμάστηκαν δύο μεταλλογραφικά δοκίμια, ένα κατά τον διαμήκη και ένα κατά τον εγκάρσιο άξονα της διεύθυνσης έλασης ώστε να διερευνηθεί και αν υπάρχει επιρροή της κατευθυντικότητας στη διαβρωτική προσβολή. Η προετοιμασία των μεταλλογραφικών δοκιμίων έγινε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 4.3.3. Τα δοκίμια αυτά παρατηρήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο.

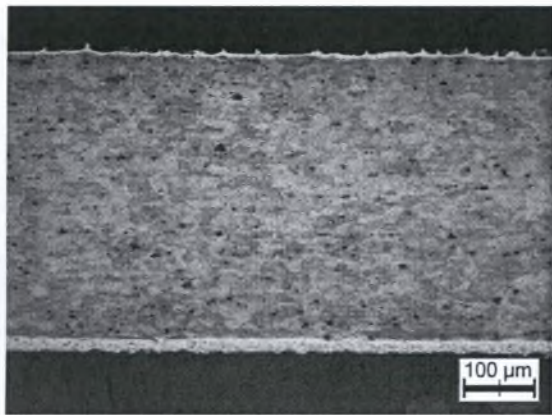
Το οπτικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα *Leica Aristomet* με δυνατότητα μεγέθυνσης από $\times 50$ έως $\times 1000$ φορές και οι φωτογραφίες προέρχονται από ψηφιακή φωτογραφική μηχανή *Leica DC 300*. Χαρακτηριστικές λεπτομέρειες της οπτικής μικροσκοπίας των δοκιμίων δίνονται στα σχήματα 5.13 έως 5.26.

Η μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων στο οπτικό μικροσκόπιο είναι σε συμφωνία με τα ως τώρα αποτελέσματα. Τα σχήματα 5.13 έως 5.16 δείχνουν χαρακτηριστικές περιοχές των δοκιμίων E1 και E2. Στα επόμενα σχήματα, 5.17 έως 5.22 υπάρχουν αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των δοκιμίων E4 όπου φαίνεται η εξέλιξη της διαβρωτικής διεργασίας. Τέλος, στα σχήματα, 5.23 έως 5.26, υπάρχουν συγκεκριμένες λεπτομέρειες διαφόρων δοκιμίων όπως η προσβολή των εκτεθειμένων άκρων, η προσβολή της διεπιφάνειας αλουμινίου/ργεργεγ και ο μηχανισμός προσβολής.

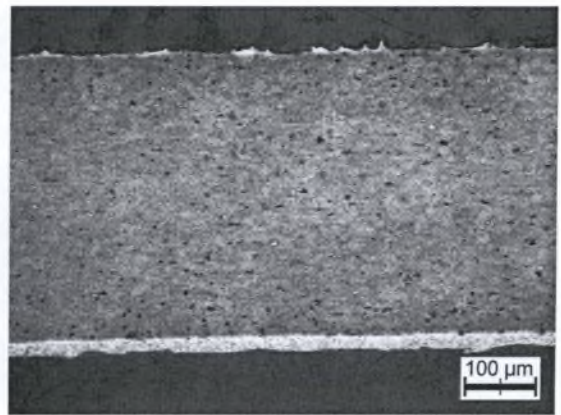
Στα δοκίμια E1(48) και E2(48) (σχήματα 5.13 και 5.14) παρατηρείται προσβολή και ομοιόμορφη καταστροφή της επιφανειακής προστασίας (ανοδίωση). Η καταστροφή είναι ελαφρώς πιο έντονη στο δοκίμιο με τη χρωμική ανοδίωση (E1).



Σχήμα 5.13: Δοκίμιο E1(48), προσβολή της επιφανειακής προστασίας. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.



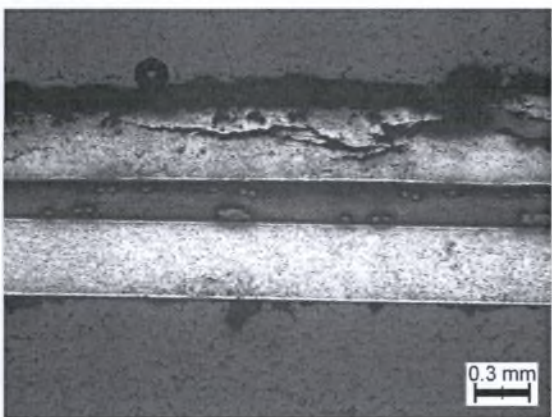
α



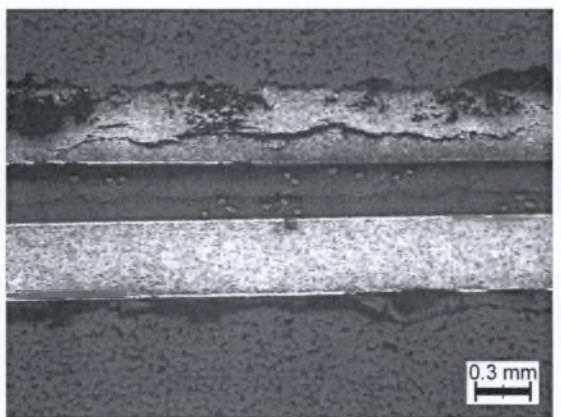
β

Σχήμα 5.14: Δοκίμιο E2(48), προσβολή της επιφανειακής προστασίας. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.

Τα σχήματα 5.15 και 5.16 αντιπροσωπεύουν την γενική εικόνα των δοκιμίων E1(96) και E2(96). Υπήρχαν επίσης περιοχές όπου είχαν αποκολληθεί «φλοίδες» αλουμινίου από τη διαβρωμένη επιφάνεια. Τέλος άξια προσοχής είναι η αποκόλληση του αλουμινίου από το prepreg στο δοκίμιο E2(96) (σχήμα 5.16.β).

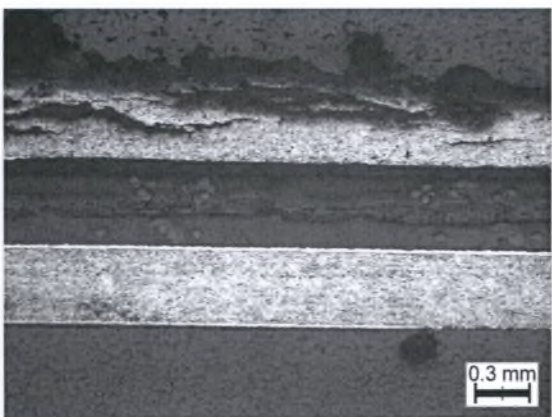


α

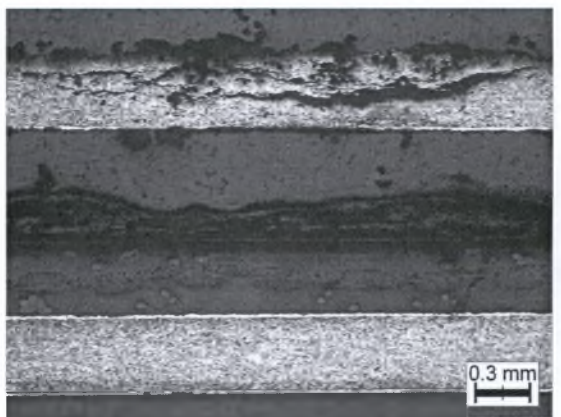


β

Σχήμα 5.15: Δοκίμιο E1(96), διάβρωση αποφλοιώσης. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.



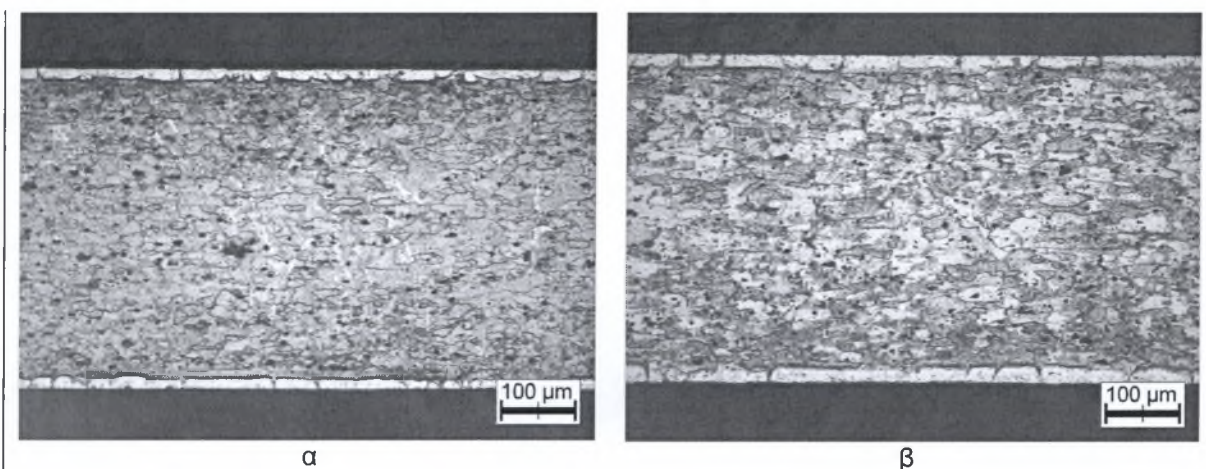
α



β

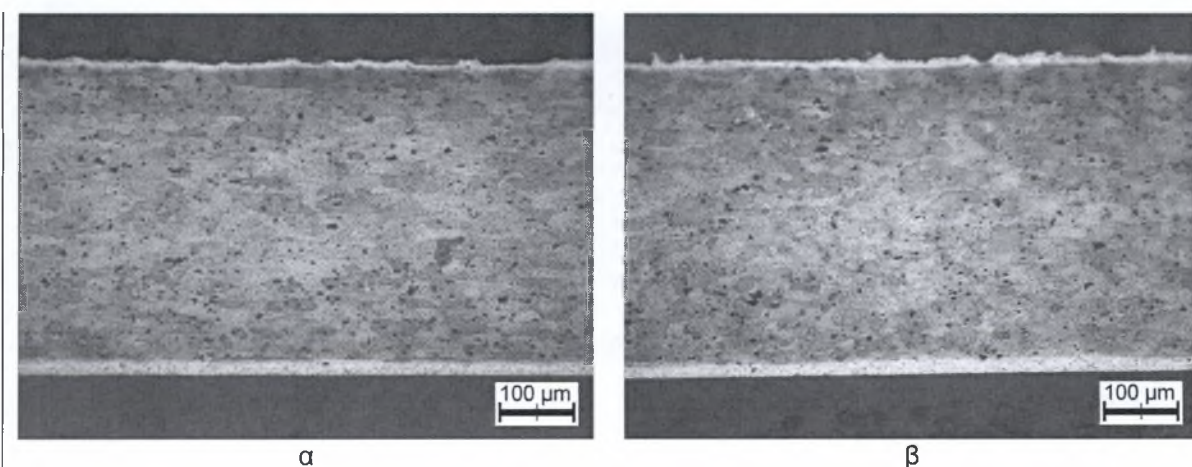
Σχήμα 5.16: Δοκίμιο E2(96), διάβρωση αποφλοιώσης. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.

Το σχήμα 5.17 δείχνει πως το δοκίμιο E4(02) είναι ανεπηρέαστο από το διαβρωτικό περιβάλλον, είναι δύσκολο να ξεχωρίσει κανείς την διαβρωμένη από την καθαρή πλευρά.



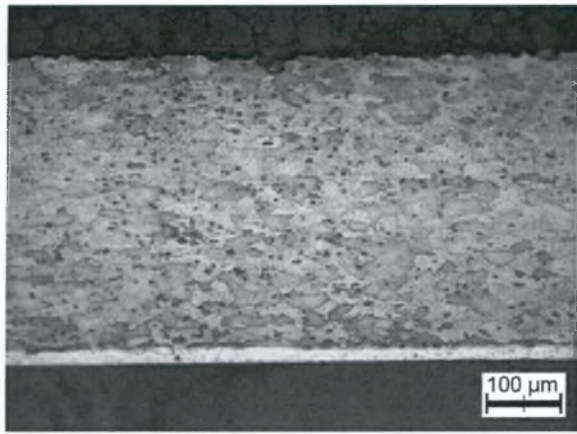
Σχήμα 5.17: Δοκίμιο E4(02), σχεδόν απρόσβλητη επιφάνεια. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.

Ομοιόμορφη καταστροφή της χρωμικής ανοδίσωσης παρατηρείται στο δοκίμιο E4(24), (σχήμα 5.18), σε μικρότερο βαθμό όμως από τα δοκίμια E1(48) και E2(48) στα οποία έχει καταναλωθεί σχεδόν σε όλο της το πάχος η επιφανειακή προστασία.

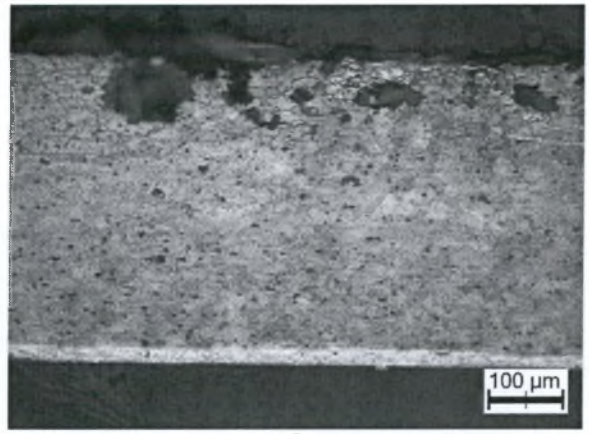


Σχήμα 5.18: Δοκίμιο E4(24), ομοιόμορφη προσβολή της επιφανειακής προστασίας. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.

Αντίθετα στο δοκίμιο E4(30) (σχήμα 5.19) έχει καταναλωθεί πλήρως το στρώμα της χρωμικής ανοδίσωσης στην επιφάνεια του αλουμινίου. Επίσης υπάρχει ένα πολύ μικρό μέρος της επιφάνειας κοντά σε μια ακμή του δοκιμίου όπου εμφανίζεται τρηματική διάβρωση (σχήμα 5.19.β).



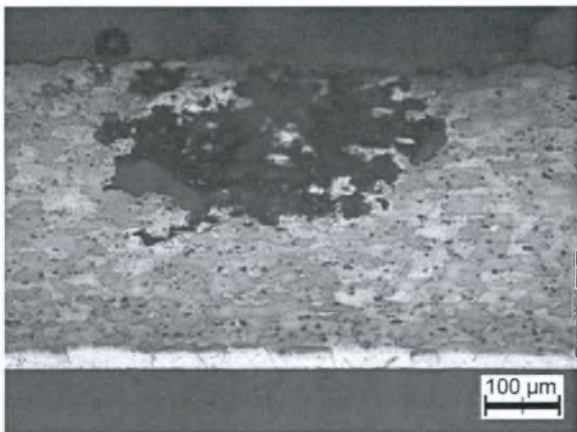
α



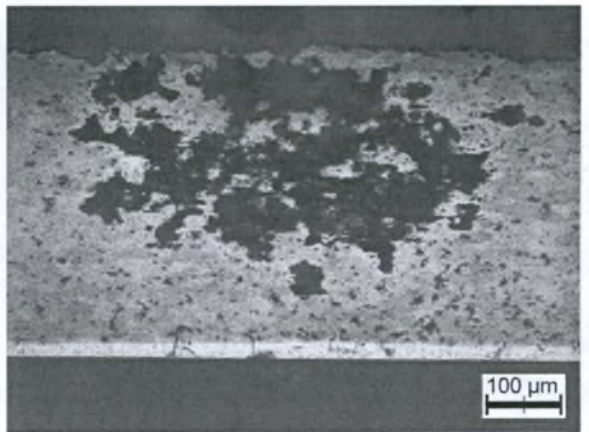
β

Σχήμα 5.19: Δοκίμιο E4(30), ολοκληρωτική προσβολή της επιφανειακής προστασίας. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.

Το δοκίμιο E4(36) (σχήμα 5.20) παρουσιάζει έντονη τρημματική διάβρωση. Σε πολλά σημεία της επιφάνειας έχει ξεκινήσει η διαβρωτική δράση κάτω από αυτή (σχήμα 5.20.α). Εξελίσσεται πλέον παράλληλα με την εξωτερική επιφάνεια δίνοντας το έναυσμα για διάβρωση αποφλοίωσης.



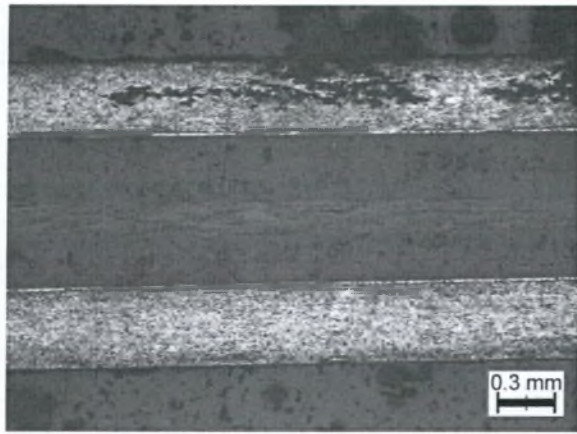
α



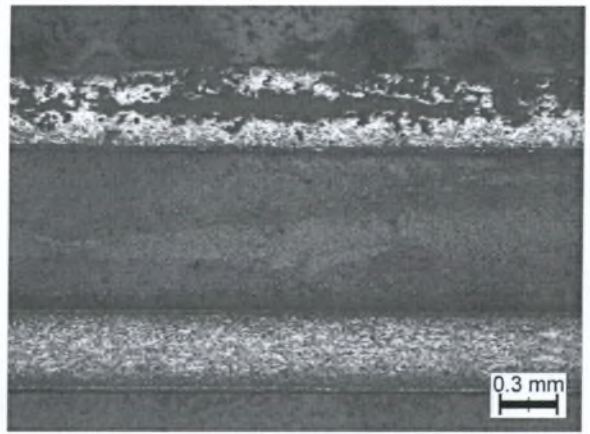
β

Σχήμα 5.20: Δοκίμιο E4(36), έντονη τρημματική διάβρωση. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.

Στα δοκίμια E4(48) και E4(96) παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με περιοχές όπου γειτονικά τρήματα έχουν αρχίσει να ενώνονται κάτω από την επιφάνεια του υλικού δίνοντας τα πρώτα στάδια της διάβρωσης αποφλοίωσης (σχήμα 5.21.α) και περιοχές με περισσότερο έντονα τα σημάδια της αποφλοίωσης (σχήματα 5.21.β και 5.22).

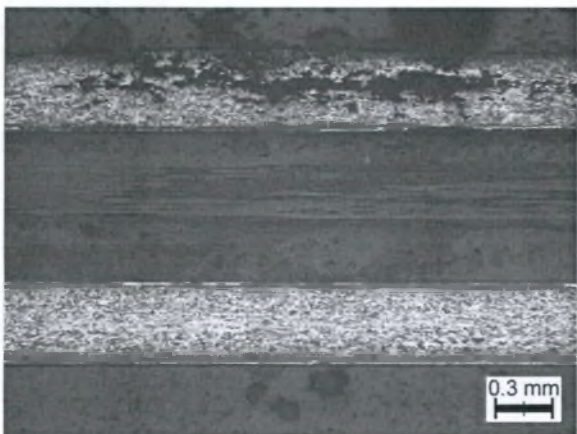


α

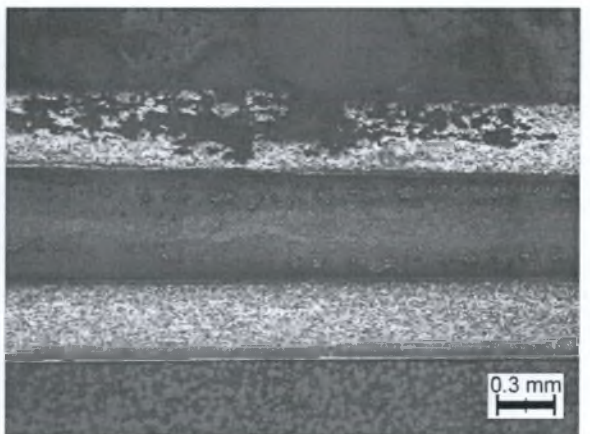


β

Σχήμα 5.21: Δοκίμιο E4(48), περιοχές με διάβρωση αποφλοίωσης σε αρχικό και προχωρημένο στάδιο. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.



α

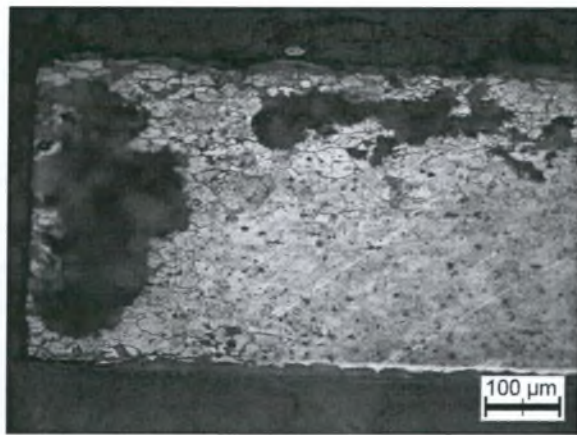


β

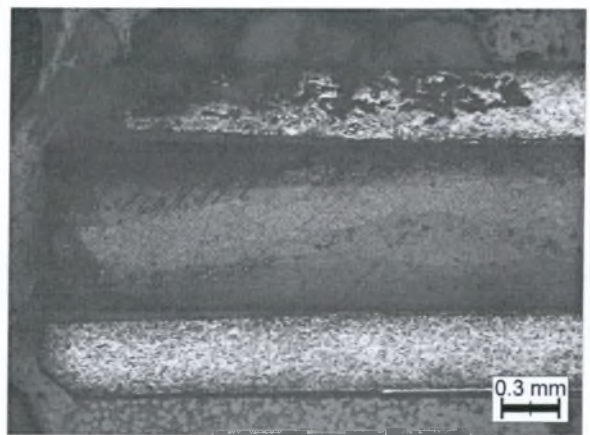
Σχήμα 5.22: Δοκίμιο E4(96), διάβρωση αποφλοίωσης. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.

Η διαβρωτική προσβολή εμφανίζεται ελαφρώς πιο έντονη στο δοκίμιο E4(96) με περισσότερες περιοχές αποφλοίωσης, κάτι που δικαιολογεί και την μεγαλύτερη ποσοστιαία απώλεια μάζας του E4(96) συγκριτικά με το E4(48).

Εκτός από τις επιμέρους παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω χρειάζεται να σημειωθούν τα εξής. Καταρχήν σε όλα τα δοκίμια παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ της εγκάρσιας και της διαμήκουσ τομής. Επίσης σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκε έντονη προσβολή στα άκρα τους καθώς και κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prepreg (σχήμα 5.23).



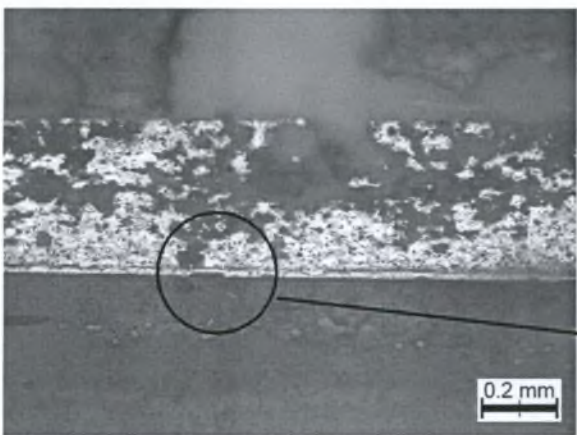
α



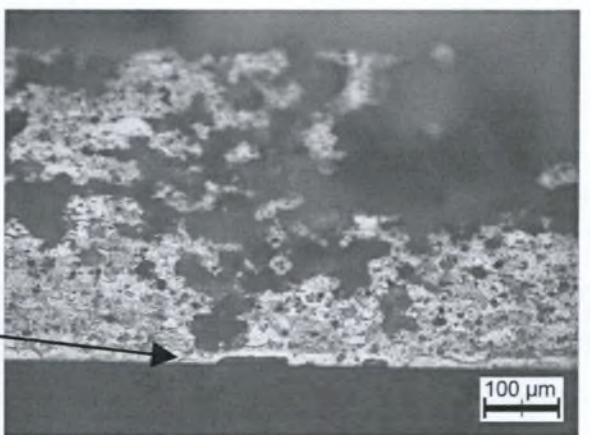
β

Σχήμα 5.23: Έντονη διάβρωση στα άκρα των δοκιμίων και κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης στη διεπιφάνεια αλουμινίου/epreg. (α) δοκίμιο E4(30), (β) δοκίμιο E4(48).

Επιπλέον κατανάλωση της ανοδίσωσης στην εσωτερική πλευρά του αλουμινίου παρατηρήθηκε στα έντονα διαβρωμένα δοκίμια στα σημεία όπου η προσβολή είχε διεισδύσει σε όλο το πάχος των φύλλων αλουμινίου (σχήμα 5.24).



α



β

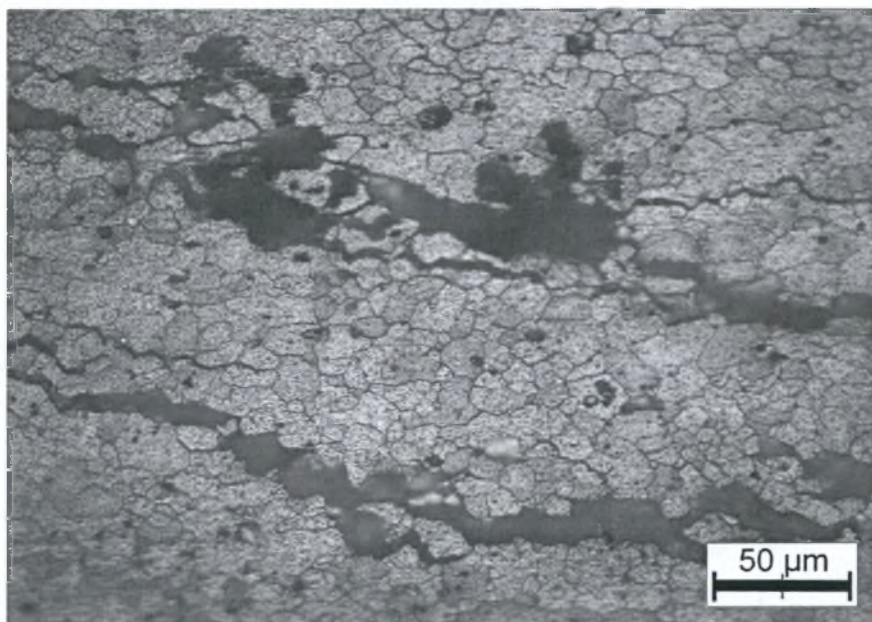
Σχήμα 5.24: Κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης στην εσωτερική πλευρά του αλουμινίου, δοκίμιο E4(96). (α) μεγέθυνση x100, (β) x200.

Η επαφή του διαβρωτικού διαλύματος με τη χρωμική ανοδίσωση στο εσωτερικό του υλικού περιορίζει το ρυθμό διάβρωσης του κυρίως υλικού. Η συνέχιση της καταστροφής της όμως θα έχει σαν αποτέλεσμα να ξεκολλήσουν τα φύλλα του αλουμινίου από το σύνθετο στρώμα ρητίνης ινών (delamination). Χαρακτηριστικό ήταν το στρώμα adhesive film στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου E4(48) το οποίο κατά τη διάρκεια της δοκιμής αποκολλήθηκε.

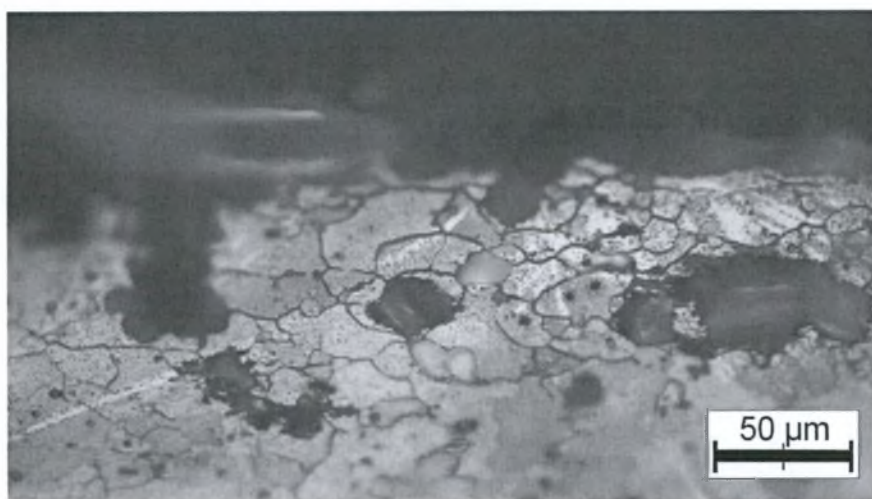
Τέλος σε κανένα από τα δοκίμια δεν υπήρξε επίδραση της διαβρωτικής διαδικασίας στα φύλλα αλουμινίου που είχαν καλυφθεί με προστατευτικό αυτοκόλλητο. Ακόμα και στα

δοκίμια στα οποία η διαβρωτική δράση είχε εισχωρήσει μέχρι το prepreg τα καλυμμένα φύλλα αλουμινίου ήταν άθικτα πέρα από τις άκρες τους που ήταν εκτεθειμένες στο διάλυμα. Αυτό επιβεβαιώνει τη δράση των ενδιάμεσων στρωμάτων σαν φράγματα της διάβρωσης.

Απ' την προσεκτικότερη εξέταση και σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις των δοκιμίων φαίνεται πως η διαβρωτική προσβολή εξελίσσεται κατά κύριο λόγο περικρυσταλλικά (σχήμα 5.25) ακολουθώντας τα όρια των κόκκων ενώ υπήρχαν και περιοχές όπως αυτή του σχήματος 5.26 όπου η διάβρωση φαίνεται να έχει εξελιχθεί στο εσωτερικό των κόκκων.

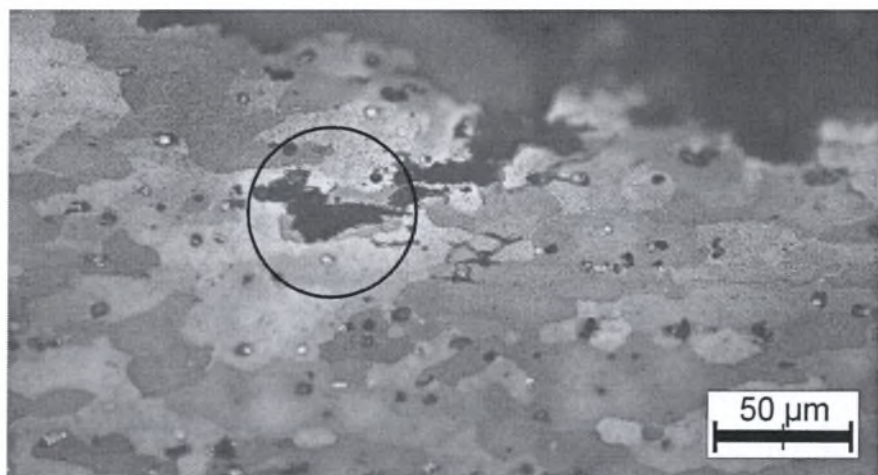


α



β

Σχήμα 5.25: Περικρυσταλλική διάβρωση. (α) Δοκίμιο E1(96), (β) Δοκίμιο E4(30).

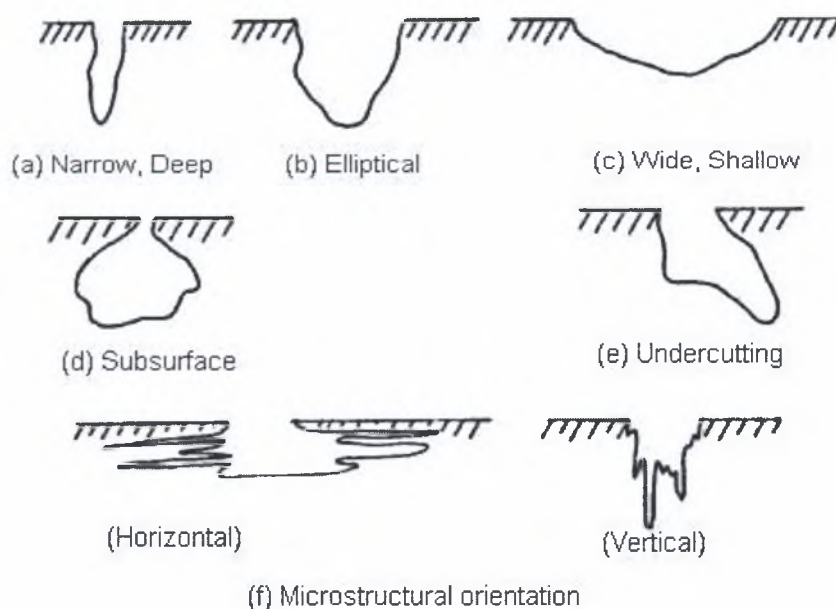


Σχήμα 5.26: Διάβρωση στο εσωτερικό των κόκκων, δοκίμιο E4(36).

Στο παράρτημα Γ υπάρχουν περισσότερες φωτογραφίες της οπτικής μικροσκοπίας των δοκιμίων EXCO.

5.2.5 Χαρακτηρισμός των τρημάτων.
















Τέλος, έγινε περαιτέρω εξέταση του δοκιμίου E4(36) για τον χαρακτηρισμό των τρημάτων σύμφωνα με την προδιαγραφή G46. Τρήματα υπήρχαν επίσης στο δοκίμιο E4(30) όμως ήταν περιορισμένα σε ένα μικρό εύρος της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου και για αυτό δεν αξιολογήθηκαν. Τα τρήματα στο δοκίμιο έχουν ένα μικρό άνοιγμα στην επιφάνεια και έχουν εξελιχθεί κατά κανόνα κάτω από αυτή (subsurface) και σε διεύθυνση παράλληλη (horizontal microstructural orientation) (σχήμα 5.27).



Σχήμα 5.27: Διάφορες μορφές του σχήματος της διατομής τρημάτων [2].

Η πυκνότητα των τρημάτων μετρήθηκε 1.47×10^5 τρήματα/ mm^2 . Το μέσο άνοιγμα και το μέσο βάθος των τρημάτων μετρήθηκαν με τη βοήθεια των μεταλλογραφικών δοκιμών και βρέθηκαν 0.09 mm^2 και 0.24 mm αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει πως τα τρήματα ανήκουν στην κατηγορία A-4, B-1, C-1 σύμφωνα με την ταξινόμηση του σχήματος 5.28.

Τέλος ο πίνακας 5.4 περιέχει τον χαρακτηρισμό της επιφάνειας των δοκιμών ο οποίος έγινε σύμφωνα με την περισσότερο προσβεβλημένη επιφάνεια του καθενός όπως ορίζεται στην προδιαγραφή G34. Στον πίνακα βλέπουμε πως χρειάστηκε περισσότερο από μια μέρα για τον σχηματισμό των πρώτων τρημάτων (δοκίμια E4(30) και E4(36)) και πως ήδη από τη μιάμιση μέρα έχει κάνει την εμφάνιση της η διάβρωση αποφλοιώσης (δοκίμια E1(96), E2(96), E4(36), E4(48) και E4(96)). Τέλος, στα δοκίμια E1(48), E2(48), E4(02), E4(24) και E4(30) η διαβρωτική προσβολή περιορίστηκε στην κατανάλωση της επιφανειακής προστασίας (χρωμική ή θειική ανοδίωση).

	<u>A</u> <u>DENSITY</u>	<u>B</u> <u>SIZE</u>	<u>C</u> <u>DEPTH</u>
1	 $2.5 \times 10^3/\text{m}^2$	 0.5 mm^2	 0.4 mm
2	 $1 \times 10^4/\text{m}^2$	 2.0 mm^2	 0.8 mm
3	 $5 \times 10^4/\text{m}^2$	 8.0 mm^2	 1.6 mm
4	 $1 \times 10^5/\text{m}^2$	 12.5 mm^2	 3.2 mm
5	 $5 \times 10^5/\text{m}^2$	 24.5 mm^2	 6.4 mm

Σχήμα 5.28: Τυποποιημένος πίνακας κατάταξης τρημάτων [2].

Πίνακας 5.4: Χαρακτηρισμός της επιφάνειας των δοκιμών EXCO.

Δοκίμιο	Χαρακτηρισμός
E1(48)	N, no appreciable attack
E1(96)	EB, exfoliation corrosion
E2(48)	N, no appreciable attack
E2(96)	EB, exfoliation corrosion
E4(02)	N, no appreciable attack
E4(24)	N, no appreciable attack
E4(30)	N/P, no appreciable attack & pitting corrosion
E4(36)	P/EA, pitting & exfoliation corrosion
E4(48)	EA, exfoliation corrosion
E4(96)	EA, exfoliation corrosion

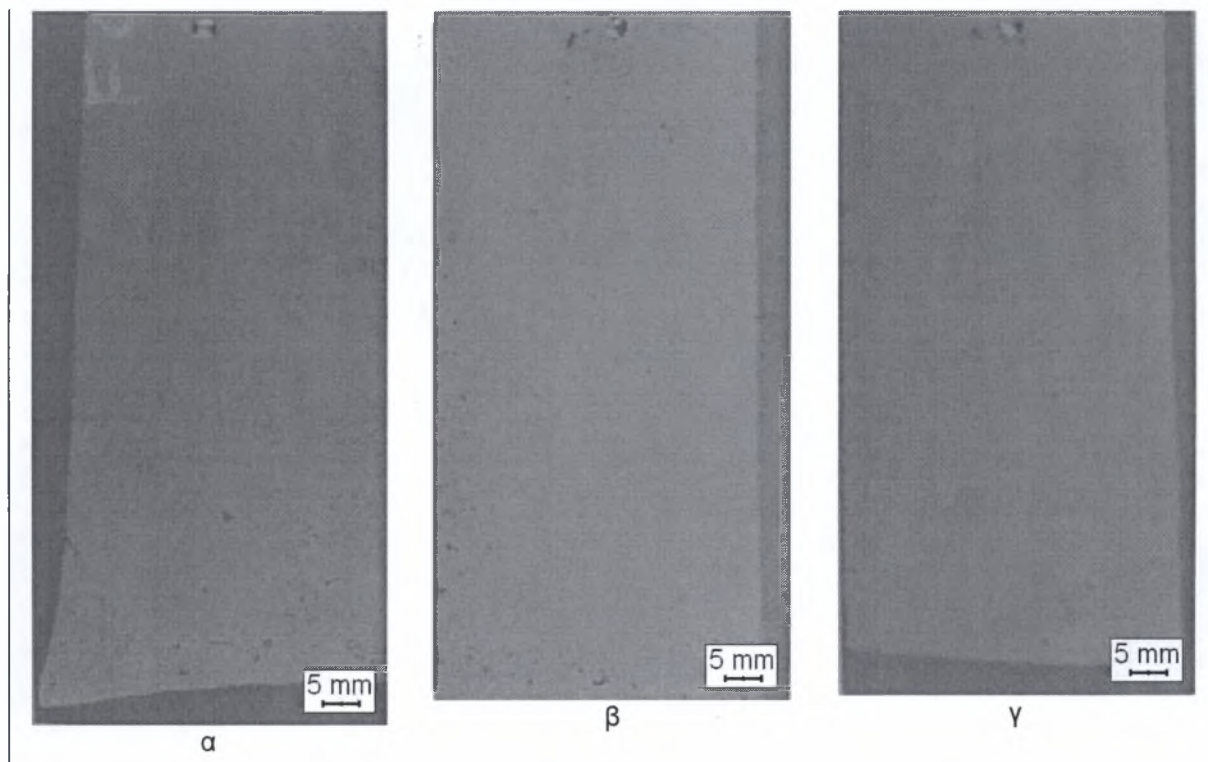
5.3 Αποτελέσματα δοκιμής ΑΙ.

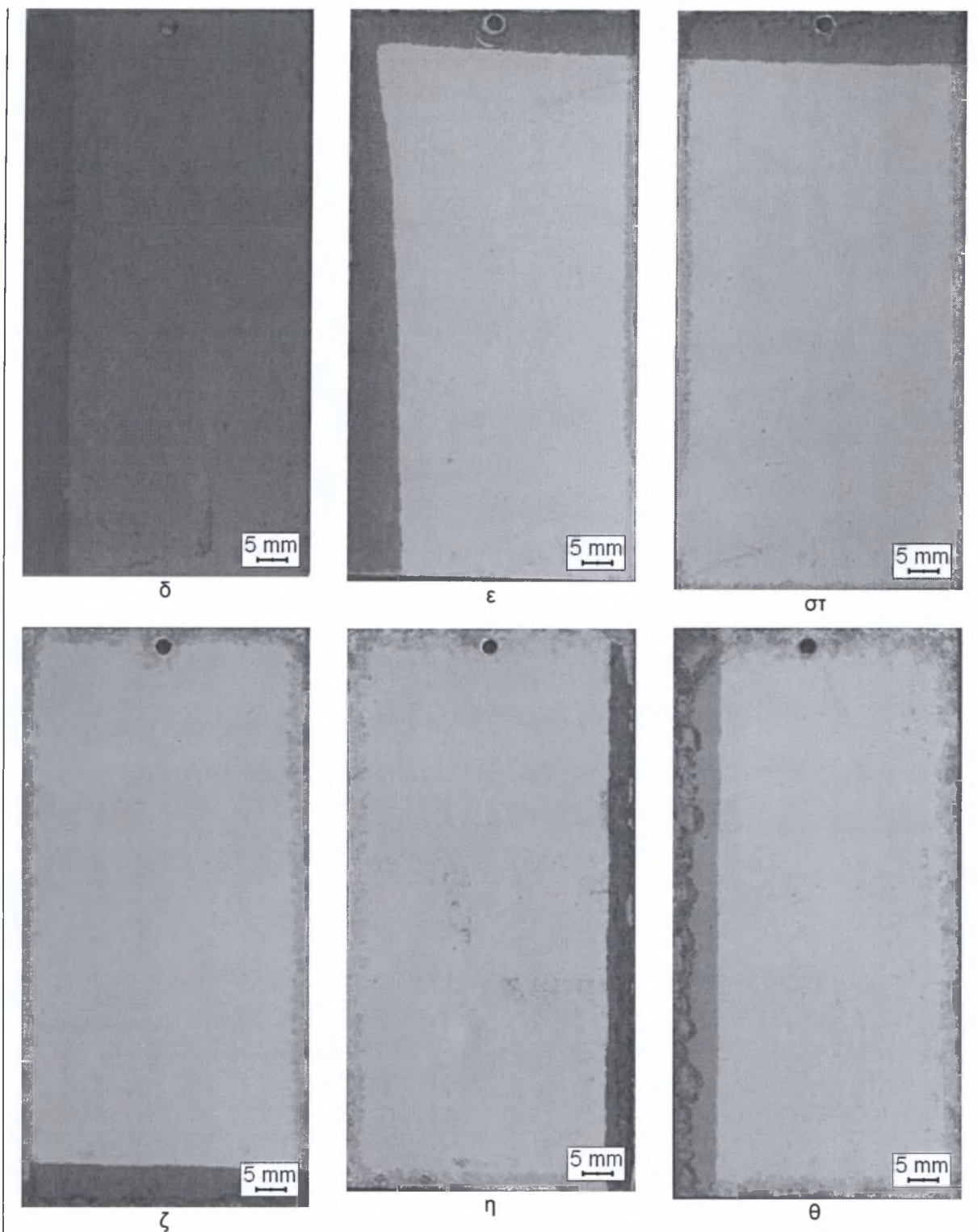
Η διαβρωτική προσβολή στα δοκίμια ΑΙ δεν είναι τόσο έντονη όσο αυτή που προκλήθηκε στα δοκίμια κατά τη δοκιμή ΕΧCΟ. Για το λόγο αυτό τα ποσοτικά αποτελέσματα της δοκιμής ΑΙ περιλαμβάνουν μόνο τις μετρήσεις της απώλειας μάζας των δοκιμίων και του ρυθμού διάβρωσης (corrosion rate). Όπως και στη δοκιμή ΕΧCΟ τα ποιοτικά αποτελέσματα αφορούν τον χαρακτηρισμό της διαβρωμένης επιφάνειας, σύμφωνα με τις οδηγίες και τις φωτογραφίες διαφόρων προδιαγραφών, και του μηχανισμού εξέλιξης της διάβρωσης. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμής ΑΙ με τη σειρά με την οποία εξήχθησαν.

5.3.1 Μακροσκοπική φωτογράφιση.

Κάθε δοκίμιο μετά την εξαγωγή του από το διαβρωτικό διάλυμα φωτογραφήθηκε πριν και μετά τον καθαρισμό του. Επειδή στη δοκιμή ΑΙ και οι δύο επιφάνειες των δοκιμίων εκτίθενται στο διαβρωτικό διάλυμα και προσφέρονται για μελέτη ονομάστηκαν επιφάνεια Ι και επιφάνεια ΙΙ για την ξεχωριστή παρατήρησή τους. Η επιφάνεια Ι ήταν αυτή με τα υπολείμματα ρητίνης (adhesive film) στην άκρη των δοκιμίων.

Το μικρό εύρος της προσβολής των δοκιμίων περιόρισε τον καθαρισμό στην αφαίρεση κυρίως των αλάτων που είχαν παραμείνει στις διαβρωμένες περιοχές (σχήμα 5.31). Στο σχήμα 5.29 φαίνεται η όψη της επιφάνειας Ι των δοκιμίων ΑΙ (FCG2-a) αμέσως μετά τον καθαρισμό τους. Το σχήμα 5.30 δείχνει την όψη των δοκιμίων όταν εξήχθησαν από

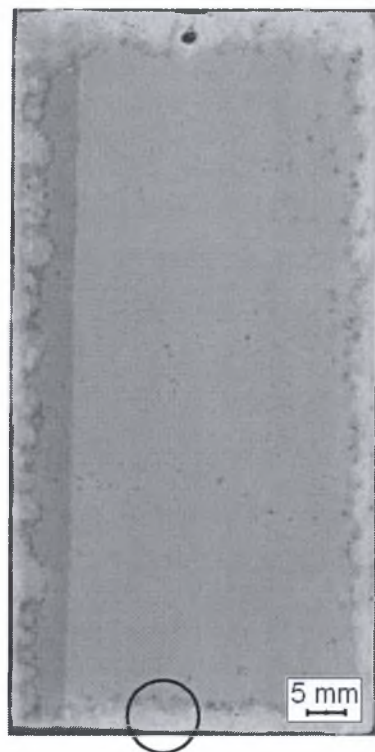




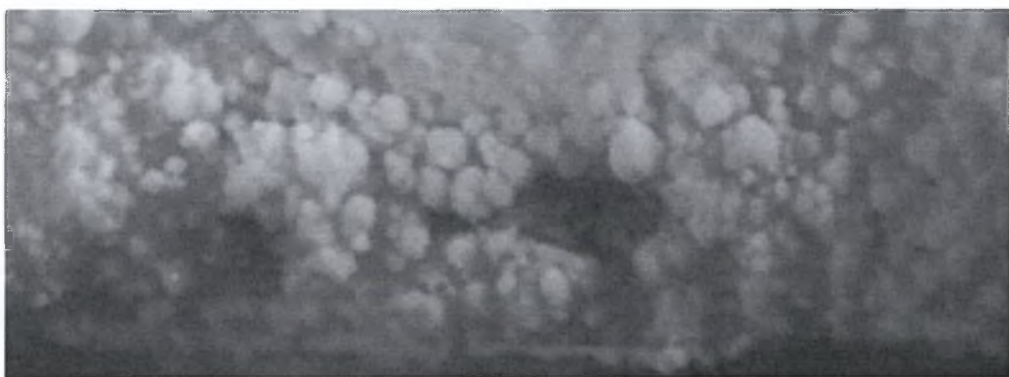
Σχήμα 5.29: Φωτογραφίες των δοκιμίων ΑΙ αμέσως μετά τον καθαρισμό τους, επιφάνεια Ι. (α) ΑΙ(02), (β) ΑΙ(05), (γ) ΑΙ(10), (δ) ΑΙ(15), (ε) ΑΙ(31), (στ) ΑΙ(45), (ζ) ΑΙ(60), (η) ΑΙ(75), (θ) ΑΙ(90).

το διαβρωτικό διάλυμα. Η κατακόρυφη έκθεση των δοκιμίων στο διαβρωτικό διάλυμα είχε σαν αποτέλεσμα την ομοιόμορφη προσβολή των δύο επιφανειών τους οι οποίες, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.2, περιείχαν πολλά χτυπήματα και γδαρσίματα. Το γεγονός

αυτό δεν φάνηκε να επηρεάζει την εξέλιξη της διαβρωτικής προσβολής, η οποία ξεκινάει από τα απροστάτευτα άκρα τους, που ήταν οι ακμές των δοκιμίων και οι οπές που ανοίχτηκαν για την ανάρτησή τους στο διάλυμα. Είναι φανερό πως η διαβρωτική προσβολή είναι ανάλογη του χρόνου έκθεσης. Η κατακόρυφη ανάρτηση των δοκιμίων είναι και ο λόγος που στα δοκίμια με τους μικρότερους χρόνους έκθεσης η κάτω πλευρά τους ήταν λιγότερο προσβεβλημένη από τις υπόλοιπες. Τέλος, μόνο σε λίγες περιπτώσεις υπήρχαν σημάδια διαβρωτικής προσβολής στο εσωτερικό της επιφάνειάς τους. Η προσβολή σε αυτή την περίπτωση ήταν συγκεντρωμένη κοντά στα πιο έντονα επιφανειακά ελαττώματα των δοκιμίων. Στο παράρτημα Δ υπάρχουν φωτογραφίες των δοκιμίων πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής όπου φαίνεται πως τα στίγματα που υπάρχουν στην επιφάνειά τους στο σχήμα 5.29 δεν είναι αποτέλεσμα της διαβρωτικής δράσης αλλά προϋπήρχαν. Υπάρχουν ακόμα οι αντίστοιχες φωτογραφίες της δεύτερης επιφάνειας των δοκιμίων.

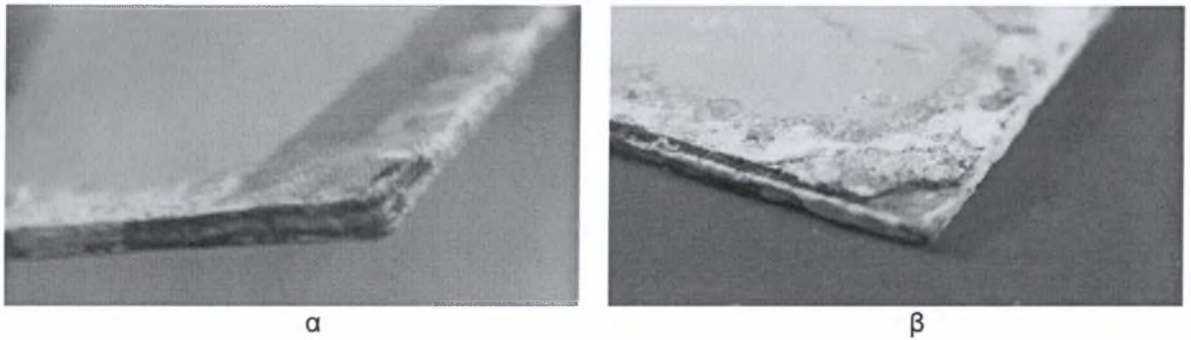


Σχήμα 5.30: Τυπική όψη των δοκιμίων Al αμέσως πριν τον καθαρισμό τους, δοκίμιο Al(90), επιφάνεια I.



Σχήμα 5.31: Κατακράτηση αλάτων στις διαβρωμένες περιοχές, λεπτομέρεια του σχήματος 5.30.

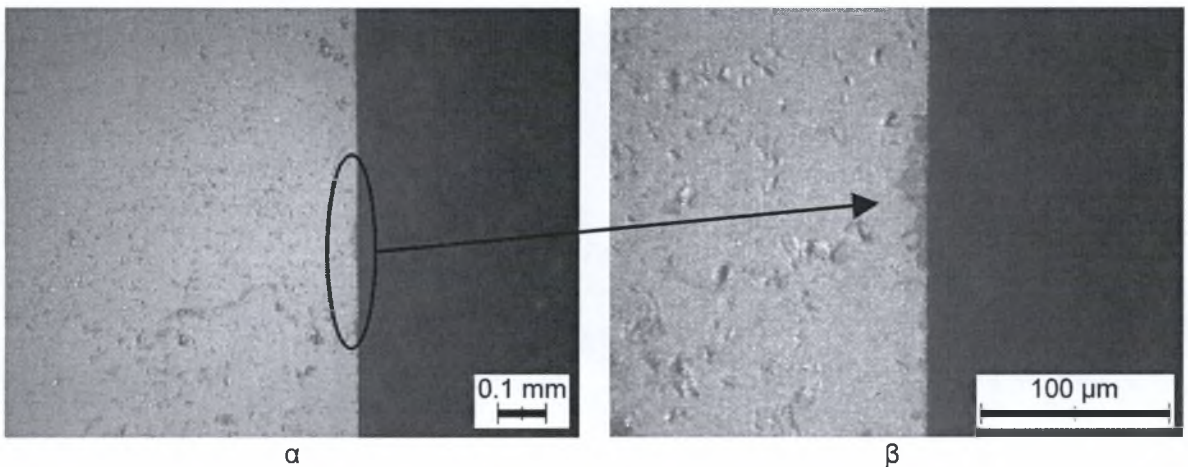
Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η έντονη προσβολή των ακμών των δοκιμίων. Στο σχήμα 5.32.α φαίνεται να έχουν διαχωριστεί τα στρώματα του Glare και στο 5.33.β η συμβολή των έντονα διαβρωμένων ακμών είχε αποτέλεσμα την αποκόλληση τμημάτων σε ορισμένες γωνίες κατά τον καθαρισμό των δοκιμίων. Φαίνεται επίσης το άθικτο, από τη διαβρωτική δράση, στρώμα prepreg.



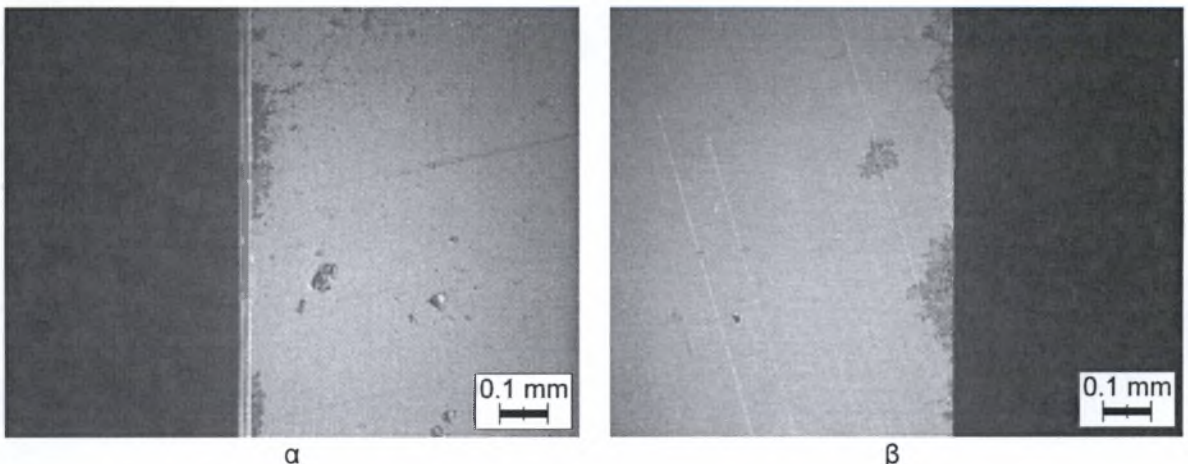
Σχήμα 5.32: Λεπτομέρειες των ακμών. (α) στρωματικός διαχωρισμός, (β) αποκόλληση τμήματος γωνίας κατά τον καθαρισμό λόγω έντονης διάβρωσης.

5.3.2 Στερεοσκοπικός έλεγχος

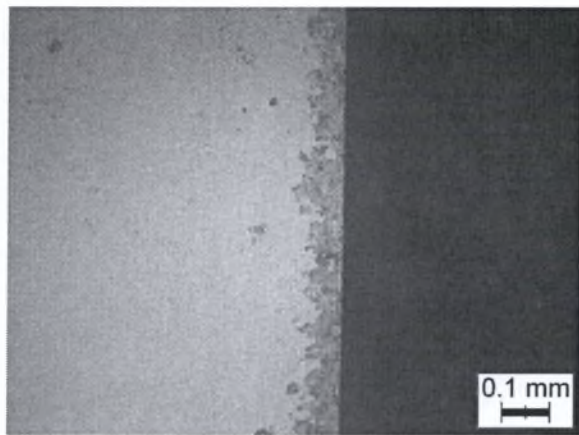
Για τον στερεοσκοπικό έλεγχο χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο Leica Wild M3Z και ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Leica DC 300. Τα σχήματα 5.33 έως 5.37 περιέχουν φωτογραφίες των δοκιμίων Al όπως φαίνονται στο στερεοσκόπιο.



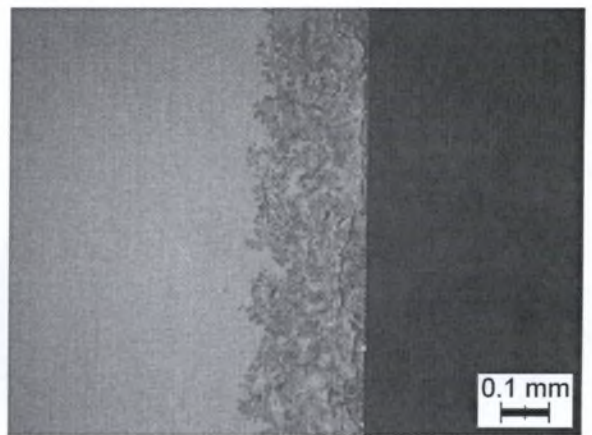
Σχήμα 5.33: Στερεοσκοπική εξέταση του δοκιμίου Al(02). (β) λεπτομέρεια της (α).



Σχήμα 5.34: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων (α) Al(05) και (β) Al(10).

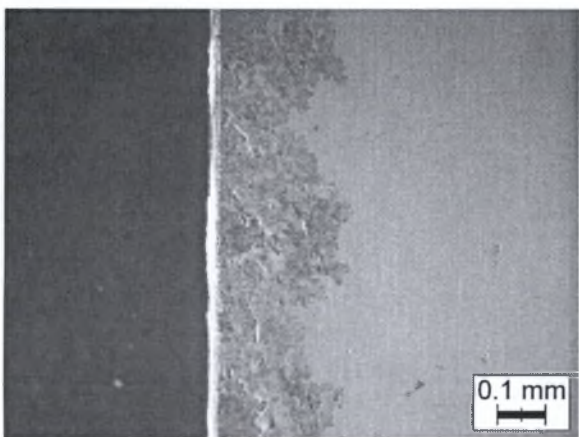


α

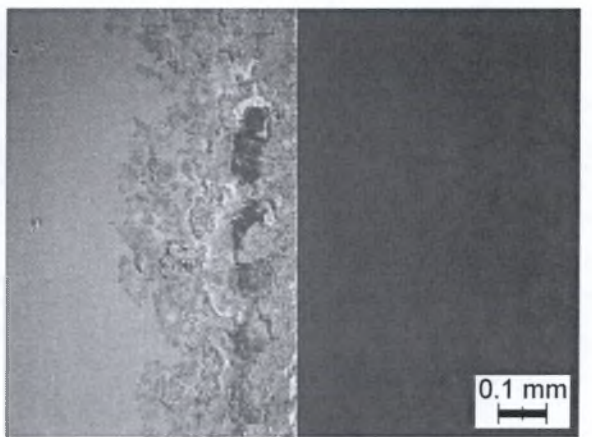


β

Σχήμα 5.35: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων (α) Al(15) και (β) Al(31).

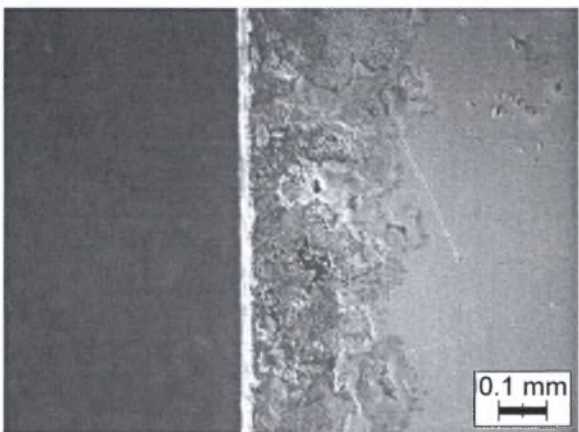


α

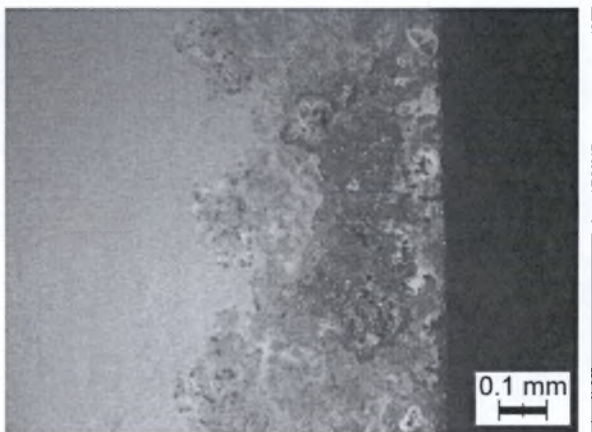


β

Σχήμα 5.36: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων (α) Al(45) και (β) Al(60).



α

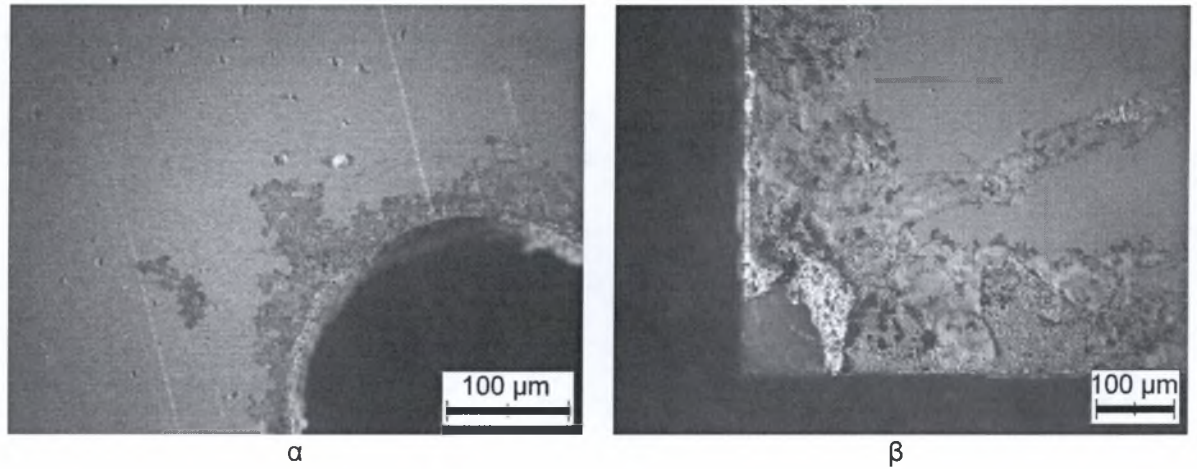


β

Σχήμα 5.37: Στερεοσκοπική εξέταση των δοκιμίων (α) Al(75) και (β) Al(90).

Όλες οι παραπάνω φωτογραφίες παρουσιάζουν την κατάσταση ακμών που ήταν κατακόρυφα εκτεθειμένες στο διαβρωτικό διάλυμα. Και εδώ φαίνεται πως το εύρος της διαβρωτικής προσβολής είναι ανάλογο του χρόνου έκθεσης του κάθε δοκιμίου. Στο επόμενο

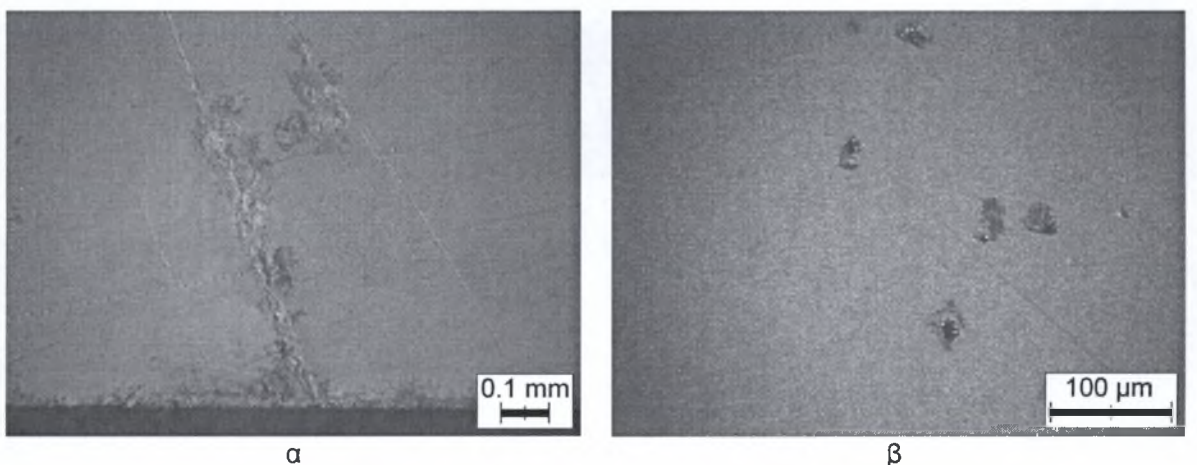
σχήμα παρουσιάζεται το εύρος της προσβολής στην περιοχή των οπών (σχήμα 5.38.α) και στις γωνίες των δοκιμίων (σχήμα 5.38.β).



Σχήμα 5.38: Στερεοσκοπική εξέταση ακμών. (α) οπή του Al(10), (β) γωνία του Al(45).

Η κατάσταση κοντά στην οπή κάθε δοκιμίου είναι ανάλογη της κατάστασης των ακμών του. Στις γωνίες η συμβολή των έντονα προσβεβλημένων ακμών έχει σαν αποτέλεσμα την αποκόλληση κομματιών από τα φύλλα αλουμινίου. Στο σχήμα 5.38.β φαίνεται επίσης το άθικτο από τη διαβρωτική δράση στρώμα prepreg.

Στο σχήμα 5.39 φαίνονται περιοχές των δοκιμίων όπου επιφανειακά ελαττώματα ευνόησαν την έναρξη της διαβρωτικής δράσης. Στο σχήμα 5.39.α φαίνεται η εξέλιξη της διαβρωτικής δράσης κατά μήκος ενός γδαρσίματος και στο 5.39.β γύρω από χτυπήματα.



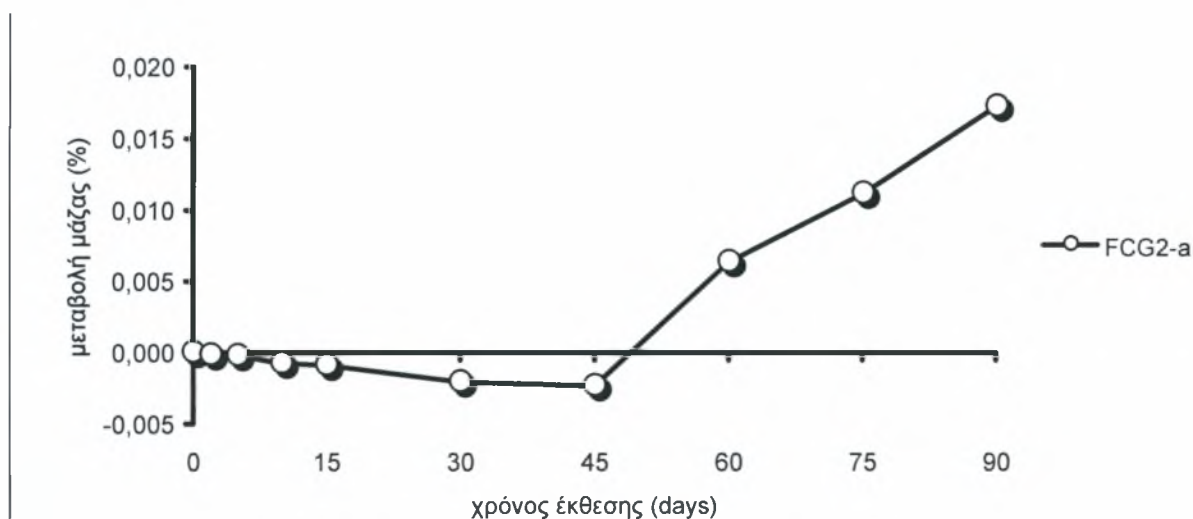
Σχήμα 5.39: Περιοχές με επιφανειακά ελαττώματα. (α) δοκίμιο Al(10), (β) δοκίμιο Al(90).

Ο στερεοσκοπικός έλεγχος των δοκιμίων δείχνει ότι η προσβολή του υλικού είναι ανάλογη του χρόνου έκθεσης. Η έναρξη της διαβρωτικής δράσης από τις απροστάτευτες

ακμές των δοκιμίων και στις επίσης απροστάτευτες περιοχές με επιφανειακά ελαττώματα είναι εμφανής. Τέλος η προσβολή είναι μικρότερη στην κάτω πλευρά των δοκιμίων. Περισσότερες λεπτομέρειες της στερεοσκοπικής εξέτασης υπάρχουν στο παράρτημα Δ.

5.3.3 Απώλεια μάζας και ρυθμός διάβρωσης.

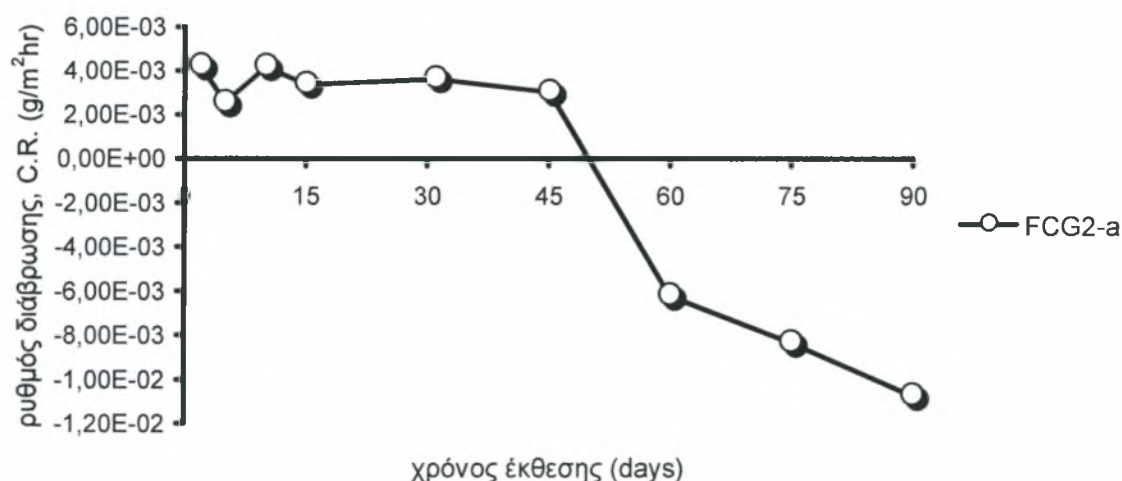
Μετά τον στερεοσκοπικό έλεγχο του κάθε δοκιμίου ακολούθησε η ζύγισή του για τον υπολογισμό της επί τοις εκατό απώλειας μάζας και του ρυθμού διάβρωσης. Στο σχήμα 5.40 φαίνεται η επί τοις εκατό μεταβολή μάζας του υλικού σε συνάρτηση με τον χρόνο παραμονής στο διαβρωτικό διάλυμα.



Σχήμα 5.40: Επί τοις εκατό μεταβολή μάζας των δοκιμίων Al συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης.

Η καμπύλη του σχήματος 5.40 έχει μια όχι αναμενόμενη αρχικά μορφή. Εμφανίζεται φθίνουσα στην αρχή της (απώλεια μάζας) με όλο και μικρότερη κλίση μέχρι και τις 45 μέρες ενώ από εκεί και πέρα ακολουθεί μια αύξουσα πορεία (αύξηση μάζας) μέχρι και το πέρας της δοκιμής. Η μορφή αυτή της καμπύλης υπονοεί πως υπάρχει κάποιος μηχανισμός, άλλος από τον διαβρωτικό, ο οποίος αυξάνει τη μάζα του υλικού, ενώ ταυτόχρονα ο μηχανισμός της διάβρωσης προκαλεί την απώλεια υλικού από την επιφάνεια των δοκιμίων. Αυτό σημαίνει πως ο ρυθμός αύξησης της μάζας είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό της απώλειας υλικού λόγω διάβρωσης.

Παρόμοια συμπεριφορά έχει και η καμπύλη του ρυθμού διάβρωσης (σχήμα 5.41). Μέχρι τις 45 ημέρες ο ρυθμός της διάβρωσης φαίνεται σταθερός. Στη συνέχεια όμως η αύξηση μάζας των δοκιμίων δεν συνάδει με τον ορισμό του ρυθμού διάβρωσης ο οποίος εμφανίζεται αρνητικός. Ο πίνακας 5.5 περιέχει τις αριθμητικές τιμές των δύο διαγραμμάτων.



Σχήμα 5.41: Ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων Al.

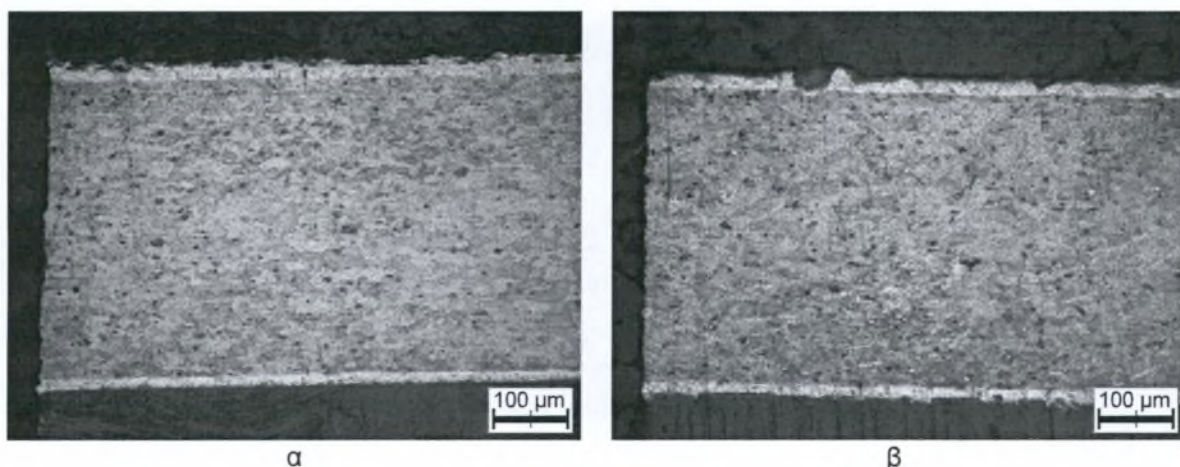
Πίνακας 5.5: Μεταβολή μάζας, % μεταβολή μάζας, επιφάνεια έκθεσης, χρόνος έκθεσης και ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων Al.

Δοκίμιο	ΔW (g)	ΔW (%)	A (cm ²)	t (days)	C.R. (g/m ² hr)
Al(02)	-0,002	-0,015	99,027	2	4,21E-03
Al(05)	-0,003	-0,023	99,346	5	2,52E-03
Al(10)	-0,01	-0,076	99,815	10	4,17E-03
Al(15)	-0,012	-0,090	98,692	15	3,38E-03
Al(31)	-0,027	-0,206	99,989	31	3,63E-03
Al(45)	-0,032	-0,232	98,313	45	3,01E-03
Al(60)	0,088	0,638	98,114	60	-6,23E-03
Al(75)	0,148	1,115	98,583	75	-8,34E-03
Al(90)	0,229	1,725	98,723	90	-1,07E-02

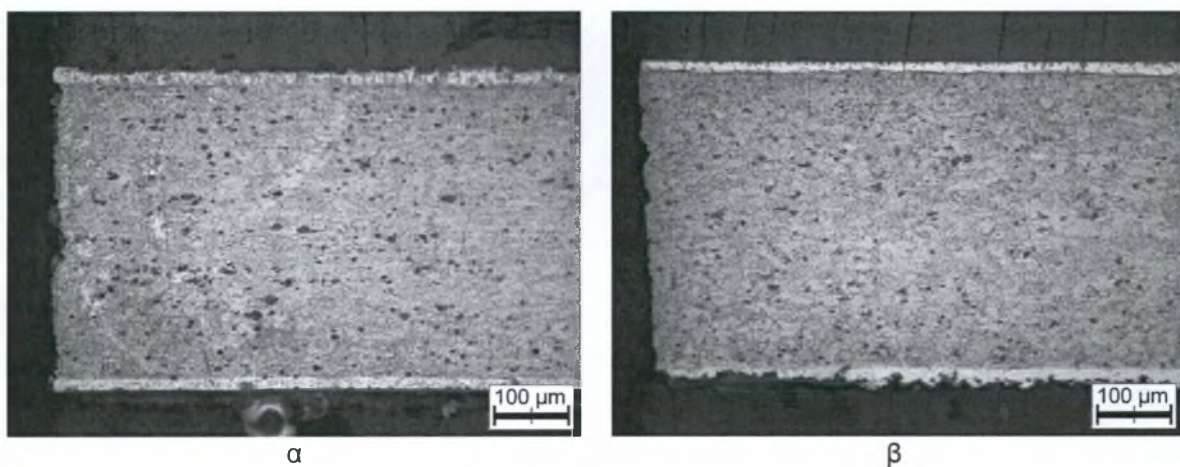
5.3.4 Οπτικός έλεγχος μεταλλογραφικών τομών.

Στη συνέχεια κόπηκαν από κάθε δοκίμιο και προετοιμάστηκαν για μεταλλογραφικό έλεγχο δοκίμια κατά τον διαμήκη και κατά τον εγκάρσιο άξονα της διεύθυνσης έλασης. Για την προετοιμασία των μεταλλογραφικών δοκιμίων ακολουθήθηκε η διαδικασία του υποκεφαλαίου 4.3.3. Τα δοκίμια αυτά παρατηρήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο *Leica Aristomet* και οι φωτογραφίες προέρχονται από ψηφιακή φωτογραφική μηχανή *Leica DC 300*. Χαρακτηριστικές λεπτομέρειες της οπτικής μικροσκοπίας των δοκιμίων δίνονται στα σχήματα 5.42 έως 5.50. Σε κάθε σχήμα φαίνονται η διαμήκης και η εγκάρσια τομή των δοκιμίων στις πιο έντονα διαβρωμένες περιοχές που ήταν οι ακμές του. Η εγκάρσια τομή δείχνει το εύρος της προσβολής των ακμών που ήταν κατακόρυφες στο διάλυμα και η διαμήκης την προσβολή της κάτω οριζόντιας ακμής. Στο παράρτημα Δ βρίσκονται περισσότερες φωτογραφίες της οπτικής μικροσκοπίας.

Τα δοκίμια με χρόνο έκθεσης μικρότερο από πέντε μέρες (σχήματα 5.42 και 5.43) δεν παρουσιάζουν έντονα σημάδια διάβρωσης. Το στρώμα της χρωμικής ανοδίσωσης φαίνεται και στα δύο δοκίμια άθικτο εκτός από ένα μικρό μέρος της εγκάρσιας τομής του Al(05) (σχήμα 5.43.β). Οι ατέλειες που υπάρχουν στη χρωμική ανοδίωση των δοκιμίων φαίνεται να είναι αποτέλεσμα της κακής επιφανειακής κατάστασης του υλικού και όχι της διαβρωτικής προσβολής, η οποία καταστρέφει ομοιόμορφα το στρώμα της ανοδίσωσης σε όλο το πάχος του, όπως φαίνεται στην άκρη της εγκάρσιας τομής του δοκιμίου Al(05). Επίσης στο δοκίμιο Al(05) οι παράπλευρες επιφάνειες των φύλλων αλουμινίου φαίνονται ελαφρά αλλοιωμένες σε σχέση με το Al(02).



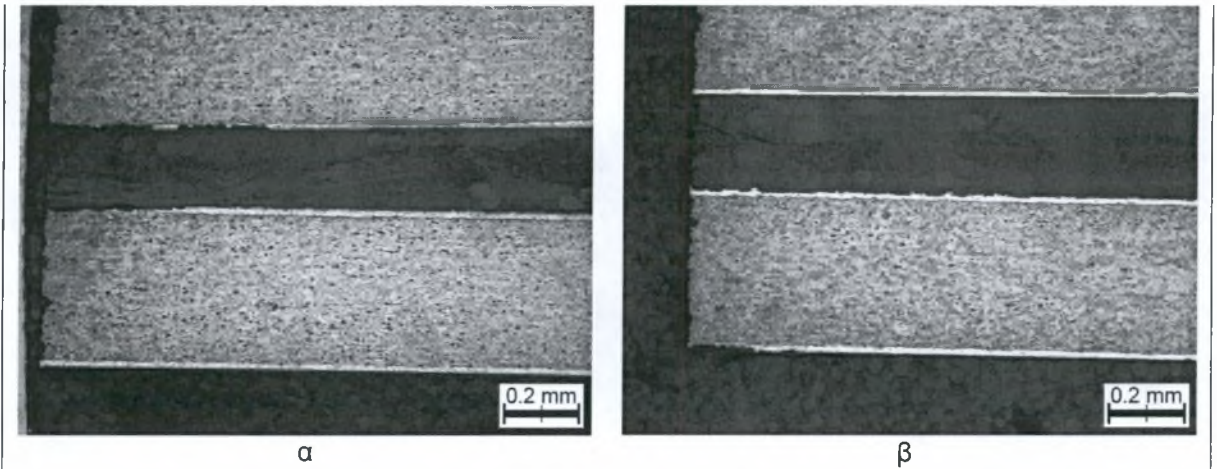
Σχήμα 5.42: Δοκίμιο Al(02), σχεδόν κανένα σημάδι διαβρωτικής προσβολής. (α) διαμήκης τομή-επιφάνεια I, (β) εγκάρσια τομή-επιφάνεια I.



Σχήμα 5.43: Δοκίμιο Al(05), μικρή προσβολή των παράπλευρων επιφανειών. (α) διαμήκης τομή-επιφάνεια II, (β) εγκάρσια τομή-επιφάνεια II.

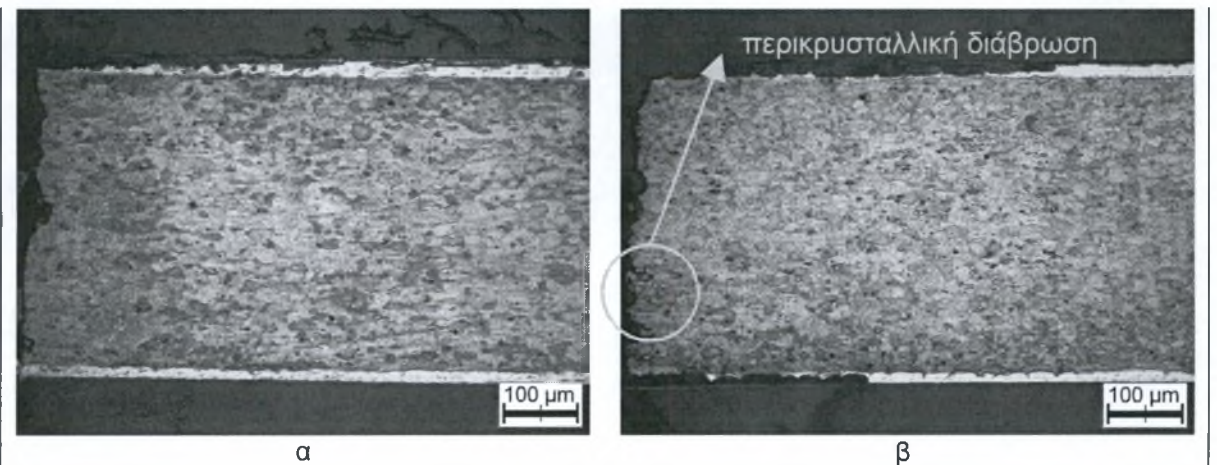
Στο δοκίμιο Al(10) (σχήμα 5.44) είναι εμφανής πλέον η διαβρωτική δράση με την κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης, είτε στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prepreg (σχήμα

5.44.α) ή στην εξωτερική επιφάνεια του αλουμινίου (σχήμα 5.44.β), και την προσβολή της παράπλευρης επιφάνειας των φύλλων αλουμινίου όπου δεν υπάρχει χρωμική ανοδίωση.



Σχήμα 5.44: Δοκίμιο Al(10), κατανάλωση της χρωμικής ανοδίωσης και προσβολή των απροστάτευτων ακμών. (α) διαμήκης τομή-επιφάνεια II, (β) εγκάρσια τομή-επιφάνεια II.

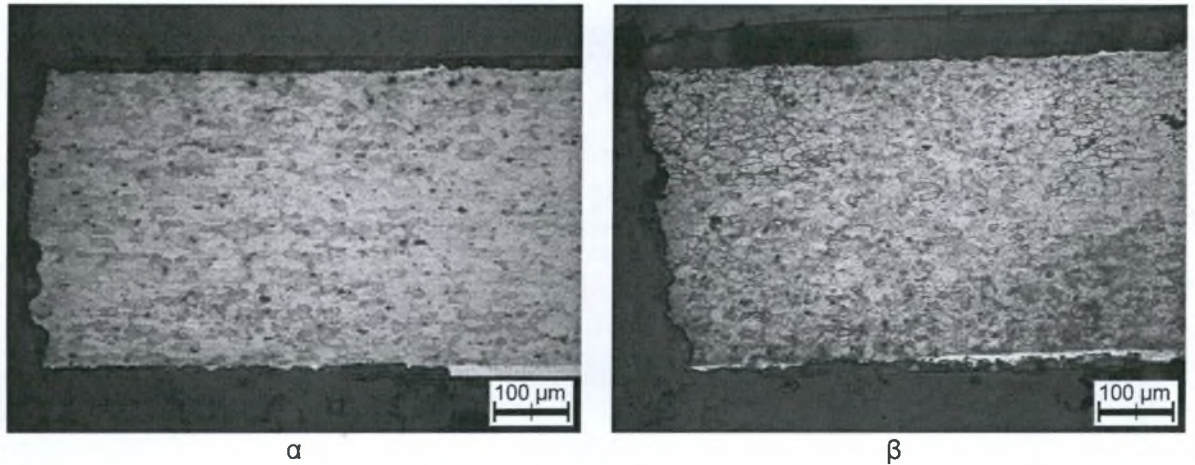
Στο επόμενο δοκίμιο (σχήμα 5.45) η διαβρωτική προσβολή είναι εντονότερη. Η χρωμική ανοδίωση έχει καταναλωθεί σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι στο Al(10) και από την παράπλευρη επιφάνεια του αλουμινίου έχουν αποκολληθεί κόκκοι υλικού. Επίσης, στην εγκάρσια τομή έχουν κάνει την εμφάνιση τους τα πρώτα σημάδια περικρυσταλλικής διάβρωσης.



Σχήμα 5.45: Δοκίμιο Al(15), κατανάλωση χρωμικής ανοδίωσης, αποκόλληση κόκκων υλικού και περικρυσταλλική διάβρωση. (α) διαμήκης τομή-επιφάνεια I, (β) εγκάρσια τομή-επιφάνεια I.

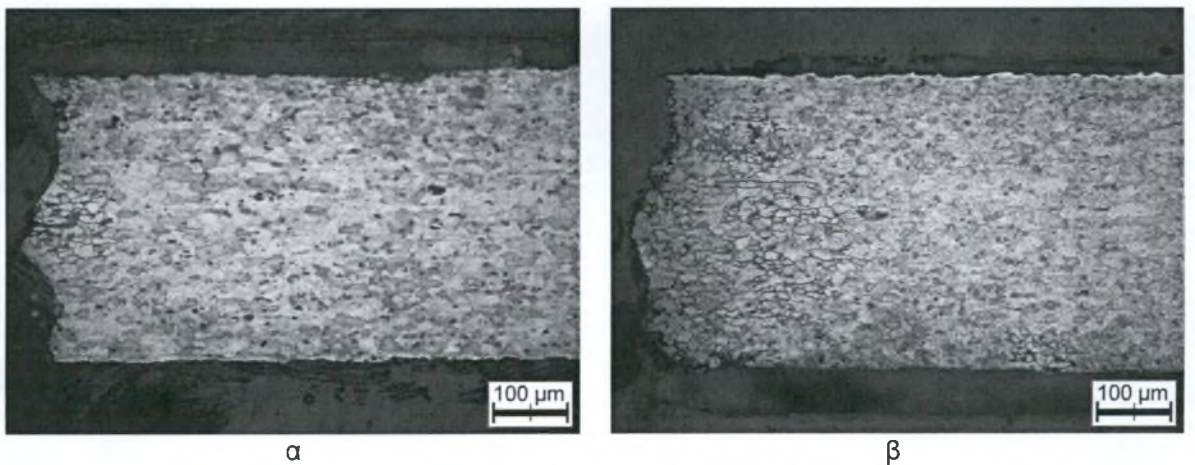
Η εικόνα που εμφανίζεται στα επόμενα δοκίμια είναι παρόμοια με το εύρος της διαβρωτικής προσβολής να είναι ανάλογο του χρόνου έκθεσης του δοκιμίου. Στο δοκίμιο

Al(31) (σχήμα 5.46) η περικρυσταλλική διάβρωση στην εγκάρσια τομή είναι έντονη. Ακόμα, η συσσώρευση αλάτων στη διεπιφάνεια αλουμινίου/rgerreg σε συνδυασμό με τη κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης προκαλεί τα φύλλα αλουμινίου να ανασηκωθούν και να καμφθούν, ένα φαινόμενο που εμφανίζεται όλο και πιο έντονο στους μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης.



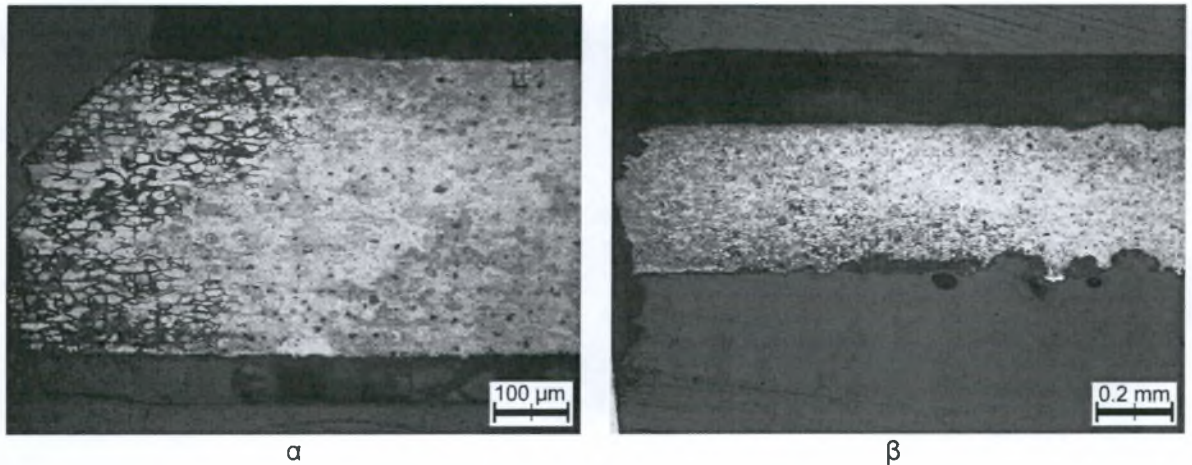
Σχήμα 5.46: Δοκίμιο Al(31), κατανάλωση χρωμικής ανοδίσωσης, αποκόλληση κόκκων υλικού και έντονη περικρυσταλλική διάβρωση. (α) διαμήκης τομή-επιφάνεια I, (β) εγκάρσια τομή-επιφάνεια II.

Στο δοκίμιο Al(45) κάνει την εμφάνιση της έντονη περικρυσταλλική διάβρωση και στη διαμήκη τομή (σχήμα 5.47.α). Και στις δύο τομές είναι φανερό πως έχουν αποκολληθεί κομμάτια υλικού από τις παράπλευρες επιφάνειες των φύλλων αλουμινίου.



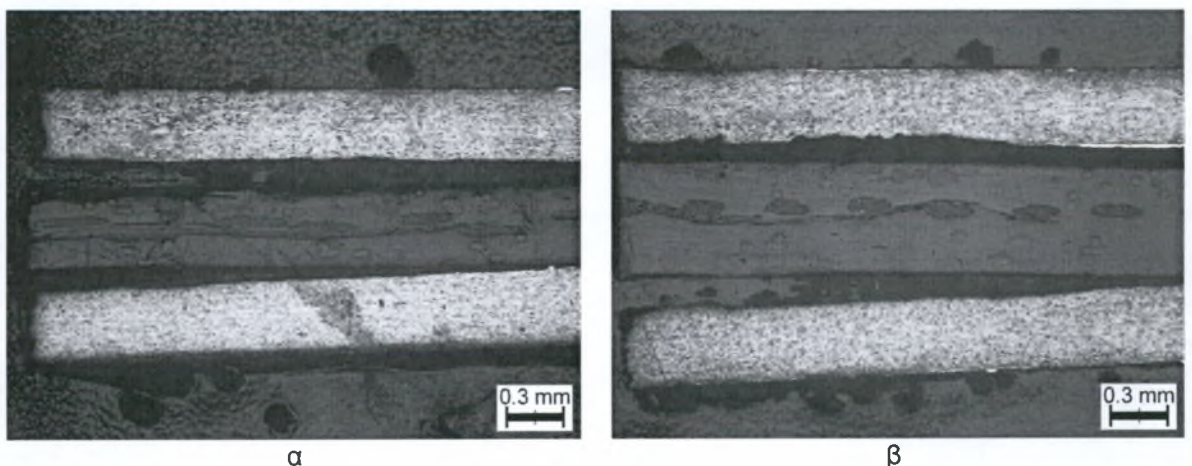
Σχήμα 5.47: Δοκίμιο Al(45), έντονη περικρυσταλλική διάβρωση και στις δύο τομές. (α) διαμήκης τομή-επιφάνεια II, (β) εγκάρσια τομή-επιφάνεια I.

Στο δοκίμιο Al(60) (σχήμα 5.48) παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα, έντονη περικρυσταλλική διάβρωση, κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης και αποκόλληση κομματιών υλικού. Ακόμα στην εγκάρσια τομή εμφανίζεται και μια περιορισμένου εύρους περιοχή με τρήματα τα οποία φτάνουν τα 100 μ m σε βάθος και δεν ξεπερνούν τα 150 μ m σε διάμετρο.

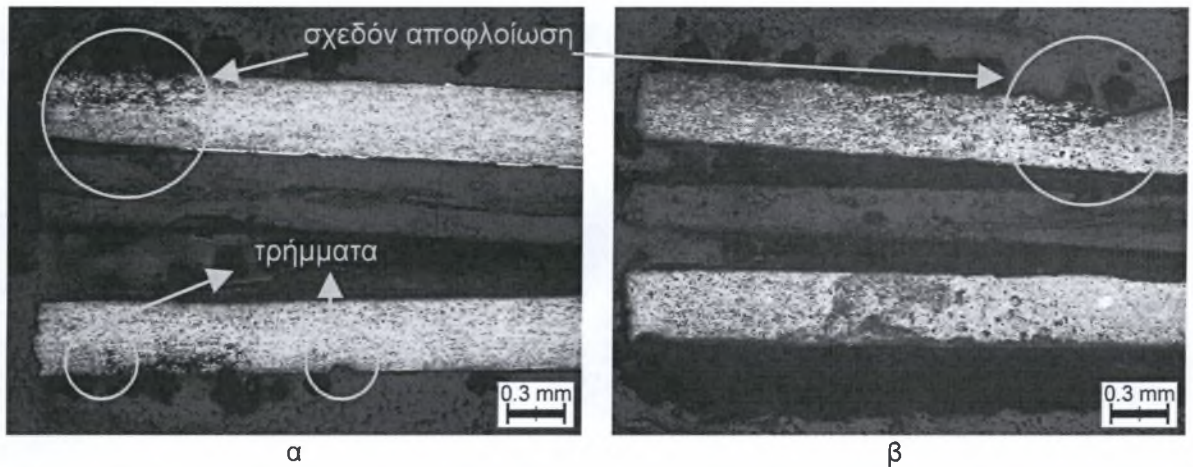


Σχήμα 5.48: Δοκίμιο Al(60), περικρυσταλλική και τρηματική διάβρωση. (α) διαμήκης τομή-επιφάνεια I, (β) εγκάρσια τομή-επιφάνεια I.

Στα επόμενα δύο σχήματα παρουσιάζονται τα δοκίμια Al(75) (σχήμα 5.49) και Al(90) (σχήμα 5.50). Είναι εμφανές το φαινόμενου του διαχωρισμού του αλουμινίου από το prepreg το οποίο συμβαίνει εξαιτίας της κατανάλωσης της χρωμικής ανοδίσωσης στη διεπιφάνεια. Σε ορισμένες περιοχές η προσβολή είναι πιο έντονη στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prepreg (σχήμα 5.49.β). Στο δοκίμιο Al(90) η έντονη περικρυσταλλική διάβρωση έχει σχεδόν προκαλέσει την αποφλοίωση του υλικού κατά περιοχές ενώ υπάρχουν και περιοχές με τρήματα. (σχήμα 5.50.α)

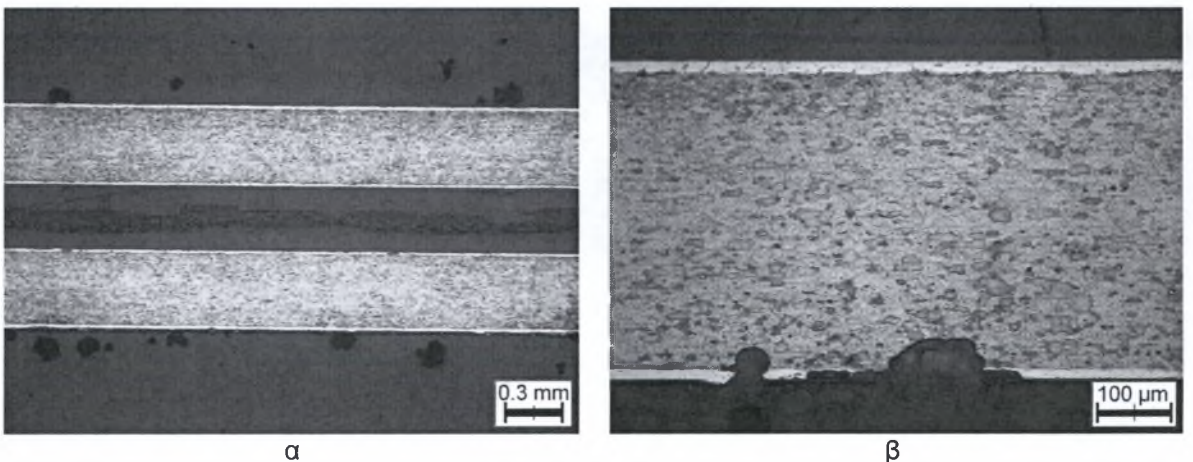


Σχήμα 5.49: Δοκίμιο Al(75), διαχωρισμός των στρωμάτων του Glare (delamination). (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.



Σχήμα 5.50: Δοκίμιο Al(90), διαχωρισμός των στρωμάτων, τρηματική διάβρωση και αποφλοίωση. (α) διαμήκης τομή, (β) εγκάρσια τομή.

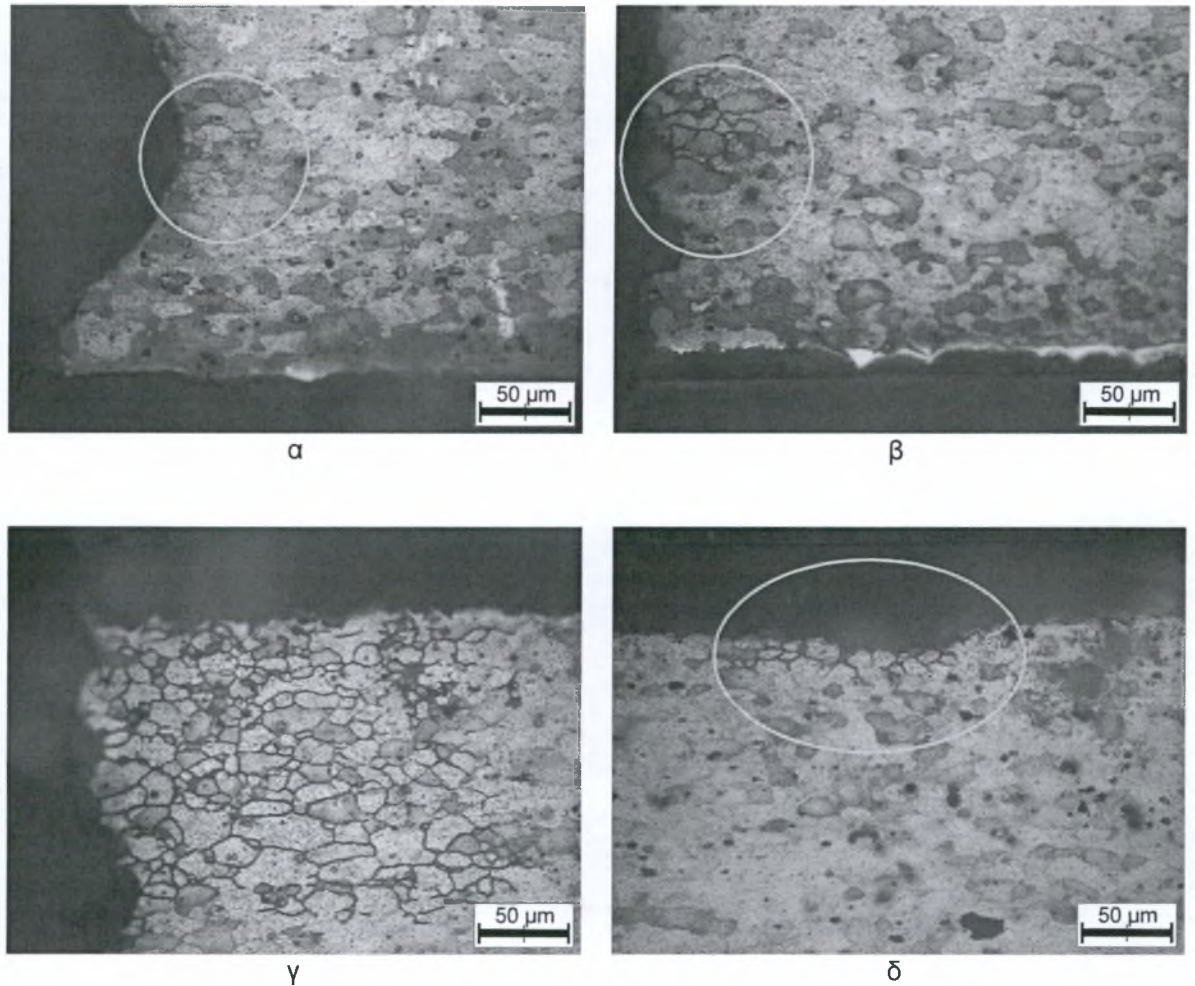
Οι παραπάνω φωτογραφίες επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι η προσβολή είναι ανάλογη του χρόνου έκθεσης και ότι είναι πιο έντονη στις επιφάνειες που ήταν κατακόρυφα εκτεθειμένες στο διάλυμα συγκριτικά με την κάτω οριζόντια επιφάνεια των δοκιμίων. Στο σχήμα 5.51 φαίνεται η επιφανειακή κατάσταση των δοκιμίων μακριά από τις ακμές τους. Η γενική εικόνα είναι αυτή του σχήματος 5.51.α και μόνο σε σημεία όπου υπήρχαν έντονα ελαττώματα στην επιφάνεια των δοκιμίων (σχήμα 5.51.β) μπόρεσε να εξελιχθεί η διαβρωτική δράση. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός ότι η έναρξη της διαβρωτικής δράσης έγινε από τις ακμές και από τα επιφανειακά ελαττώματα των δοκιμίων.



Σχήμα 5.51: (α) Al(60), απρόσβλητη επιφάνεια μακριά από τις ακμές, διαμήκης τομή, (β) Al(75), τρήματα μακριά από τις ακμές, διαμήκης τομή-επιφάνεια II.

Στο σχήμα 5.52 φαίνεται ότι η διάβρωση εξελίσσεται περικρυσταλλικά. Τα σχήματα 5.52.α έως γ δείχνουν την εξέλιξη της περικρυσταλλικής διάβρωσης και στο δ εμφανίζεται περιοχή στην εσωτερική πλευρά του αλουμινίου, όπου ο διαχωρισμός του από το prepreg

έχει επιτρέψει την εισχώρηση του διαβρωτικού διαλύματος και την έναρξη περικρυσταλλικής διάβρωσης.



Σχήμα 5.52: Περικρυσταλλική διάβρωση. (α) δοκίμιο Al(60), διαμήκης τομή-επιφάνεια II, (β) δοκίμιο Al(15), εγκάρσια τομή-επιφάνεια I, (γ) Al(30), εγκάρσια τομή-επιφάνεια II, (δ) δοκίμιο Al(45), διαμήκης τομή-επιφάνεια II.

Τέλος ο πίνακας 5.6 περιέχει τον χαρακτηρισμό της επιφάνειας των δοκιμίων Al. Όπως έχει αναφερθεί, σε όλα τα δοκίμια της δοκιμής Al η διαβρωτική προσβολή έλαβε χώρα στα άκρα μόνο των δοκιμίων και σε ορισμένες περιοχές όπου υπήρχαν έντονα επιφανειακά ελαττώματα, ενώ η υπόλοιπη επιφάνειά τους ήταν σχεδόν ανεπηρέαστη. Έτσι, τα δοκίμια που έμειναν εκτεθειμένα στο διαβρωτικό διάλυμα για λιγότερο από 45 μέρες δεν είχαν ιδιαίτερα σημάδια διάβρωσης παρά μόνο στα άκρα τους, όπου η διαβρωτική δράση είχε περιοριστεί στην κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης. Στα δύο επόμενα δοκίμια, Al(60) και Al(75) εμφανίστηκαν επιπλέον μερικά τρήματα στα σημεία εκείνα που είχε προσβληθεί σε όλο του το πάχος το στρώμα της ανοδίσωσης, ενώ στο δοκίμιο των 90 ημερών υπήρχαν και περιοχές με ενδείξεις αποφλοίσωσης.

Πίνακας 5.6: Χαρακτηρισμός της επιφάνειας των δοκιμίων Al.

Δοκίμιο	Χαρακτηρισμός επιφάνειας I	Χαρακτηρισμός επιφάνειας II
Al(02)	N, no appreciable attack	N, no appreciable attack
Al(05)	N, no appreciable attack	N, no appreciable attack
Al(10)	N, no appreciable attack	N, no appreciable attack
Al(15)	N, no appreciable attack	N, no appreciable attack
Al(31)	N, no appreciable attack	N, no appreciable attack
Al(45)	N, no appreciable attack	N, no appreciable attack
Al(60)	N/P, no appreciable attack & pitting corrosion	N/P, no appreciable attack & pitting corrosion
Al(75)	N/P, no appreciable attack & pitting corrosion	N/P, no appreciable attack & pitting corrosion
Al(90)	N/P/EA, no appreciable attack, pitting & exfoliation corrosion	N/P/EA, no appreciable attack, pitting & exfoliation corrosion

Αναφορές

[1] Standard ASTM G1 – 90 (Reapproved 1999) "Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens", 1990.

[2] Standard ASTM G46 – 94 (Reapproved 1999) "Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion", 1994.

Κεφάλαιο 6: Συζήτηση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα της εργασίας.

6.1 Εισαγωγή.

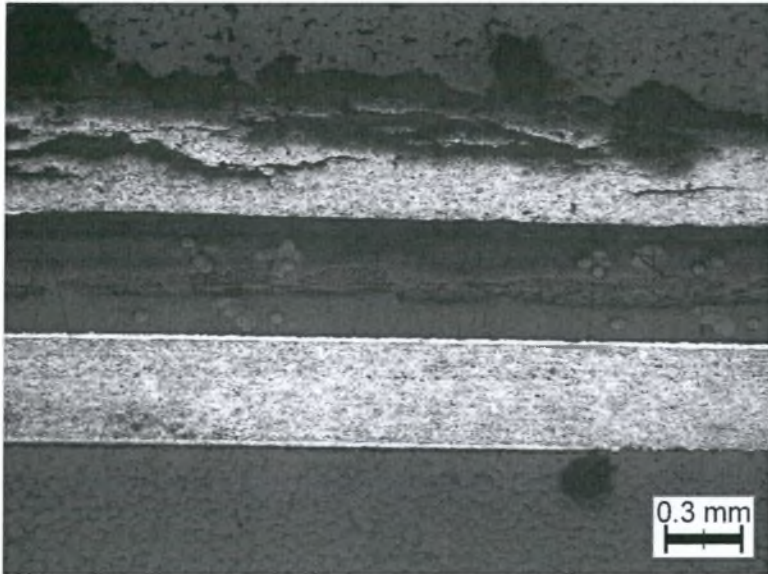
Η επεξήγηση των αποτελεσμάτων μιας πειραματικής διαδικασίας αποτελεί σημαντικό κομμάτι στην ανάλυση του θέματος το οποίο διερευνάται και στην έκθεση προτάσεων για την αντιμετώπισή του. Για την ορθή επεξήγηση των αποτελεσμάτων μιας πειραματικής δοκιμής επιταχυνόμενης διάβρωσης απαιτείται γνώση της βασικής θεωρίας της διάβρωσης και των συνθηκών, της δοκιμής που περιλαμβάνουν από περιβαλλοντικές μεταβλητές έως θέματα που αφορούν το υλικό.

Έχοντας καλύψει τις παραπάνω περιοχές στα προηγούμενα κεφάλαια επιχειρείται η ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν. Αμέσως στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν παρατηρώντας τα αποτελέσματα της κάθε δοκιμής. Στο τέλος παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική εργασία και περαιτέρω ανάλυση των φαινομένων εμφανίστηκαν κατά τις δύο δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης.

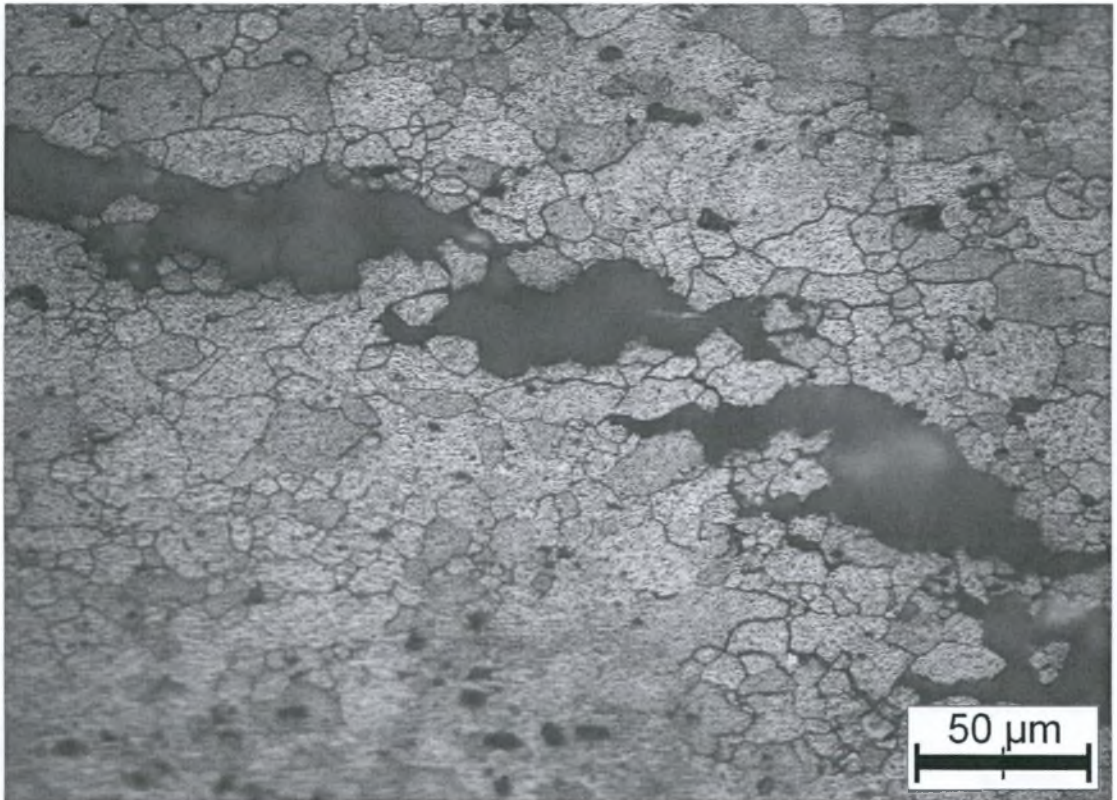
6.2 Συζήτηση των αποτελεσμάτων της δοκιμής EXCO.

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμή EXCO ήταν συνολικά δέκα. Ασφαλή συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν μόνο για τα έξι δοκίμια της σειράς E4 για τα οποία υπήρξε πλήρης χρονική σειρά δοκιμών.

Για τα δοκίμια των δύο stripes (σειρές E1, chromic stripe, και E2, sulfuric stripe) μπορούμε να επισημάνουμε ότι η διαβρωτική προσβολή ήταν εντονότερη στο stripe με τη χρωμική ανοδίωση, ότι τα δοκίμια που εκτέθηκαν για 96 ώρες στο διαβρωτικό διάλυμα εμφάνισαν έντονη διάβρωση αποφλοίωσης (σχήμα 6.1) και πως η διαβρωτική προσβολή εξελίχθηκε περικρυσταλλικά (σχήμα 6.2). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, στο δοκίμιο των 96 ωρών από το stripe με τη θειική ανοδίωση, το πάνω φύλλο αλουμινίου αποκολλήθηκε τελείως από το prepreg (delamination) κατά την κοπή μεταλλογραφικών δοκιμών, λόγω της προσβολής της διεπιφάνειας. Αιτία αυτού ίσως είναι όχι τόσο καλή συνοχή της ρητίνης με την επιφάνεια που σχηματίζει η θειική ανοδίωση. Συγκριτικά, η χρωμική ανοδίωση φαίνεται να προσφέρει καλύτερη συνοχή, καθώς στο αντίστοιχο δοκίμιο δεν παρατηρήθηκε κάτι ανάλογο.

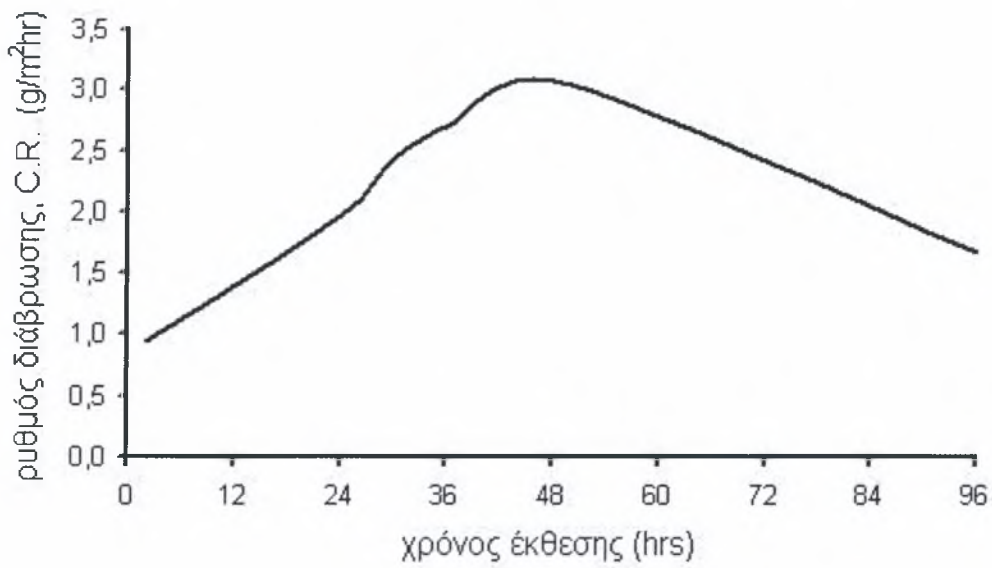


Σχήμα 6.1: Διάβρωση αποφλοιώσης.

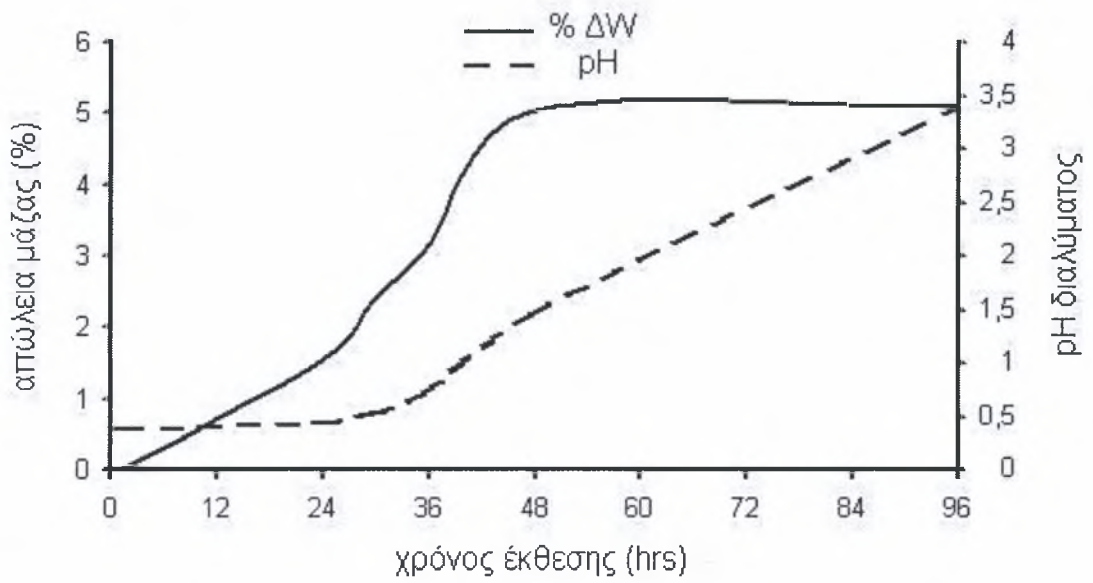


Σχήμα 6.2: Περικρυσταλλική διάβρωση.

Το σχήμα 6.3 δείχνει το ρυθμό διάβρωσης και στο 6.4 φαίνονται η μεταβολή της οξύτητας του διαλύματος και της επί τοις εκατό απώλειας βάρους των δοκιμίων E4. Ο πίνακας 6.1 συνοψίζει την τιμή pH του διαλύματος στον χρόνο έκθεσης και σχόλια που αποκομίσθηκαν από την παρατήρηση των δοκιμίων στο οπτικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 6.3: Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμών E4.



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα pH και % ΔW συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμών E4.

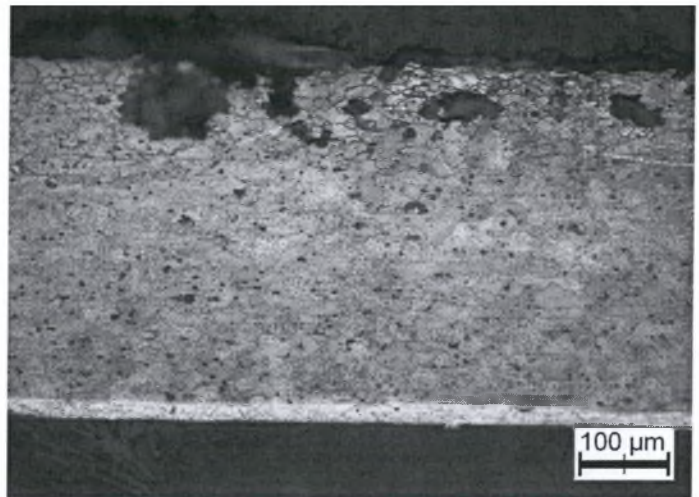
Πίνακας 6.1: pH διαλύματος και επιφανειακή κατάσταση δοκιμών E4.

χρόνος έκθεσης	τελικό pH δ/τος	επιφανειακή κατάσταση
2 (hrs)	0,40	πολύ λίγος χρόνος για την εμφάνιση σημαντικής προσβολής
24 (hrs)	0,46	προσβολή της χρωμικής ανοδίσωσης, κατανάλωση του μισού της πάχους
30 (hrs)	0,55	προσβολή της χρωμικής ανοδίσωσης, κατανάλωση όλου σχεδόν του πάχους, μερικά τρήματα στις άκρες
36 (hrs)	0,73	έναρξη αποφλοίσωσης
48 (hrs)	1,47	αποφλοίσωση
96 (hrs)	3,39	αποφλοίσωση, όχι σημαντική διάφορα σε σχέση με τις 48 ώρες

Η αρχική υψηλή τιμή οξύτητας μπορεί να προκαλέσει τη διάλυση της χρωμικής ανοδίσωσης. Κατά το διάστημα των πρώτων τριάντα ωρών η απώλεια μάζας αντιστοιχεί στο στρώμα της χρωμικής ανοδίσωσης που καταναλίσκεται με την τιμή του pH να μην μεταβάλλεται σημαντικά και το ρυθμό διάβρωσης να είναι ανάλογος του χρόνου έκθεσης. Από το σημείο αυτό και μετά παρατηρείται μια απότομη άνοδος του ρυθμού διάβρωσης και της απώλειας μάζας με ταυτόχρονη απότομη πτώση της οξύτητας του διαλύματος έως τις 48 ώρες. Αυτό συμβαίνει γιατί η ανοδίσωση έχει πλέον καταστραφεί, αφήνοντας εκτεθειμένο το υλικό σε χαμηλό pH. Η μείωση της οξύτητας του διαλύματος οφείλεται στην αναγωγή των ιόντων υδρογόνου του διαλύματος από το αλουμίνιο μειώνοντας τη συγκέντρωσή τους στο διάλυμα. Στα μεταλλογραφικά δοκίμια των 48 ωρών παρατηρήθηκαν σημεία όπου η διάβρωση είχε προσβάλλει το υλικό σε όλο του το πάχος αφήνοντας εκτεθειμένο το στρώμα της χρωμικής ανοδίσωσης στη διεπιφάνεια αλουμινίου/rgreg. Το υλικό κοντά στις περιοχές αυτές προστατεύεται (καθοδική προστασία) καθώς θυσιάζεται η άνοδος. Αποτέλεσμα είναι η μικρή επιπλέον απώλεια μάζας ως τις 96 ώρες και η πτώση του ρυθμού διάβρωσης. Η μεγάλη αλλαγή στην κλίση του ρυθμού διάβρωσης και η σχεδόν παύση της διαβρωτικής δράσης δεν δικαιολογείται μόνο από τη συνεισφορά της χρωμικής ανοδίσωσης. Πλέον είναι εκτεθειμένο στο διάλυμα το BR 127 το οποίο δρα και σαν αναχαιτιστής της διάβρωσης. Επίσης, το διάλυμα τείνει να γίνει όλο και πιο ουδέτερο. Αποτέλεσμα είναι η τιμή του pH να πλησιάζει την κατώτερη τιμή στην οποία το αλουμίνιο παθητικοποιείται σύμφωνα με το διάγραμμα Pourbaix του αλουμινίου με συνέπεια την αισθητή επιβράδυνση της διάβρωσης.

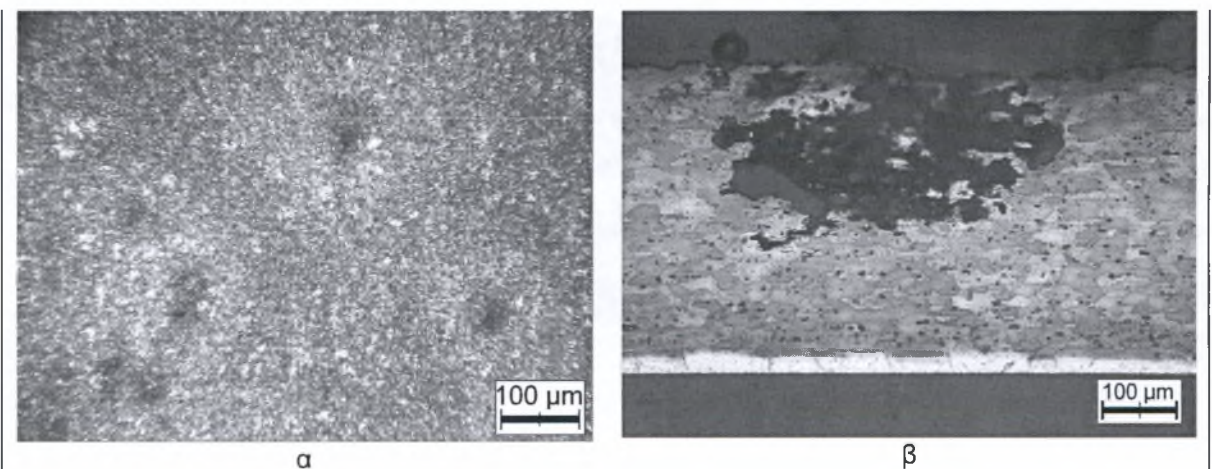
Στα δοκίμια με μικρούς χρόνους έκθεσης (2, 24 και 30 ωρών) η διαβρωτική προσβολή είναι ομοιόμορφη και εστιάζεται στην κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης. Μόνο στο δοκίμιο των 30 ωρών και κατά μήκος μιας ακμής του εμφανίστηκαν μερικά

τρήματα, παρόλο που, σύμφωνα με τη θεωρία, τρηματική διάβρωση (σχήμα 6.5) συμβαίνει κυρίως στην περιοχή παθητικοποίησης του αλουμινίου, δηλαδή σε pH από 4 έως 8.5. Το γεγονός ότι όλα τα δοκίμια εμφάνιζαν έντονη διάβρωση σε κάποια ακμή τους ίσως είναι αποτέλεσμα της τασικής κατάστασης που δημιουργείται λόγω της παραμόρφωσης του υλικού που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 4.2.



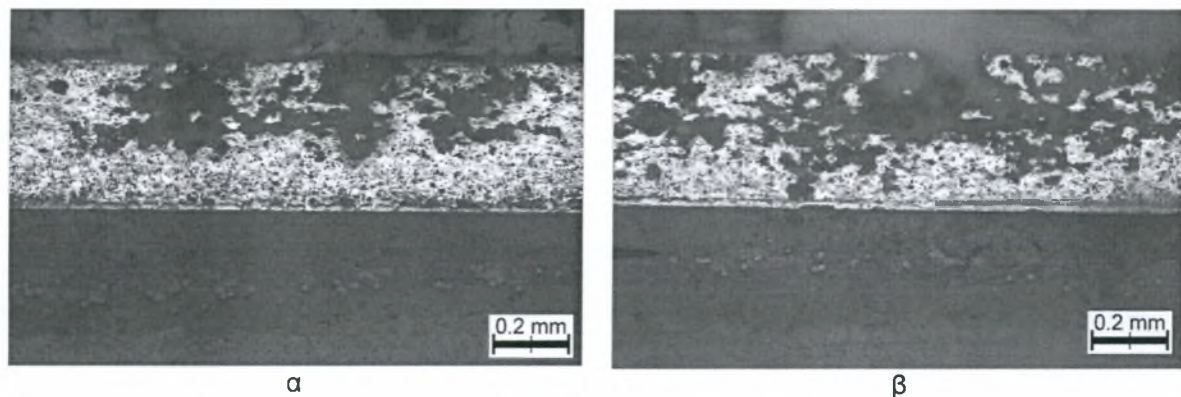
Σχήμα 6.5: Τρηματική διάβρωση.

Η στερεοσκοπική εξέταση του δοκιμίου των 36 ωρών δείχνει ότι πρόκειται για τρηματική διάβρωση σχήμα (6.6.α) όμως η παρατήρηση της μεταλλογραφικής τομής δείχνει ότι πρόκειται για τα πρώτα στάδια της αποφλοίωσης (σχήμα 6.6.β).



Σχήμα 6.6: Δοκίμιο E4(36). (α) στερεοσκοπική εξέταση, (β) μεταλλογραφική τομή.

Τα δοκίμια που εκτέθηκαν για περισσότερες ώρες στο διάλυμα εμφάνισαν διάβρωση αποφλοίωσης. Η αποφλοίωση όμως δεν ήταν έντονη λόγω των σχεδόν ισοαξονικών κόκκων (σχήμα 6.7). Επιμήκεις κόκκοι απαιτούνται για την παρουσία έντονης αποφλοίωσης.



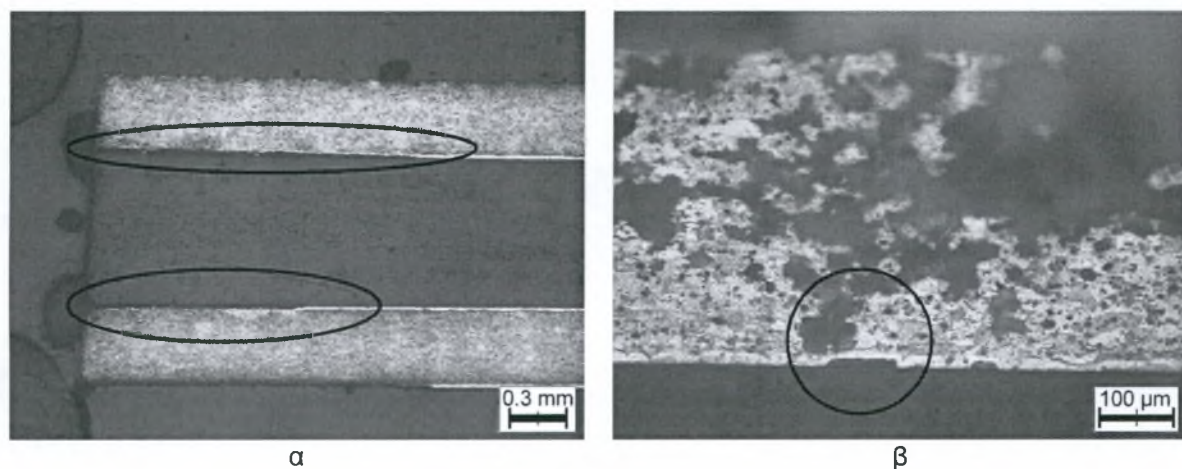
Σχήμα 6.7: Διάβρωση αποφλοιώσης. (α) δοκίμιο E4(48), (β) E4(96)

Η διαβρωτική προσβολή φαίνεται να εξελίσσεται περικρυσταλλικά (σχήμα 6.8). Η περικρυσταλλική διάβρωση των κραμάτων 2xxx οφείλεται στην ελλιπή σε χαλκό ζώνη εκατέρωθεν των κόκκων, που δημιουργείται κατά την καθίζηση σωματιδίων στα όρια αυτών. Το πολύ μικρό πάχος των φύλλων αλουμινίου του Glare (0.4mm), επιτρέπει κατά τη βαφή την ανάπτυξη του ίδιου υψηλού ρυθμού ψύξης σε όλο τους το πάχος με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό του χαλκού στο στερεό διάλυμα και τη μείωση της χαμηλής σε ποσοστό χαλκού ζώνης στα όρια των κόκκων αποτρέποντας την εμφάνιση περικρυσταλλικής διάβρωσης. Όμως, κατά την κατασκευή του Glare τα φύλλα αλουμινίου περνούν μια δεύτερη θερμική επεξεργασία (δύο ώρες στους 120°C), η οποία είναι πιθανόν να προκαλεί την καθίζηση φάσεων στα όρια των κόκκων με αποτέλεσμα την περικρυσταλλική διάβρωση.



Σχήμα 6.8: Περικρυσταλλική διάβρωση.

Ακόμα επιβεβαιώθηκε ο προστατευτικός χαρακτήρας των ενδιάμεσων στρωμάτων prepreg. Σε όλα τα δοκίμια το μη εκτεθειμένο στρώμα αλουμινίου, του οποίου η ελεύθερη επιφάνεια ήταν καλυμμένη με προστατευτικό αυτοκόλλητο, δεν παρουσίασε κανένα ίχνος προσβολής πέρα από τα εκτεθειμένα άκρα του. Σε αυτά η διάβρωση ξεκίνησε με την κατανάλωση της χρωμικής ανοδίσωσης (σχήμα 6.9.α) και στα τελευταία δοκίμια όπου δεν υπήρχε το εξωτερικό στρώμα ανοδίσωσης ήταν έντονη. Ακόμα και στα σημεία όπου η διαβρωτική προσβολή είχε διαπεράσει το εκτεθειμένο στρώμα αλουμινίου το prepreg εμπόδιζε την έκθεση του επόμενου φύλλου αλουμινίου στο διαβρωτικό περιβάλλον (σχήμα 6.9.β).

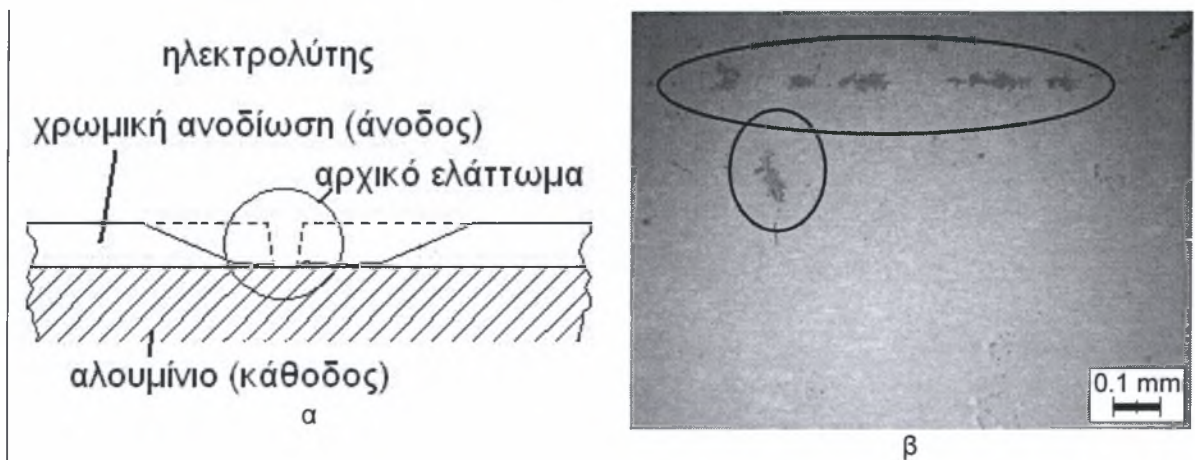


Σχήμα 6.9: Προσβολή της χρωμικής ανοδίσωσης της διεπιφάνειας και προστασία από στρώμα prepreg. (α) δοκίμιο E4(36), (β) δοκίμιο E4(96).

Η κατανάλωση της ανοδίσωσης στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prepreg οφείλεται ως ένα σημείο στη συνδυασμένη δράση του χαμηλού pH του διαλύματος και φαινομένων γαλβανικής και σχισματικής διάβρωσης. Όταν το pH αυξηθεί σε πιο ουδέτερες τιμές τότε φαινόμενα γαλβανικής και σχισματικής δράσης συμβάλλουν στην κατανάλωση της ανοδίσωσης. Παρόλο που υπήρχε σε μεγάλο βαθμό απώλεια της χρωμικής ανοδίσωσης στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prepreg, είτε στα άκρα των δοκιμίων, είτε στα σημεία που το διάλυμα είχε φτάσει στη διεπιφάνεια, δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα delamination.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι οι επιφανειακές ατέλειες των δοκιμίων ήταν τα σημεία όπου ξεκίνησε η διαβρωτική προσβολή σύμφωνα με το μηχανισμό του σχήματος 6.10.β. Το εκτεθειμένο υλικό βάσης (αλουμίνιο) παίζει το ρόλο της καθόδου και το επιφανειακό στρώμα της ανοδίσωσης αποτελεί την άνοδο. Αποτέλεσμα είναι η κατανάλωση της ανοδίσωσης με γαλβανική διάβρωση. Λόγω της μεγάλης επιφάνειας όμως της ανοδίσωσης προς την ακάλυπτη επιφάνεια του αλουμινίου στις ρωγμές συμβαίνει το φαινόμενο της πόλωσης με αποτέλεσμα την παύση της διαβρωτικής διεργασίας στα σημεία αυτά. Η κατανάλωση της

ανοδίωσης πλέον γίνεται λόγω της σχετικά υψηλής οξύτητας του διαλύματος και συνεχίζεται ομοιόμορφα. Χαρακτηριστική ήταν η επιφάνεια του δοκιμίου των δύο ωρών η οποία εμφάνιζε σημάδια διάβρωσης μόνο σε περιοχές γύρω από γδαρσίματα και κτυπήματα (σχήμα 6.10.α).



Σχήμα 6.10: Έναρξη της προσβολής από επιφανειακά ελαττώματα.

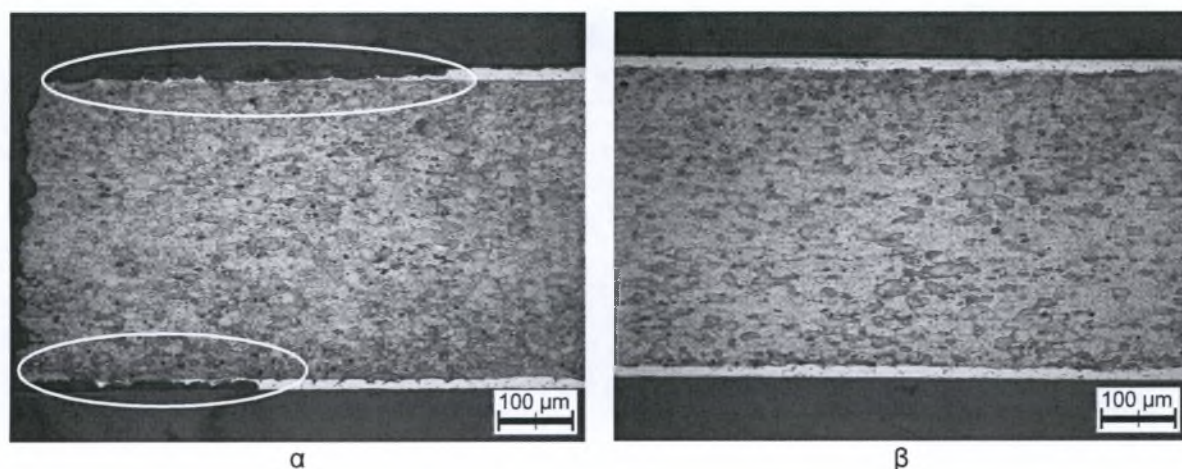
6.3 Συζήτηση των αποτελεσμάτων της δοκιμής Al.

Εννέα δοκίμια από την παρτίδα υλικού FCG2-a υποβλήθηκαν στη δοκιμή Al. Η δοκιμή Al είναι αρκετά πιο ήπια από την EXCO με αποτέλεσμα την όχι τόσο έντονη προσβολή των δοκιμίων. Μόνο οι ακμές τους και ορισμένα σημεία όπου προϋπήρχαν επιφανειακά ελαττώματα φαίνεται να έχουν προσβληθεί (σχήμα 6.11).

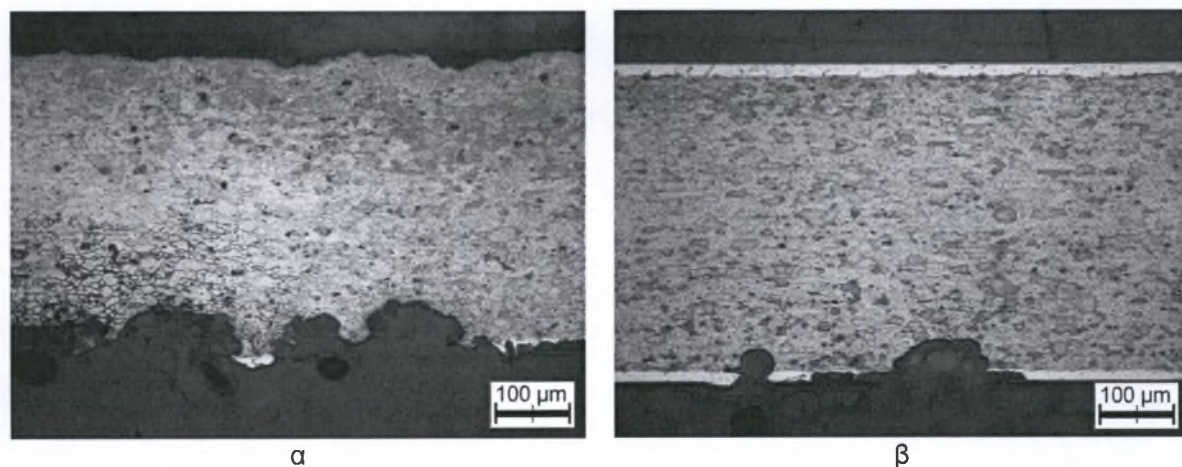


Σχήμα 6.11: Προσβολή στις ακμές και τα ελαττώματα της επιφάνειας των δοκιμίων.

Η οξύτητα του διαλύματος διατηρήθηκε σε όλη τη διάρκεια τη δοκιμής σε ουδέτερη τιμή (≈ 6.7), που είναι εντός των ορίων παθητικοποίησης του αλουμινίου. Επίσης, η τιμή αυτή της οξύτητας είναι ευνοϊκή για την χρωμική ανοδίσωση, η οποία προστατεύει αποτελεσματικά το υλικό σε ένα εύρος τιμών οξύτητας από 4 έως 8.5, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 3.5.2. Μόνο στις ακμές των δοκιμίων δημιουργήθηκε γαλβανική διάβρωση μεταξύ του αλουμινίου και της ανοδίσωσης με αποτέλεσμα την κατανάλωση του στρώματος ανοδίσωσης (σχήμα 6.12.β), ενώ στην υπόλοιπη επιφάνεια η ανοδίσωση ήταν άθικτη (σχήμα 6.12.α). Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η ανοδίσωση να αποτρέπει το σχηματισμό τρημματικής διάβρωσης στην κύρια επιφάνεια του υλικού. Μόνο στις ακμές των δοκιμίων (σχήμα 6.13.α) και σε επιφανειακά ελαττώματα (σχήμα 6.13.β) μπόρεσαν τα ιόντα χλωρίου του διαλύματος να προκαλέσουν τρήματα.

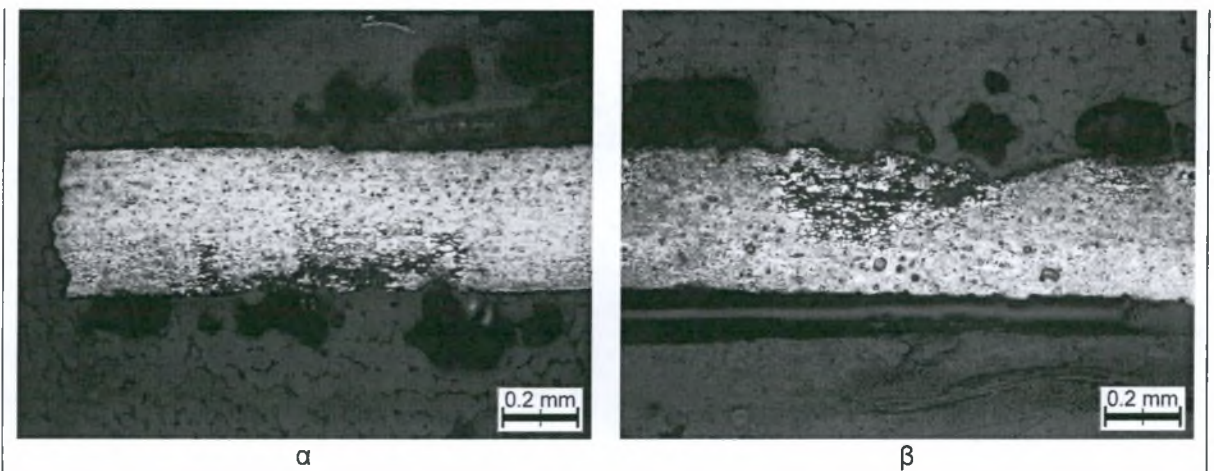


Σχήμα 6.12: Προσβολή της ανοδίσωσης. (α) στις άκρες, δοκίμιο Al(15), (β) στην εσωτερική επιφάνεια, δοκίμιο Al(75).



Σχήμα 6.13: Τρημματική διάβρωση στις απροστάτευτες περιοχές. (α) δοκίμιο Al(60), ακμή, (β) δοκίμιο Al(75), ασυνέχεια της χρωμικής ανοδίσωσης επέτρεψε το σχηματισμό τρημάτων.

Η συνέχιση της διαβρωτικής δράσης έχει συνέπεια την περικρυσταλλική διάβρωση της περιοχής των τρημάτων, τα όποια αναπτύσσονται παράλληλα στην κύρια επιφάνεια του υλικού επιφέροντας αποφλοίωση (σχήμα 6.14).



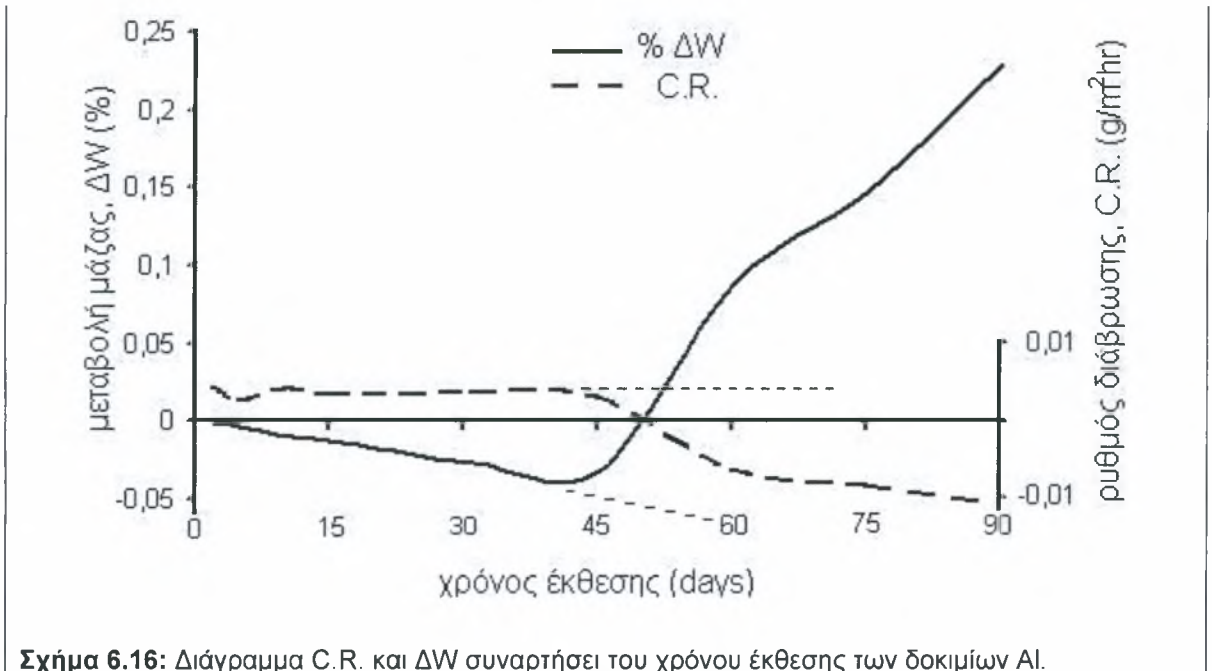
Σχήμα 6.14: Δοκίμιο Al(90), αποφλοίωση. (α) Τρηματική διάβρωση στη διαμήκη τομή του δοκιμίου που οδηγεί σε αποφλοίωση, (β) αποφλοίωση σε εγκάρσια τομή του δοκιμίου, .

Η εξέταση των δοκιμίων και των μεταλλογραφικών τομών τους σε στερεοσκόπιο και οπτικό μικροσκόπιο αντίστοιχα δείχνει ότι το εύρος της διαβρωτικής προσβολής είναι ανάλογο του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων, κάτι που συνεπάγεται σταθερό διαβρωτικό ρυθμό. Αντίθετα, οι καμπύλες του ρυθμού διάβρωσης και της απώλειας μάζας δείχνουν πτώση της ταχύτητας του διαβρωτικού φαινομένου και αρνητική απώλεια, δηλαδή αύξηση της μάζας των δοκιμίων, αντίστοιχα μετά τις 45 μέρες έκθεσης (σχήμα 6.16). Μέχρι και τις 30 μέρες η απώλεια μάζας των δοκιμίων φαίνεται σχεδόν γραμμική. Η αύξηση της μάζας των δοκιμίων με μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης οφείλεται σε δύο φαινόμενα. Καταρχήν δεν ήταν δυνατός ο πλήρης καθαρισμός των δοκιμίων από τα άλατα που είχαν συγκεντρωθεί σε ορισμένα δοκίμια κάτω από στρώμα ρητίνης στην εξωτερική επιφάνεια (σχήμα 6.15). Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο εισέρχονταν και παρέμεναν άλατα στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prerreg. Η παραμονή των αλάτων αυτών στα δοκίμια είναι κυρίως υπαίτια για την αυξημένη μάζα τους. Έπειτα, ο μεγαλύτερος χρόνος έκθεσης και η μεγαλύτερη εκτεθειμένη στο υγρό επιφάνεια του prerreg (λόγω της προσβολής της ανοδίσωσης της



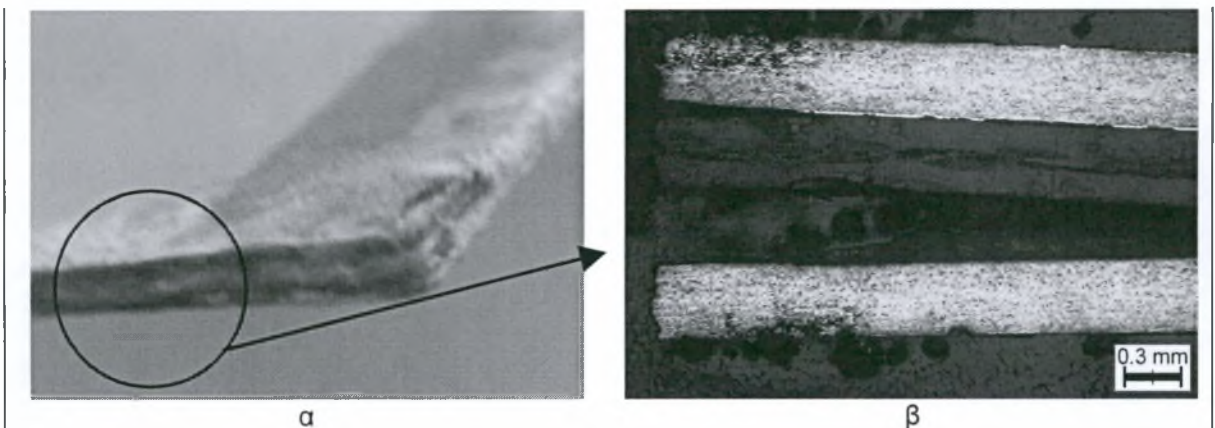
Σχήμα 6.15: Κατακράτηση αλάτων ανάμεσα σε ρητίνη και αλουμίνιο.

διεπιφάνειας) επέτρεψαν την απορρόφηση υγρασίας. Το Glare απορροφά ένα πολύ μικρό ποσοστό υγρασίας, το οποίο όμως εν συγκρίσει με την απώλεια μάζας του αλουμινίου στην προκειμένη περίπτωση είναι σημαντικό. Αποτέλεσμα της αύξησης της μάζας των δοκιμίων είναι και η πτώση του ρυθμού διάβρωσης (σχήμα 6.16) ο οποίος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μεταβολή μάζας των δοκιμίων. Η μορφή των καμπύλων του σχήματος 6.16 αναμένεται να πλησιάζει τις διακεκομμένες χωρίς την επιρροή των παραγόντων που αναφέρθηκαν παραπάνω για την αύξηση της μάζας των δοκιμίων.



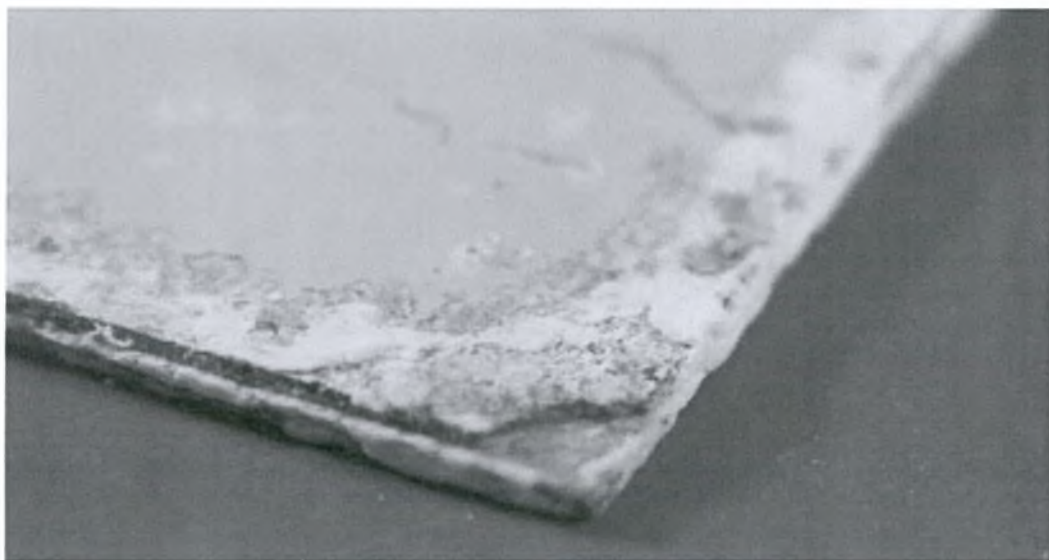
Σχήμα 6.16: Διάγραμμα C.R. και ΔW συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων Al.

Η συγκέντρωση αλάτων στη διεπιφάνεια αλουμινίου/prepreg ευθύνεται και για το μεταξύ τους διαχωρισμό και την αποκόλληση του αλουμινίου στα άκρα των δοκιμίων (σχήμα 6.17).



Σχήμα 6.17: Διαχωρισμός των στρωμάτων λόγω κατακράτησης αλάτων στη διεπιφάνεια.

Όπως και στα δοκίμια EXCO έτσι και στα δοκίμια Al η ύπαρξη του ενδιάμεσου στρώματος pgreg φαίνεται να εμποδίζει την εισχώρηση της διάβρωσης στα ενδότερα στρώματα του Glare. Στο σχήμα 6.18 φαίνεται ξεκάθαρα ότι ακόμα και στα σημεία που ολόκληρα κομμάτια αλουμινίου έχουν αποκολληθεί το στρώμα pgreg φαίνεται να είναι ανεπηρέαστο και επομένως αδιαπέραστο από το διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 6.18: Το διαβρωτικό περιβάλλον δεν επηρεάζει το pgreg.

Τέλος, η διαφορά στο εύρος της προσβολής της κάτω μόνο επιφάνειας σε σχέση με τις άλλες τρεις (σχήμα 6.19) δεν οφείλεται σε κάποιο μεταλλουργικό παράγοντα, παρά μόνο στον τρόπο που ήταν τα δοκίμια αναρτημένα στη δεξαμενή της δοκιμής. Αν υπήρχε επιρροή της διεύθυνσης έλασης στη διαβρωτική προσβολή τότε η πάνω και η κάτω ακμή των δοκιμίων θα έπρεπε να παρουσιάζουν παρόμοια κατάσταση. Η διαφορά της κάτω ακμής από τις υπόλοιπες οφείλεται στην διαφορετική δυνατότητα εισχώρησης του διαβρωτικού διαλύματος κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.



Σχήμα 6.19: Δοκίμιο Al(45) όπως ήταν αναρτημένο στο διαβρωτικό διάλυμα.

6.4 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Οι δύο δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης που πραγματοποιήθηκαν οδηγούν στα εξής συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του υλικού Glare στα αντίστοιχα διαβρωτικά περιβάλλοντα:

(α) η χρωμική ανοδίωση προστατεύει σε μεγάλο βαθμό το υλικό → Σε χαμηλές τιμές pH (υψηλή οξύτητα) και σε περιπτώσεις διάβρωσης θυσιάζεται καθυστερώντας την προβολή του κυρίως υλικού, επιβραδύνοντας με αυτό τον τρόπο τη διαβρωτική δράση. Σε ουδέτερες τιμές pH αποτρέπει την εξέλιξη τρημματικής διάβρωσης,

(β) η θειική ανοδίωση φαίνεται να προστατεύει καλύτερα το υλικό από τη διαβρωτική δράση, όμως είναι πιθανό να είναι αιτία της πρόκλησης delamination,

(γ) τα ενδιάμεσα στρώματα prepreg εμποδίζουν τη διαβρωτική προσβολή να εισχωρήσει στα ενδότερα στρώματα του Glare,

(δ) η διάβρωση φαίνεται να εξελίσσεται περικρυσταλλικά,

(ε) η διαβρωτική δράση άρχεται από ελαττωματικές περιοχές της επιφάνειας → Σε χαμηλές τιμές pH η πόλωση των καθοδικών περιοχών προκαλεί την παύση της διαβρωτικής δράσης. Σε πιο ουδέτερες τιμές pH, θεωρητικά από 4 έως 8.5, ευνοείται ο σχηματισμός τρημάτων και

(στ) η διάβρωση επίσης ξεκινάει από τα απροστάτευτα άκρα των δοκιμών, όπου οι καθοδικές επιφάνειες είναι αρκετά μεγάλες για να προκληθεί πόλωση. Επίσης, εμφανίζεται σχισματική διάβρωση μετά την κατανάλωση της χρωμικής ανοδίωσης στη διεπιφάνεια.

Τα παραπάνω συμπεράσματα αποτελούν μια πρώτη γενική εικόνα της προσβολής του υλικού. Προσεκτικότερη μελέτη πρέπει να γίνει στους μικρούς χρόνους έκθεσης για το μηχανισμό έναρξης της προσβολής, ίσως με μικροσκοπία ατομικής δύναμης (AFM). Μικροσκοπία ηλεκτρονιακής σάρωσης (SEM) θα δώσει ακριβέστερα συμπεράσματα για την εξέλιξη της διαβρωτικής δράσης. Χημική ανάλυση των φάσεων με EDX θα βοηθήσει στην διερεύνηση της συνολικής θερμικής επεξεργασίας που γίνεται στα φύλλα αλουμινίου του Glare και συνεπώς της επιρροής στη διαβρωτική δράση. Τέλος, χρήσιμη είναι η πραγματοποίηση των πειραμάτων με δοκίμια:

(α) με καλυμμένες άκρες για διερεύνηση της αντοχής της χρωμικής ανοδίωσης σε περίπτωση που δεν υπάρχουν έντονα καθοδικές περιοχές (απροστάτευτα άκρα αλουμινίου), ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα χαμηλού pH,

(β) με διαφορετική επιπλέον επιφανειακή προστασία (π.χ. θειική ανοδίωση, primer, χρώμα, κλπ) για τη διερεύνηση της επίδρασης στο διαβρωτικό ρυθμό,

(γ) με καλύτερη επιφανειακή κατάσταση, απαλλαγμένη από ελαττώματα (ασυνέχεια της ανοδίωσης) και παραμένουσες τάσεις για τη διερεύνηση ειδικά της αντίστασης σε τρημματική διάβρωση σε ουδέτερα περιβάλλοντα και

(δ) φύλλων αλουμινίου 2024-T3 πάχους 0.4mm, χωρίς να έχουν υποστεί τον επιπλέον θερμικό κύκλο του Glare (curing cycle).

Παράρτημα Α: Μητρώα πειραματικών δοκιμών.

Α.1 Μητρώα δοκιμών δοκιμής EXCO.

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E1(48) Υλικό: chr. stripe	Χρόνος έκθεσης (hr): 48
μήκος (mm) = 99,22	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 13/4/2005
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,18	ώρα: 14:00
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 15/4/2005
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 52,18	ώρα: 14:00
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,7	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): W_{in} = 12,79	Αρχική οξύτητα διαλύτος: pH_{in} =
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): W_{out} = 12,61	Τελική οξύτητα διαλύτος: pH_{out} =
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W)$ = 0,18	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH)$ = 0,00
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα Α.1: Μητρώο δοκιμίου E1(48).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E1(96) Υλικό: chr. stripe	Χρόνος έκθεσης (hr): 96
μήκος (mm) = 100,48	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 14/4/2005
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,04	ώρα: 12:45
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 18/4/2005
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 52,6885	ώρα: 12:45
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,5	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): W_{in} = 13,09	Αρχική οξύτητα διαλύτος: pH_{in} =
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): W_{out} = 12,32	Τελική οξύτητα διαλύτος: pH_{out} =
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W)$ = 0,77	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH)$ = 0,00
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: EB	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα Α.2: Μητρώο δοκιμίου E1(96).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E2(48) Υλικό: sul. stripe	Χρόνος έκθεσης (hr): 48
μήκος (mm) = 100,08	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 13/4/2005
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,12	ώρα: 14:00
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 15/4/2005
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 52,5633	ώρα: 14:00
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,5	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,65$	Αρχική οξύτητα διαλύτος: $pH_{in} =$
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 13,49$	Τελική οξύτητα διαλύτος: $pH_{out} =$
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,16$	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH) = 0,00$
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.3: Μητρώο δοκιμίου E2(48).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E2(96) Υλικό: sul. stripe	Χρόνος έκθεσης (hr): 96
μήκος (mm) = 99,06	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 14/4/2005
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 49,96	ώρα: 12:45
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 18/4/2005
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 51,8747	ώρα: 12:45
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,9	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,42$	Αρχική οξύτητα διαλύτος: $pH_{in} =$
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 12,87$	Τελική οξύτητα διαλύτος: $pH_{out} =$
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,55$	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH) = 0,00$
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: EB	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.4: Μητρώο δοκιμίου E2(96).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E4(02) Υλικό: FCG4-c	Χρόνος έκθεσης (hr): 2
μήκος (mm) = 100,36	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 7/12/2005
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,66	ώρα: 16:00
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 7/12/2005
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 53,26	ώρα: 18:00
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,2	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 16,31$	Αρχική οξύτητα διαλύτος: $pH_{in} = 0,37$
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 16,30$	Τελική οξύτητα διαλύτος: $pH_{out} = 0,40$
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,01$	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH) = 0,03$
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.5: Μητρώο δοκιμίου E4(02).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E4(24) Υλικό: FCG4-c	Χρόνος έκθεσης (hr): 24
μήκος (mm) = 100,42	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 7/12/2005
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,60	ώρα: 16:36
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 8/12/2005
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 53,23	ώρα: 16:36
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,2	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 16,19$	Αρχική οξύτητα διαλύτος: $pH_{in} = 0,41$
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 15,94$	Τελική οξύτητα διαλύτος: $pH_{out} = 0,46$
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,25$	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH) = 0,05$
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.6: Μητρώο δοκιμίου E4(24).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E4(30) Υλικό: FCG4-c	Χρόνος έκθεσης (hr): 30
μήκος (mm) = 100,08	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 12/4/2006
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,14	ώρα: 10:48
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 13/4/2006
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 52,58	ώρα: 16:48
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,5	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 15,834$	Αρχική οξύτητα διαλύτος: $pH_{in} = 0,42$
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 15,452$	Τελική οξύτητα διαλύτος: $pH_{out} = 0,55$
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,38$	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH) = 0,13$
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: N/P	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.7: Μητρώο δοκιμίου E4(30).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E4(36) Υλικό: FCG4-c	Χρόνος έκθεσης (hr): 36
μήκος (mm) = 100,16	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 27/2/2006
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,10	ώρα: 21:00
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 1/3/2006
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 52,5843	ώρα: 9:00
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,5	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 16,023$	Αρχική οξύτητα διαλύτος: $pH_{in} = 0,50$
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 15,513$	Τελική οξύτητα διαλύτος: $pH_{out} = 0,73$
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,51$	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH) = 0,23$
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: P/EA	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.8: Μητρώο δοκιμίου E4(36).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E4(48) Υλικό: FCG4-c	Χρόνος έκθεσης (hr): 48
μήκος (mm) = 100,54	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 7/12/2005
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,18	ώρα: 17:08
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 9/12/2005
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 52,8625	ώρα: 17:08
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,4	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 16,09$	Αρχική οξύτητα διαλύτος: $pH_{in} = 0,47$
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 15,28$	Τελική οξύτητα διαλύτος: $pH_{out} = 1,47$
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,81$	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH) = 1,00$
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: EA	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.9: Μητρώο δοκιμίου E4(48).

Μητρώο δοκιμίου Exfoliation Corrosion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: E4(96) Υλικό: FCG4-c	Χρόνος έκθεσης (hr): 96
μήκος (mm) = 100,60	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 9/12/2005
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,26	ώρα: 14:15
πάχος (mm) = -	πέρασ έκθεσης δοκιμίου: 13/12/2005
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 52,9753	ώρα: 14:15
Όγκος διαλύματος/Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (mL/cm ²): 28,3	
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 16,13$	Αρχική οξύτητα διαλύτος: $pH_{in} = 0,50$
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 15,31$	Τελική οξύτητα διαλύτος: $pH_{out} = 3,39$
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,82$	Μεταβολή οξύτητας $\Delta(pH) = 2,89$
Χαρακτηρισμός παρατηρούμενης επιφάνειας δοκιμίου βάσει ASTM G34: EA	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.10: Μητρώο δοκιμίου E4(96).

Μητρώο δοκιμίου Alternate Immersion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: Al(10) Υλικό: FCG2-a	Χρόνος έκθεσης (ds): 10
μήκος (mm) = 97,34	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 17/3/2006
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 50,06	ώρα: 12:45
πάχος (mm) = 1,4	πέρας έκθεσης δοκιμίου: 27/3/2006
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 99,8152	ώρα:
Θέση στη συσκευή: 2.1	Χρόνος εμβάπτισης: 10 min/hr
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,142$	Μέση τιμή οξύτητας του διαλύματος κατά την έκθεση του δοκιμίου: pH = 6.6
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 13,132$	
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,010$	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας I του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας II του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.13: Μητρώο δοκιμίου Al(10).

Μητρώο δοκιμίου Alternate Immersion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: Al(15) Υλικό: FCG2-a	Χρόνος έκθεσης (ds): 15
μήκος (mm) = 96,58	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 17/3/2006
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 49,88	ώρα: 12:45
πάχος (mm) = 1,38	πέρας έκθεσης δοκιμίου: 1/4/2006
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 98,6916	ώρα:
Θέση στη συσκευή: 2.4	Χρόνος εμβάπτισης: 10 min/hr
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,272$	Μέση τιμή οξύτητας του διαλύματος κατά την έκθεση του δοκιμίου: pH = 6.62
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 13,260$	
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,012$	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας I του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας II του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.14: Μητρώο δοκιμίου Al(15).

Μητρώο δοκιμίου Alternate Immersion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: Al(31) Υλικό: FCG2-a	Χρόνος έκθεσης (ds): 31
μήκος (mm) = 97,86	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 14/4/2006
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 49,88	ώρα: 12:25
πάχος (mm) = 1,36	πέρας έκθεσης δοκιμίου: 15/5/2006
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 99,989	ώρα: 12:25
Θέση στη συσκευή: 2.1	Χρόνος εμβάπτισης: 10 min/hr
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,118$	Μέση τιμή οξύτητας του διαλύματος κατά την έκθεση του δοκιμίου: pH = 6.61
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 13,091$	
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,027$	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας I του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας II του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.15: Μητρώο δοκιμίου Al(31).

Μητρώο δοκιμίου Alternate Immersion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: Al(45) Υλικό: FCG2-a	Χρόνος έκθεσης (ds): 45
μήκος (mm) = 98	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 24/3/2006
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 48,96	ώρα: 12:45
πάχος (mm) = 1,5	πέρας έκθεσης δοκιμίου: 8/5/2006
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 98,313	ώρα:
Θέση στη συσκευή: 4.3	Χρόνος εμβάπτισης: 10 min/hr
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,780$	Μέση τιμή οξύτητας του διαλύματος κατά την έκθεση του δοκιμίου: pH = 6.6
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 13,748$	
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = 0,032$	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας I του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας II του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.16: Μητρώο δοκιμίου Al(45).

Μητρώο δοκιμίου Alternate Immersion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: Al(60) Υλικό: FCG2-a	Χρόνος έκθεσης (ds): 60
μήκος (mm) = 97,76	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 17/3/2006
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 48,98	ώρα: 12:45
πάχος (mm) = 1,46	πέρας έκθεσης δοκιμίου: 16/5/2006
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 98,1135	ώρα: 13:45
Θέση στη συσκευή: 1.4	Χρόνος εμβάπτισης: 10 min/hr
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,785$	Μέση τιμή οξύτητας του διαλύματος κατά την έκθεση του δοκιμίου: pH = 6.6
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 13,873$	
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = -0,088$	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας I του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N/P	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας II του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N/P	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.17: Μητρώο δοκιμίου Al(60).

Μητρώο δοκιμίου Alternate Immersion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής
Δοκίμιο: Al(75) Υλικό: FCG2-a	Χρόνος έκθεσης (ds): 75
μήκος (mm) = 96,82	έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 17/3/2006
Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 49,7	ώρα: 12:45
πάχος (mm) = 1,36	πέρας έκθεσης δοκιμίου: 31/5/2006
Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 98,5834	ώρα: 13:45
Θέση στη συσκευή: 3.1	Χρόνος εμβάπτισης: 10 min/hr
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής	
Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,273$	Μέση τιμή οξύτητας του διαλύματος κατά την έκθεση του δοκιμίου: pH = 6.6
Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 13,421$	
Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = -0,148$	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας I του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N/P	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας II του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N/P	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.18: Μητρώο δοκιμίου Al(75).

Μητρώο δοκιμίου Alternate Immersion Test	
Τόπος διεξαγωγής πειράματος: Εργαστήριο Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.	
Στοιχεία δοκιμίου Δοκίμιο: Al(90) Υλικό: FCG2-a μήκος (mm) = 97,66 Διαστάσεις δοκιμίου: πλάτος (mm) = 49,34 πάχος (mm) = 1,4 Επιφάνεια έκθεσης δοκιμίου (cm ²) = 98,7229 Θέση στη συσκευή: 3.4	Χρονοδιάγραμμα δοκιμής Χρόνος έκθεσης (ds): 90 έναρξη έκθεσης δοκιμίου: 17/3/2006 ώρα: 12:45 πέρας έκθεσης δοκιμίου: 15/6/2006 ώρα: 13:45 Χρόνος εμβάπτισης: 10 min/hr
Ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμής Αρχικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{in} = 13,272$ Τελικό βάρος δοκιμίου (gr): $W_{out} = 13,501$ Απώλεια μάζας (gr): $\Delta(W) = -0,229$ Μέση τιμή οξύτητας του διαλύματος κατά την έκθεση του δοκιμίου: pH = 6.61	
Χαρακτηρισμός της επιφάνειας I του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N/P/EA Χαρακτηρισμός της επιφάνειας II του δοκιμίου βάσει ASTM G34: N/P/EA	
Παρατηρήσεις:	

Σχήμα A.19: Μητρώο δοκιμίου Al(90).

Παράρτημα Β: Μετρήσεις συνθηκών δοκιμής ΑΙ.

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τις τιμές pH διαλύματος, θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος για τη δοκιμή ΑΙ τις μέρες που ήταν δυνατή η πρόσβαση στο εργαστήριο. Τα όρια των τιμών που ορίζονται για τη δοκιμή στην αντίστοιχη προδιαγραφή είναι: $6.4 < \text{pH} < 7.2$, $26 < T < 28$ (°C) και $35 < \text{RH} < 55$ (%).

Πίνακας Β.1: Μητρώο μετρήσεων δοκιμής ΑΙ.

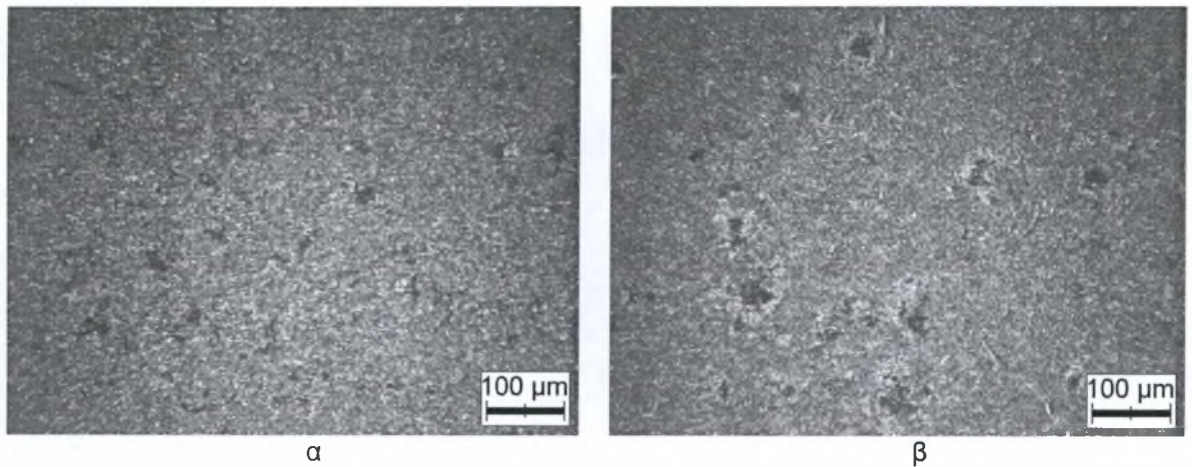
Ημερομηνία	pH διαλύματος	απόκλιση pH	T χώρου (°C)	απόκλιση T	RH χώρου (%)	απόκλιση RH	
Παρασκευή	17/03/2006	6,79	0%	25,2	3,08%	34	2,86%
Κυριακή	19/03/2006	6,50	0%	22,7	12,69%	34	2,86%
Δευτέρα	20/03/2006	6,46	0%	25,4	2,31%	33	5,71%
Τρίτη	21/03/2006	6,57	0%	25,5	1,92%	33	5,71%
Παρασκευή	24/03/2006	6,58	0%	24,0	7,69%	34	2,86%
Δευτέρα	27/03/2006	6,67	0%	25,1	3,46%	38	0%
Τρίτη	28/03/2006	6,63	0%	23,9	8,08%	36	0%
Τετάρτη	29/03/2006	6,67	0%	23,0	11,54%	41	0%
Πέμπτη	30/03/2006	6,61	0%	24,8	4,62%	30	14,29%
Σάββατο	1/04/2006	6,67	0%	25,1	3,46%	31	11,43%
Δευτέρα	3/04/2006	6,71	0%	22,8	12,31%	42	0%
Τρίτη	4/04/2006	6,72	0%	23,0	11,54%	34	2,86%
Τετάρτη	5/04/2006	6,63	0%	24,5	5,77%	35	0%
Πέμπτη	6/04/2006	6,50	0%	24,2	6,92%	37	0%
Παρασκευή	7/04/2006	6,72	0%	24,2	6,92%	38	0%
Δευτέρα	10/04/2006	6,44	0%	21,5	17,31%	37	0%
Τρίτη	11/04/2006	6,41	0%	23,6	9,23%	34	2,86%
Τετάρτη	12/04/2006	6,43	0%	23,6	9,23%	41	0%
Πέμπτη	13/04/2006	6,52	0%	26,5	0%	30	14,29%
Παρασκευή	14/04/2006	6,78	0%	26,3	0%	30	14,29%
Τρίτη	18/04/2006	6,45	0%	23,9	8,08%	46	0%
Πέμπτη	20/04/2006	6,56	0%	24,1	7,31%	41	0%
Πέμπτη	27/04/2006	6,42	0%	23,8	8,46%	36	0%
Τετάρτη	3/05/2006	6,80	0%	23,1	11,15%	39	0%
Πέμπτη	4/05/2006	6,84	0%	23,7	8,85%	31	11,43%
Παρασκευή	5/05/2006	6,60	0%	21,6	16,92%	37	0%
Δευτέρα	8/05/2006	6,46	0%	22,8	12,31%	40	0%
Τρίτη	9/05/2006	6,50	0%	23,9	8,08%	42	0%
Δευτέρα	15/05/2006	6,67	0%	25,3	2,69%	35	0%
Τρίτη	16/05/2006	6,76	0%	26,0	0,00%	36	0%
Τετάρτη	17/05/2006	6,70	0%	26,2	0,00%	36	0%
Πέμπτη	18/05/2006	6,73	0%	25,8	0,77%	35	0%
Παρασκευή	19/05/2006	6,61	0%	26,9	0%	42	0%
Δευτέρα	22/05/2006	6,47	0%	28,5	1,79%	34	2,86%
Τετάρτη	24/05/2006	6,49	0%	26,8	0%	49	0%
Δευτέρα	29/05/2006	6,65	0%	27,8	0%	36	0%
Τρίτη	30/05/2006	6,63	0%	27,5	0%	31	11,43%
Παρασκευή	2/06/2006	6,72	0%	28,2	0,71%	39	0%
Τετάρτη	14/06/2006	6,69	0%	27,5	0%	37	0%
Πέμπτη	15/06/2006	6,71	0%	27,9	0%	42	0%

Ο επόμενος πίνακας περιέχει τις τιμές οξύτητας, ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ειδικής αντίστασης του νερού που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του κάθε διαλύματος.

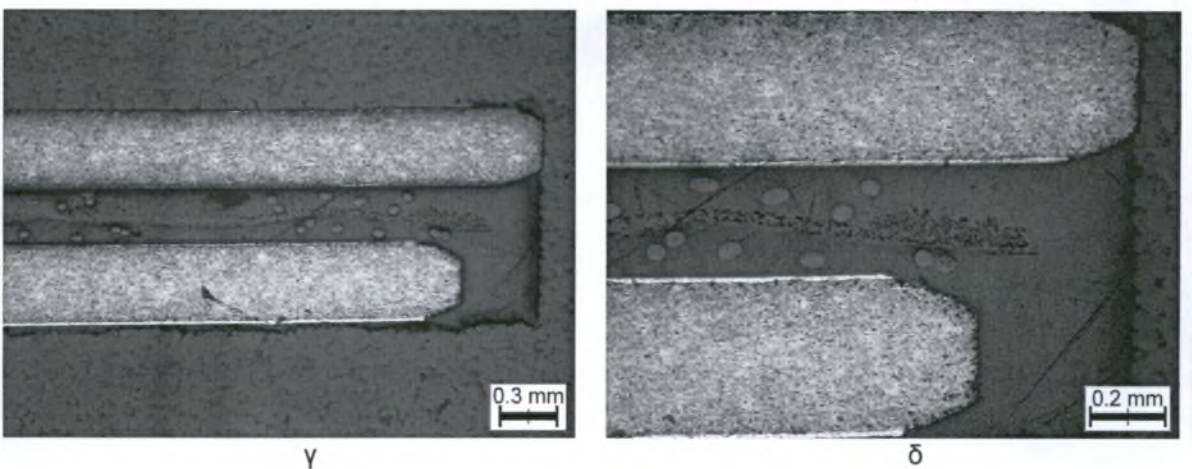
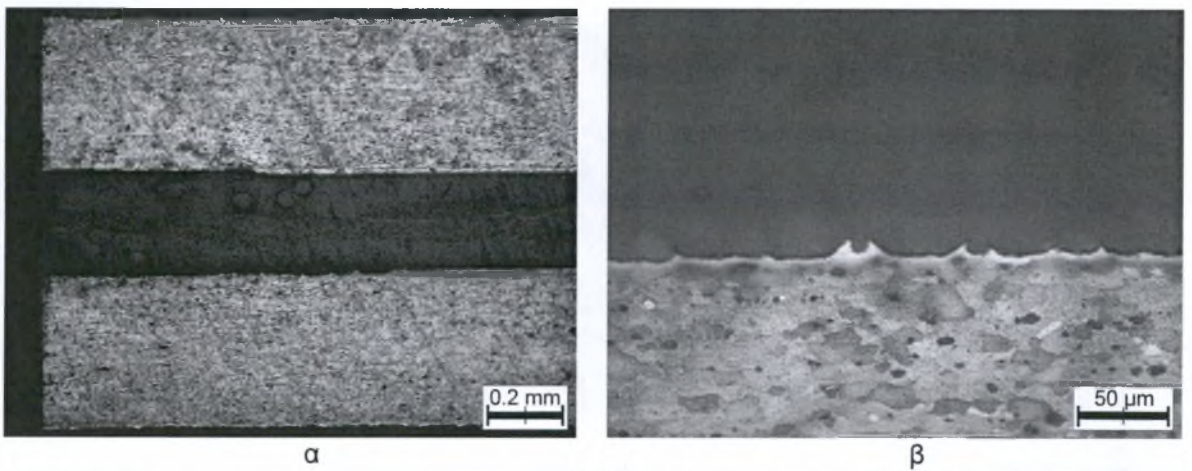
Πίνακας Β.2: Μετρήσεις νερού διαλύματος δοκιμής ΑΙ.

Ημερομηνία	pH	αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ειδική αντίσταση ($\text{M}\Omega\ \text{cm}$)
Παρασκευή 17/03/2006	6,83	2,37	0,42
Παρασκευή 24/03/2006	7,18	1,86	0,54
Παρασκευή 7/04/2006	7,38	1,24	0,81
Παρασκευή 14/04/2006	7,25	1,89	0,53
Παρασκευή 5/05/2006	7,44	2,60	0,38
Παρασκευή 19/05/2006	7,4	2,56	0,39
Παρασκευή 2/06/2006	7,52	2,31	0,43

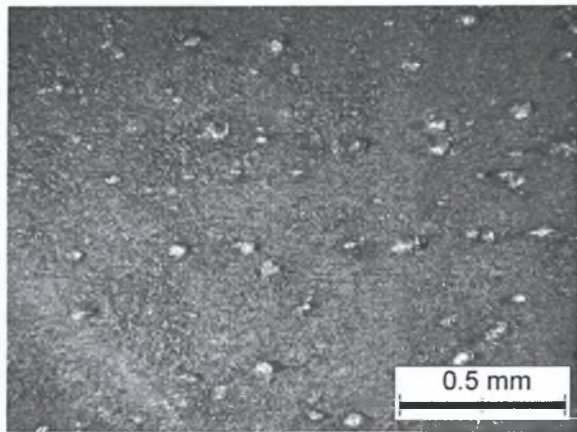
Παράρτημα Γ: Στερεοσκοπία και οπτική μικροσκοπία δοκιμίων δοκιμής EXCO.



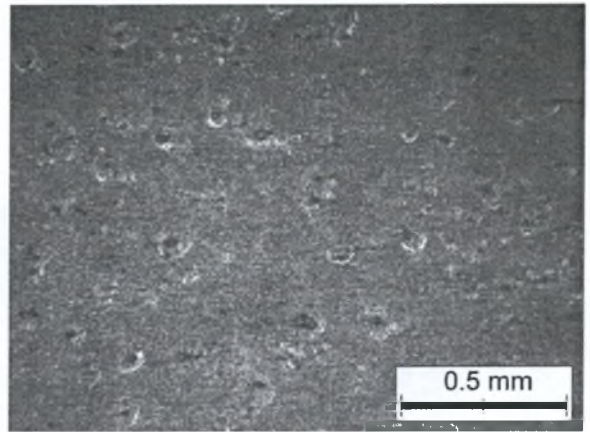
Σχήμα Γ.1: Δοκίμιο E1(48), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



Σχήμα Γ.2: Δοκίμιο E1(48), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

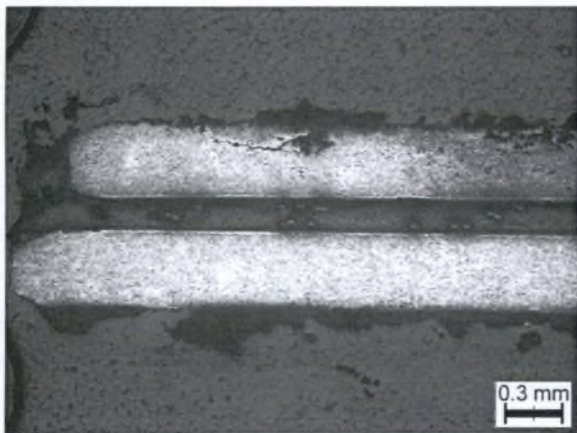


α

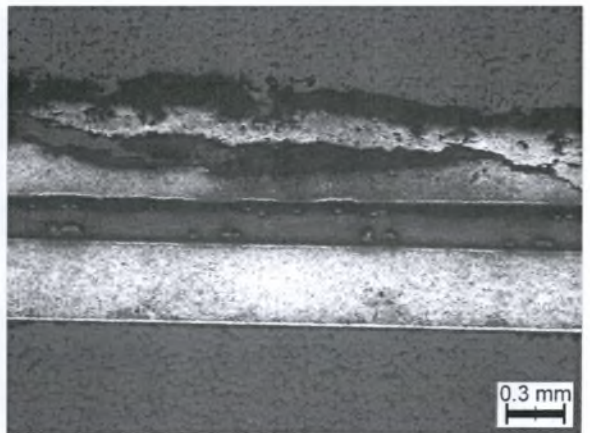


β

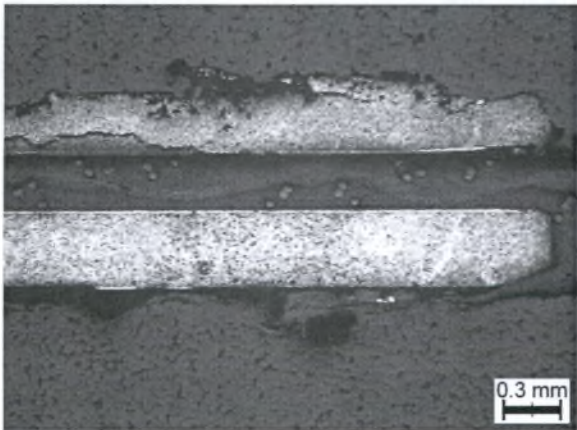
Σχήμα Γ.3: Δοκίμιο E1(96), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



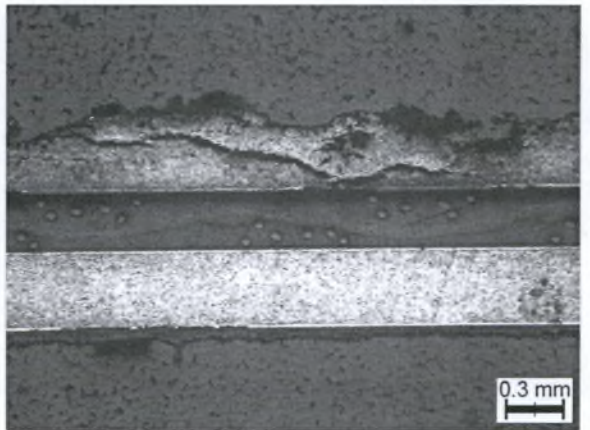
α



β

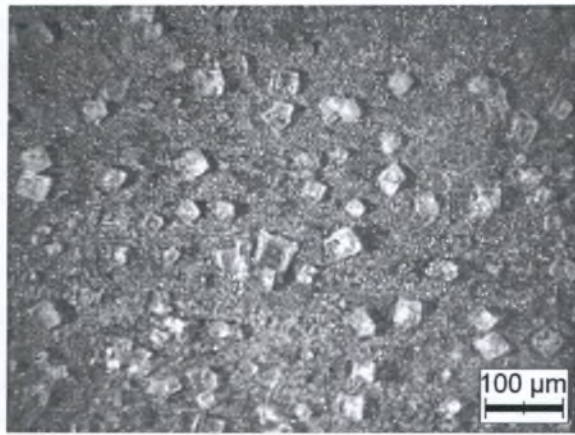


γ

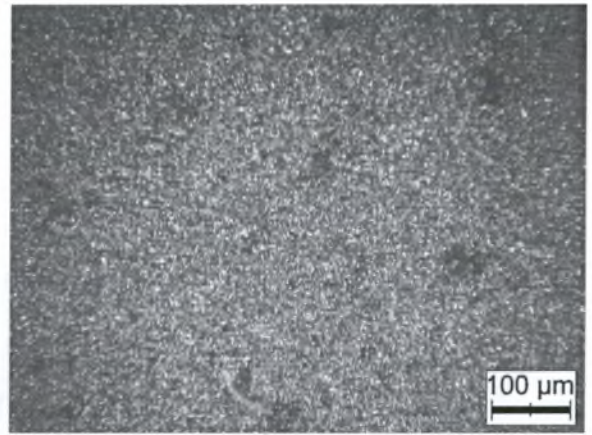


δ

Σχήμα Γ.4: Δοκίμιο E1(96), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

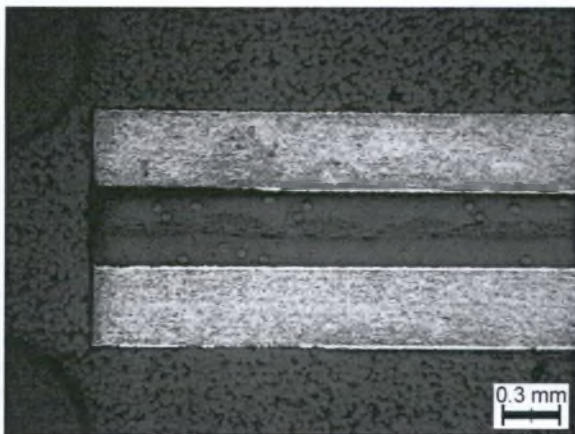


α

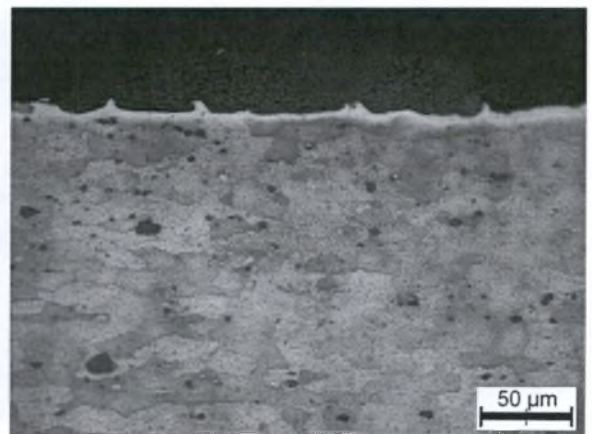


β

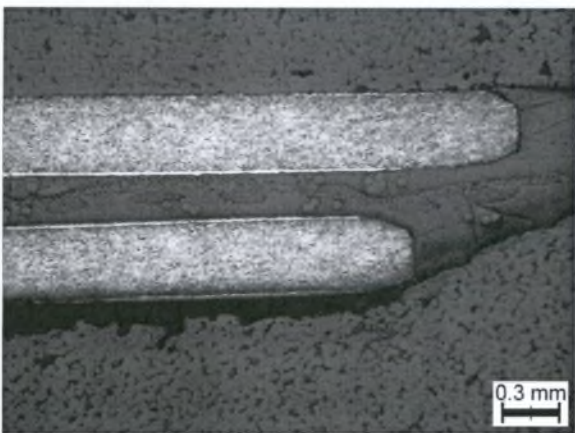
Σχήμα Γ.5: Δοκίμιο E2(48), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



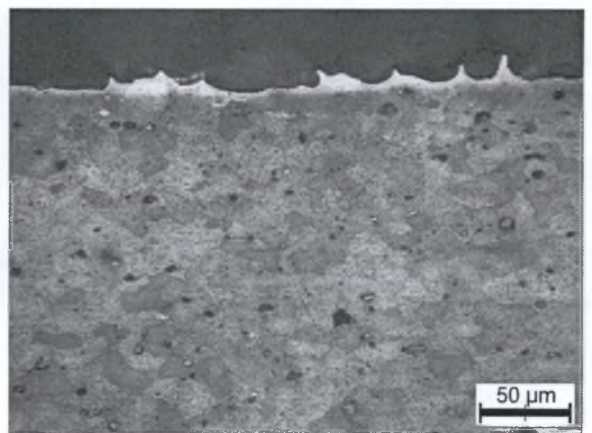
α



β

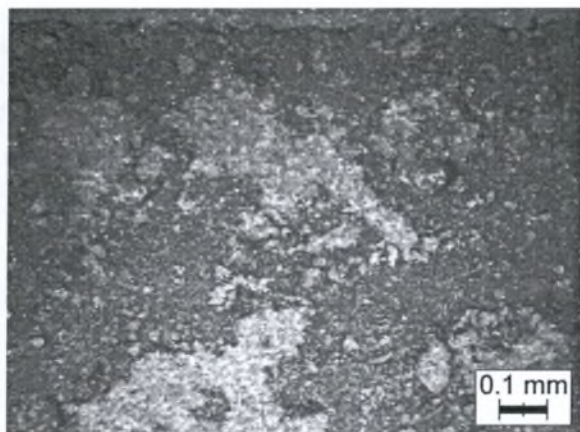


γ

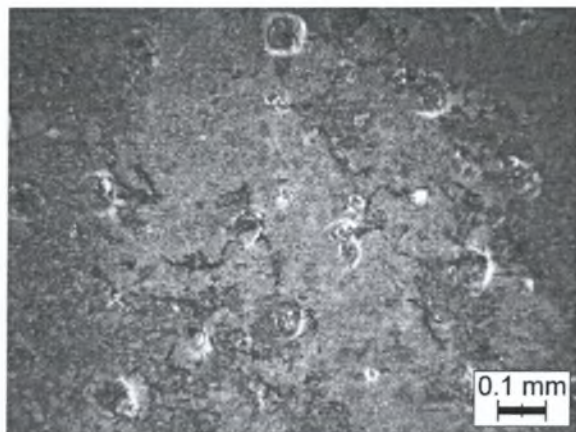


δ

Σχήμα Γ.6: Δοκίμιο E2(48), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

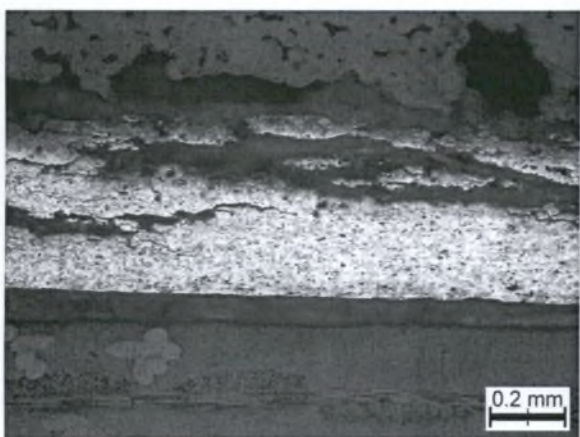


α

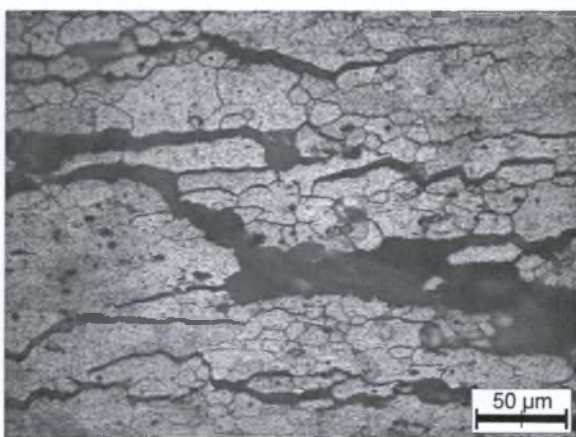


β

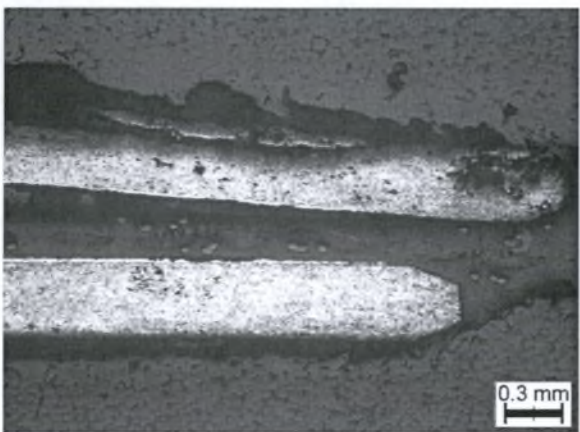
Σχήμα Γ.7: Δοκίμιο E2(96), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



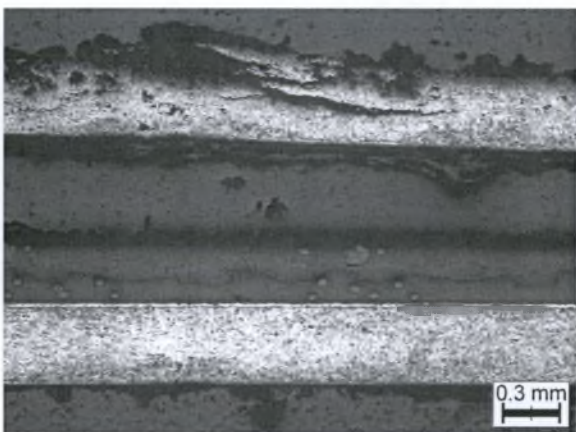
α



β

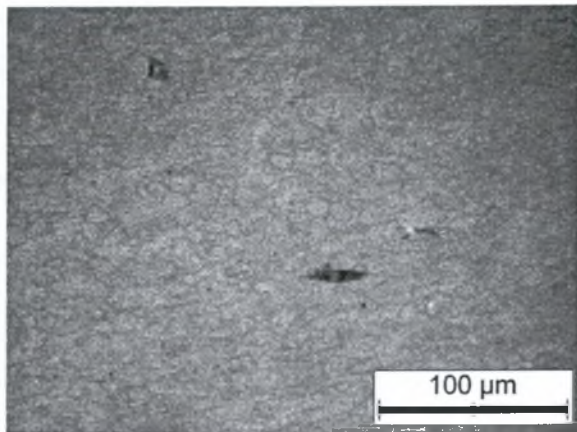


γ

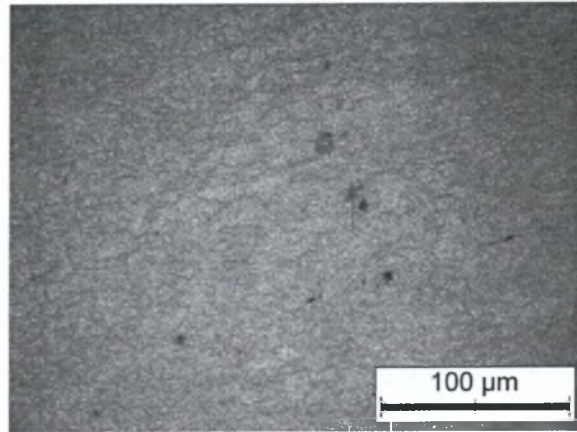


δ

Σχήμα Γ.8: Δοκίμιο E2(96), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

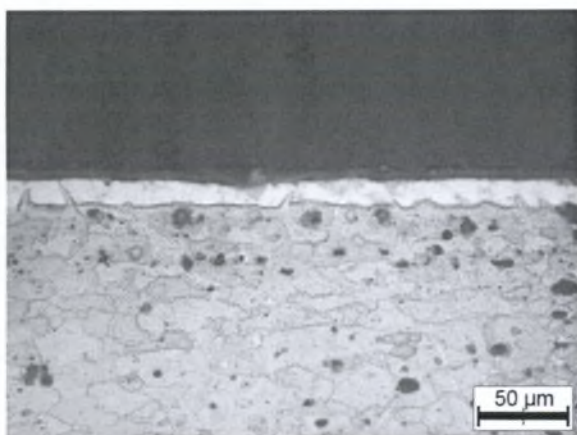


α

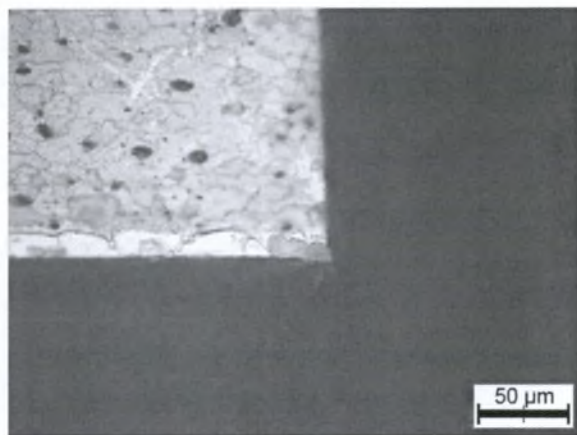


β

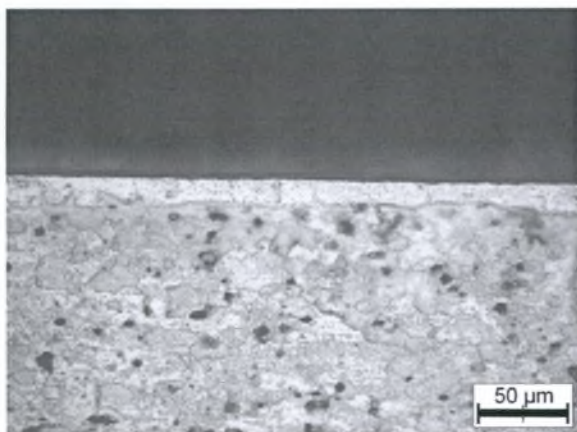
Σχήμα Γ.9: Δοκίμιο E4(02), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) και (β) μετά τον καθαρισμό.



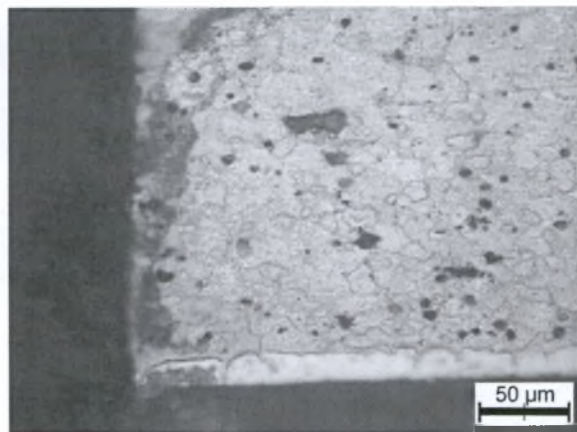
α



β

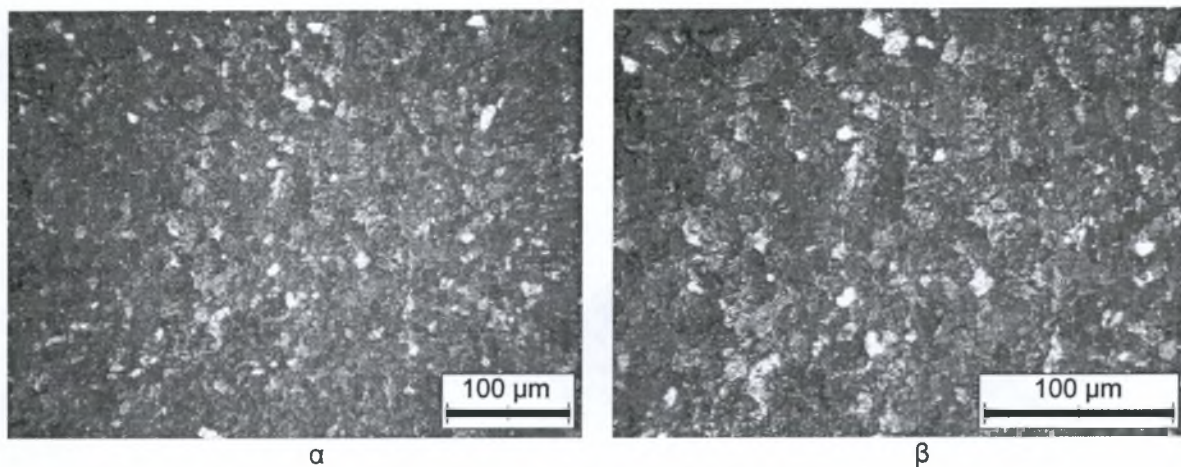


γ

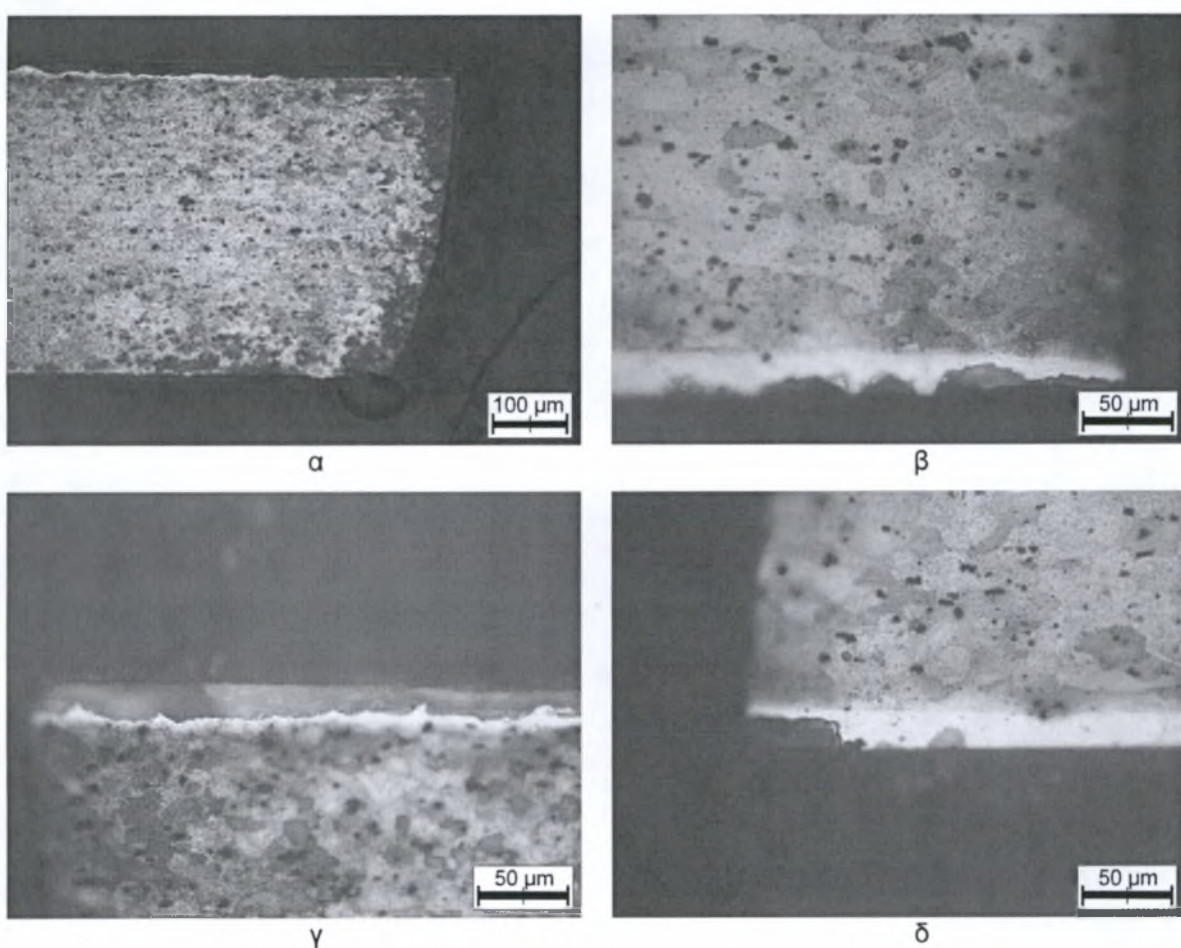


δ

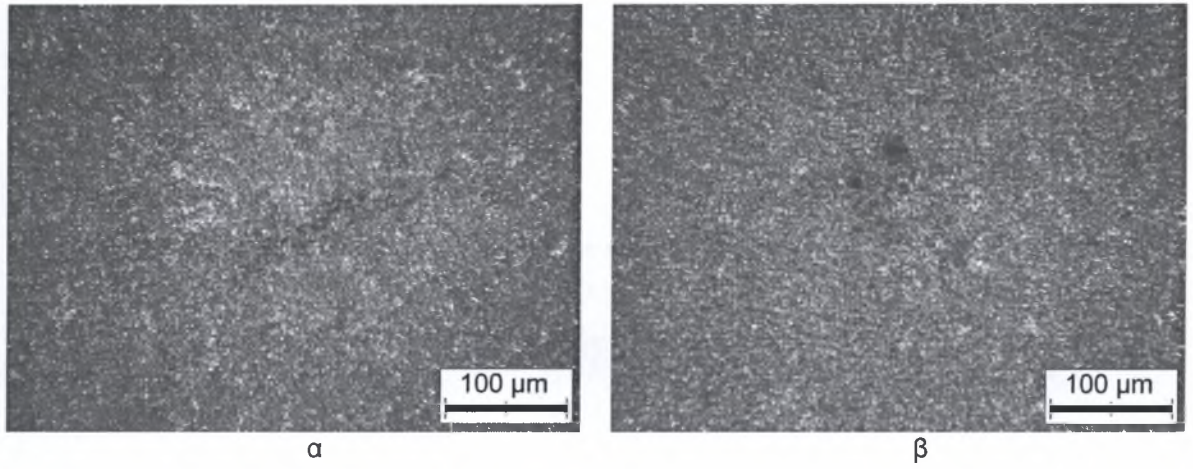
Σχήμα Γ.10: Δοκίμιο E4(02), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.



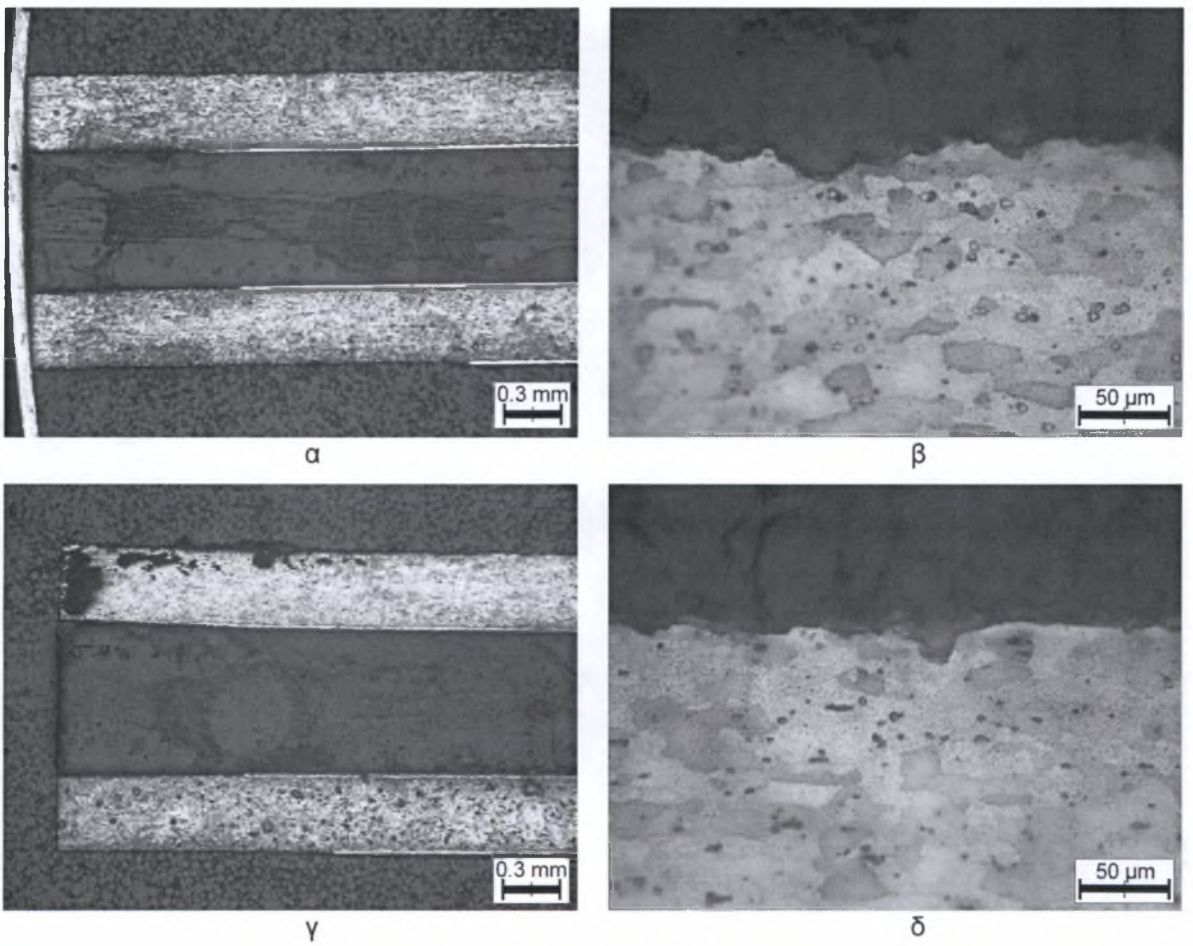
Σχήμα Γ.11: Δοκίμιο E4(24), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) και (β) μετά τον καθαρισμό.



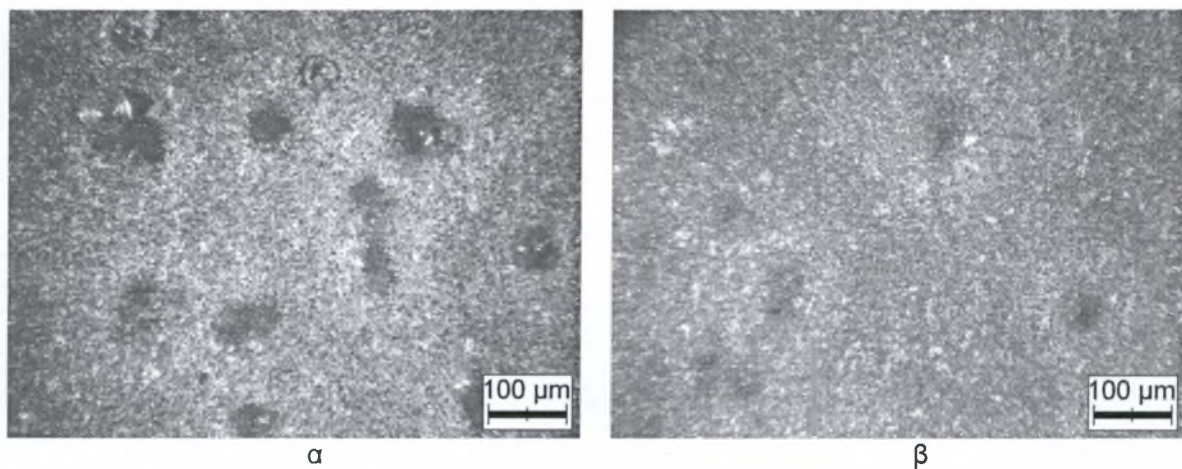
Σχήμα Γ.12: Δοκίμιο E4(24), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.



Σχήμα Γ.13: Δοκίμιο E4(30), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) και (β) μετά τον καθαρισμό.



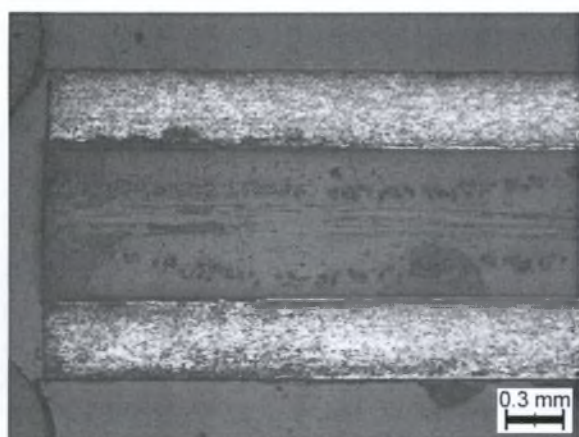
Σχήμα Γ.14: Δοκίμιο E4(30), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.



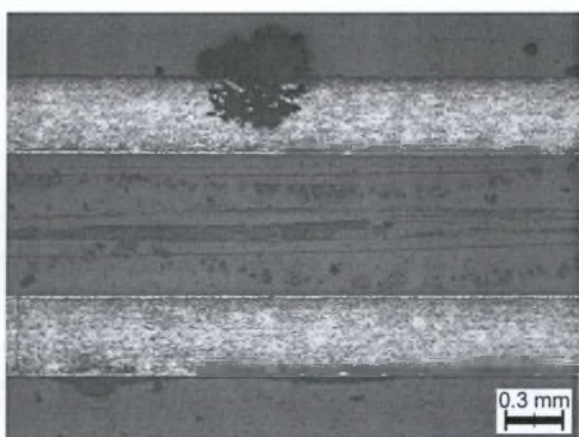
α

β

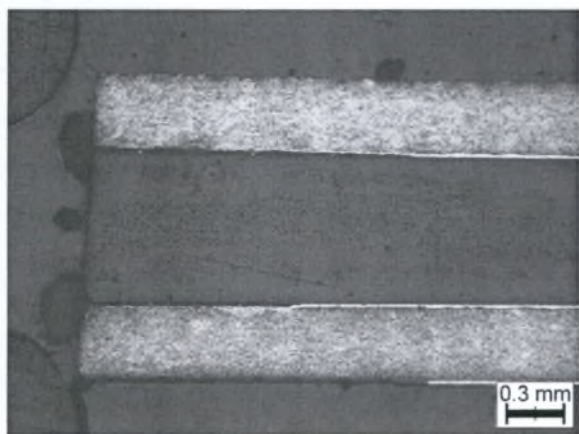
Σχήμα Γ.15: Δοκίμιο E4(36), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



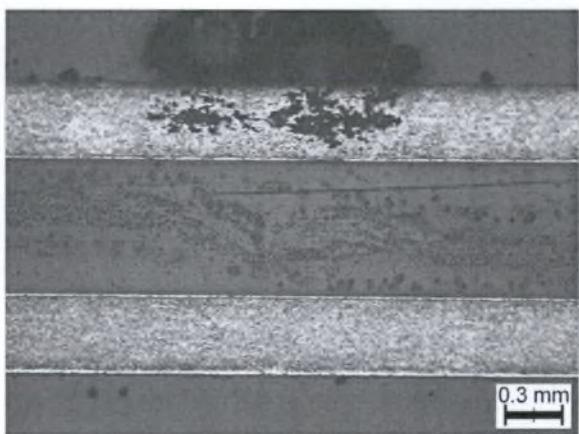
α



β

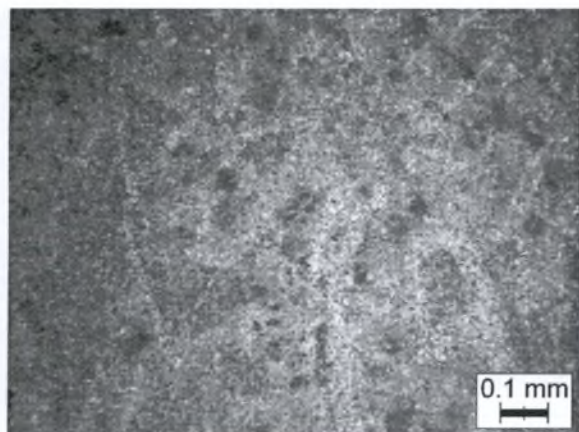


γ

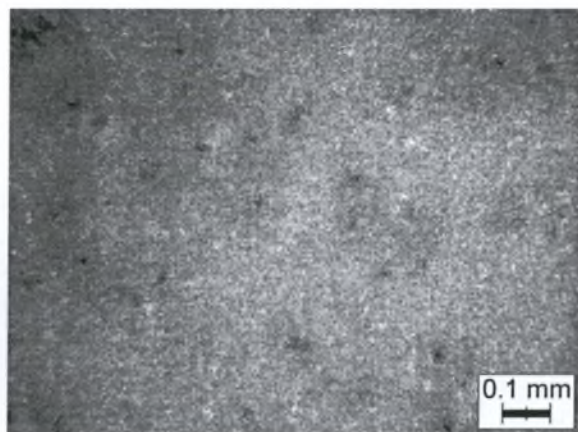


δ

Σχήμα Γ.16: Δοκίμιο E4(36), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

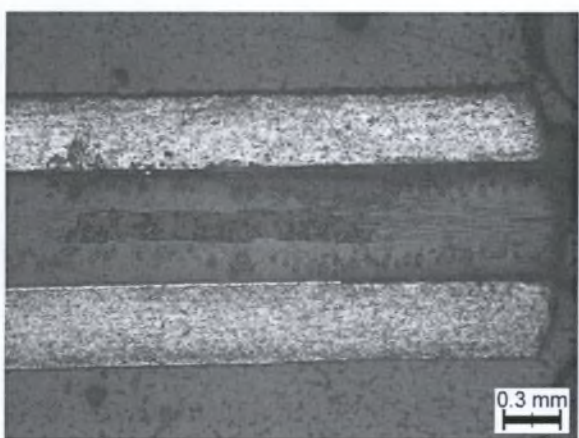


α

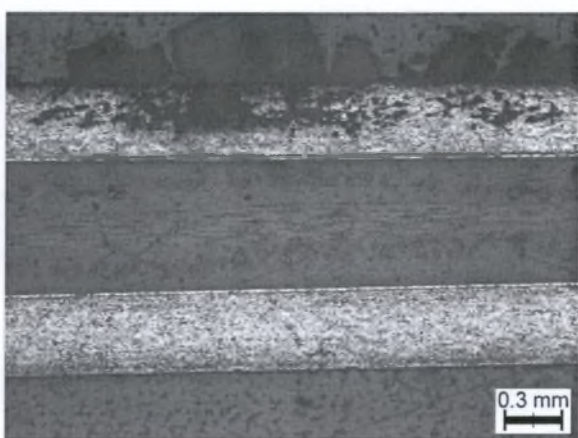


β

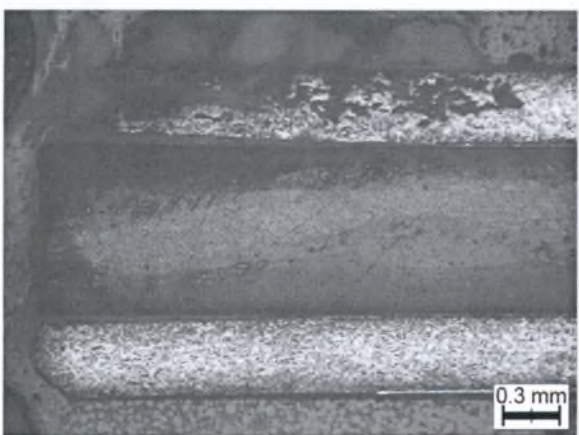
Σχήμα Γ.17: Δοκίμιο E4(48), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



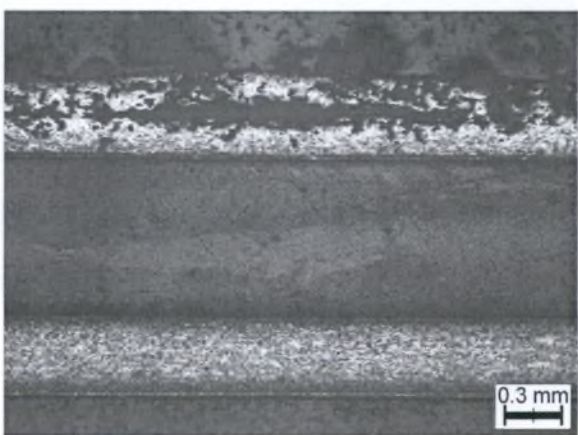
α



β

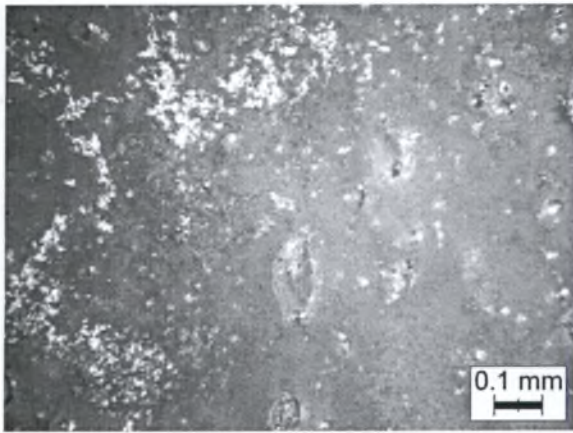


γ

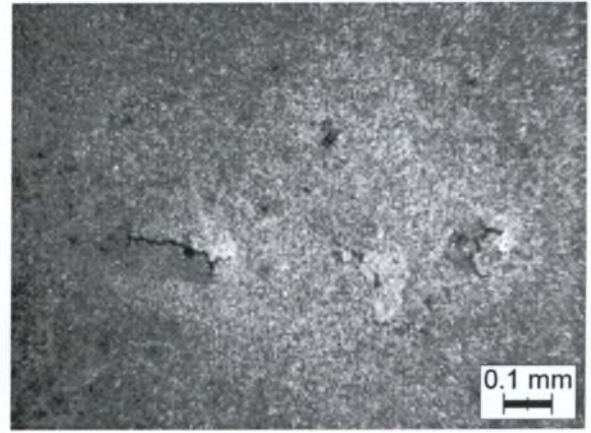


δ

Σχήμα Γ.18: Δοκίμιο E4(48), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

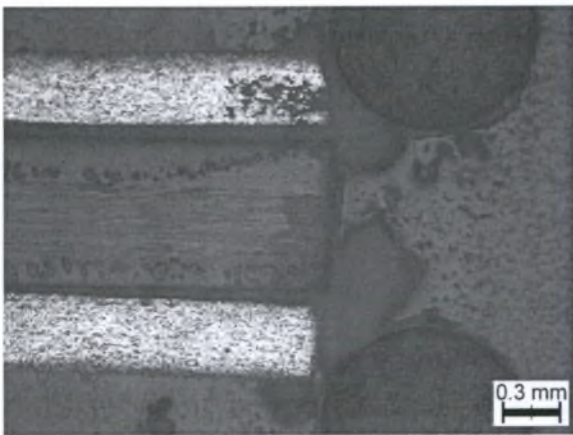


α

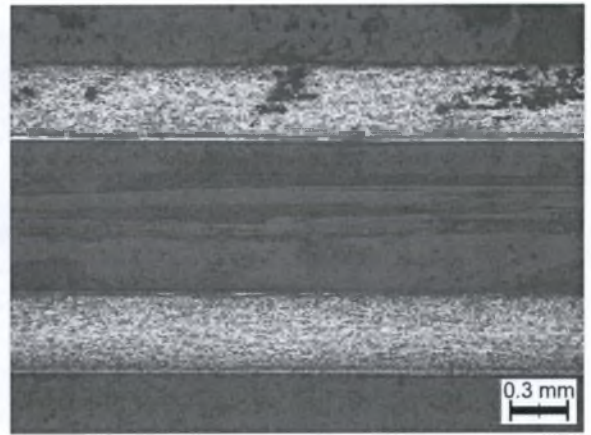


β

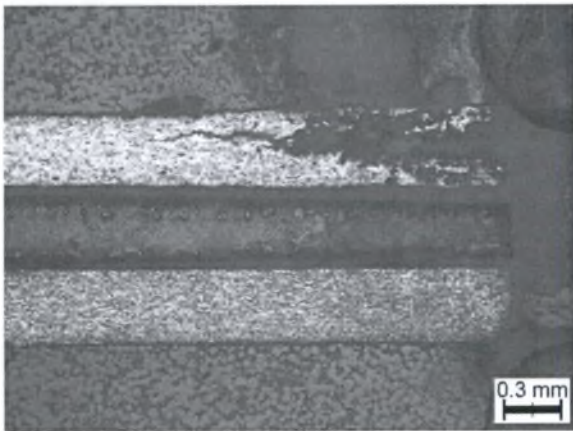
Σχήμα Γ.19: Δοκίμιο E4(96), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



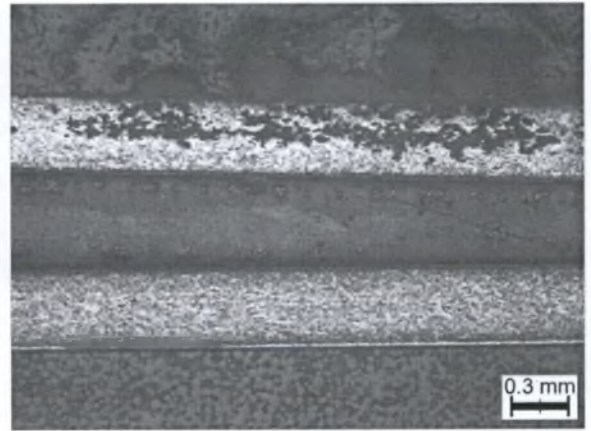
α



β



γ



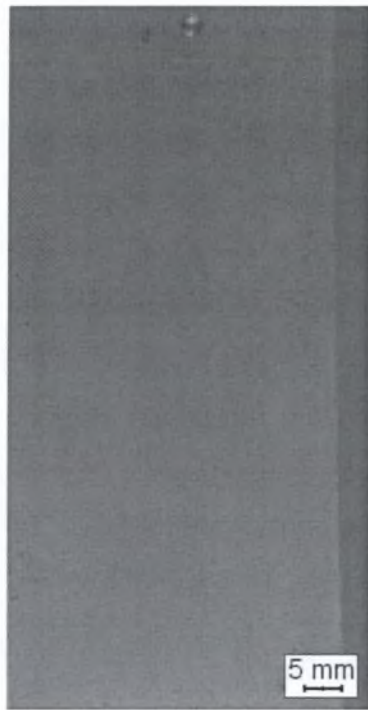
δ

Σχήμα Γ.20: Δοκίμιο E4(96), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

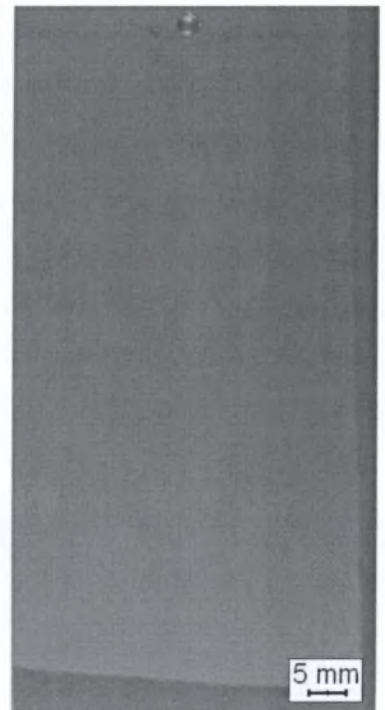
Παράρτημα Δ: Μακροσκοπική φωτογράφιση, στερεοσκοπία και οπτική μικροσκοπία δοκιμίων δοκιμής ΑΙ.



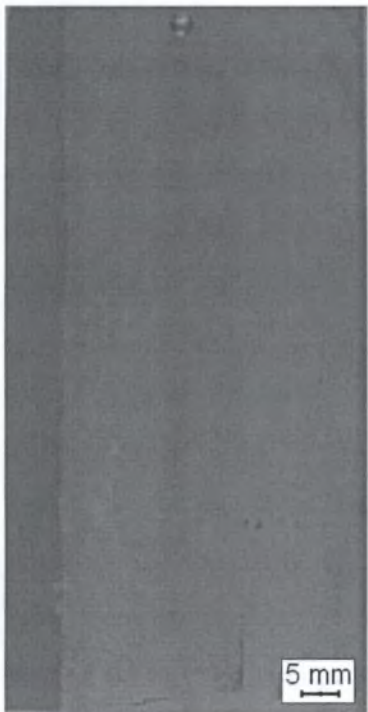
α



β



γ



δ



ε



στ



ζ



η

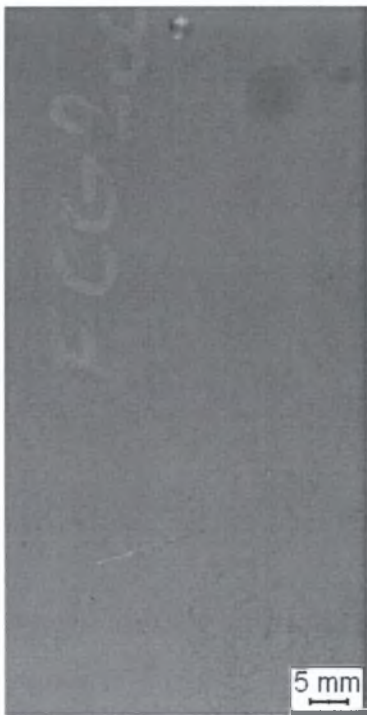


θ

Σχήμα Δ1: Φωτογραφίες των δοκιμίων Al πριν τη διεξαγωγή της πειραματικής δοκιμής επιταχυνόμενης διάβρωσης, επιφάνεια I. (α) Al(02), (β) Al(05), (γ) Al(10), (δ) Al(15), (ε) Al(30), (στ) Al(45), (ζ) Al(60), (η) Al(75), (θ) Al(90).



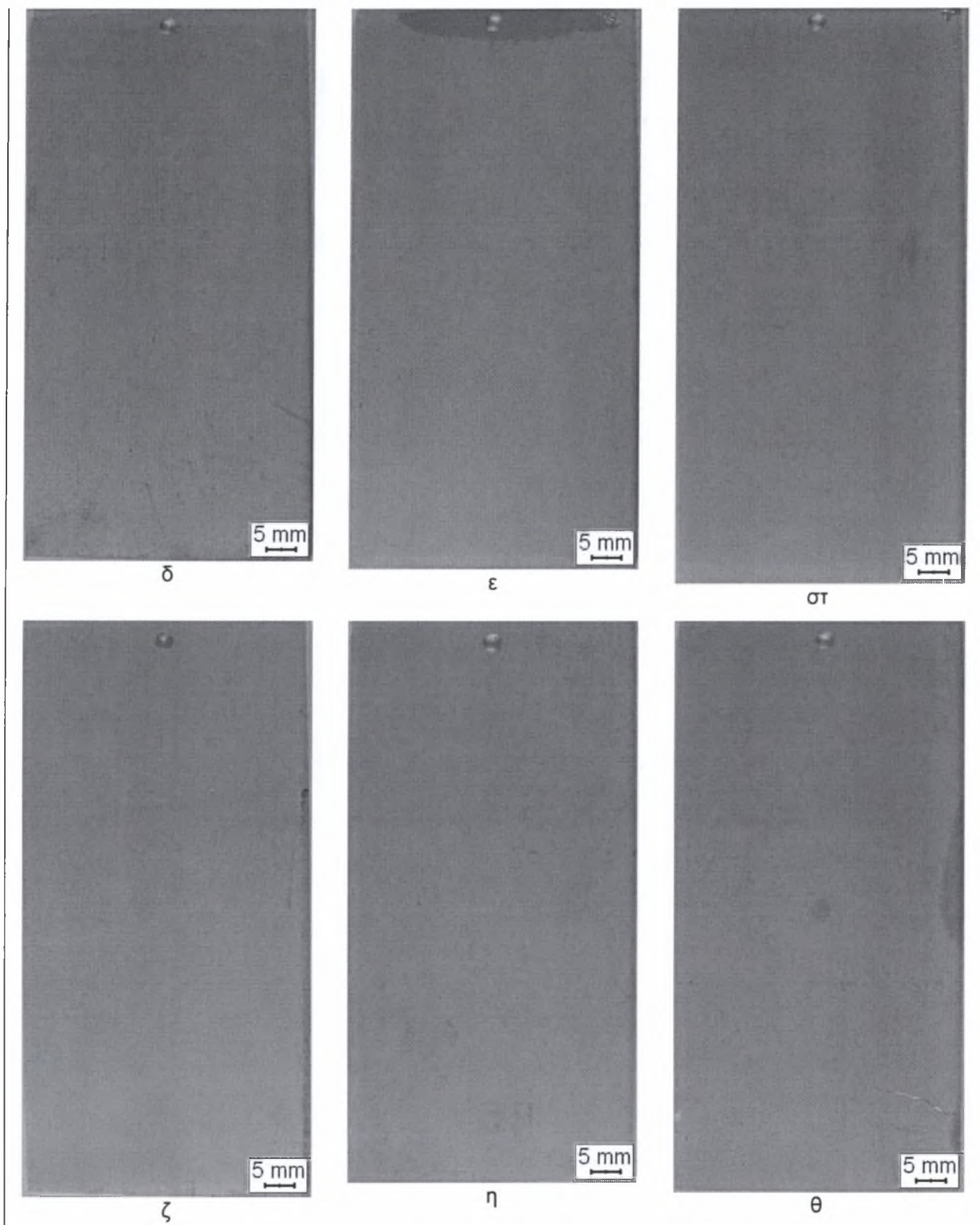
α



β



γ



Σχήμα Δ2: Φωτογραφίες των δοκίμων ΑΙ πριν τη διεξαγωγή της πειραματικής δοκιμής επιταχυνόμενης διάβρωσης, επιφάνεια ΙΙ. (α) ΑΙ(02), (β) ΑΙ(05), (γ) ΑΙ(10), (δ) ΑΙ(15), (ε) ΑΙ(30), (στ) ΑΙ(45), (ζ) ΑΙ(60), (η) ΑΙ(75), (θ) ΑΙ(90).



α



β



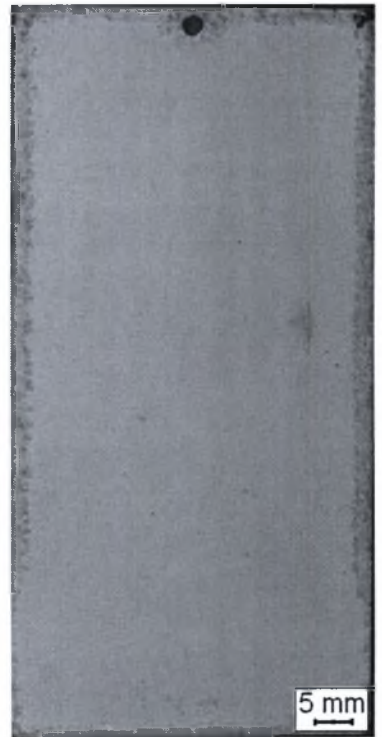
γ



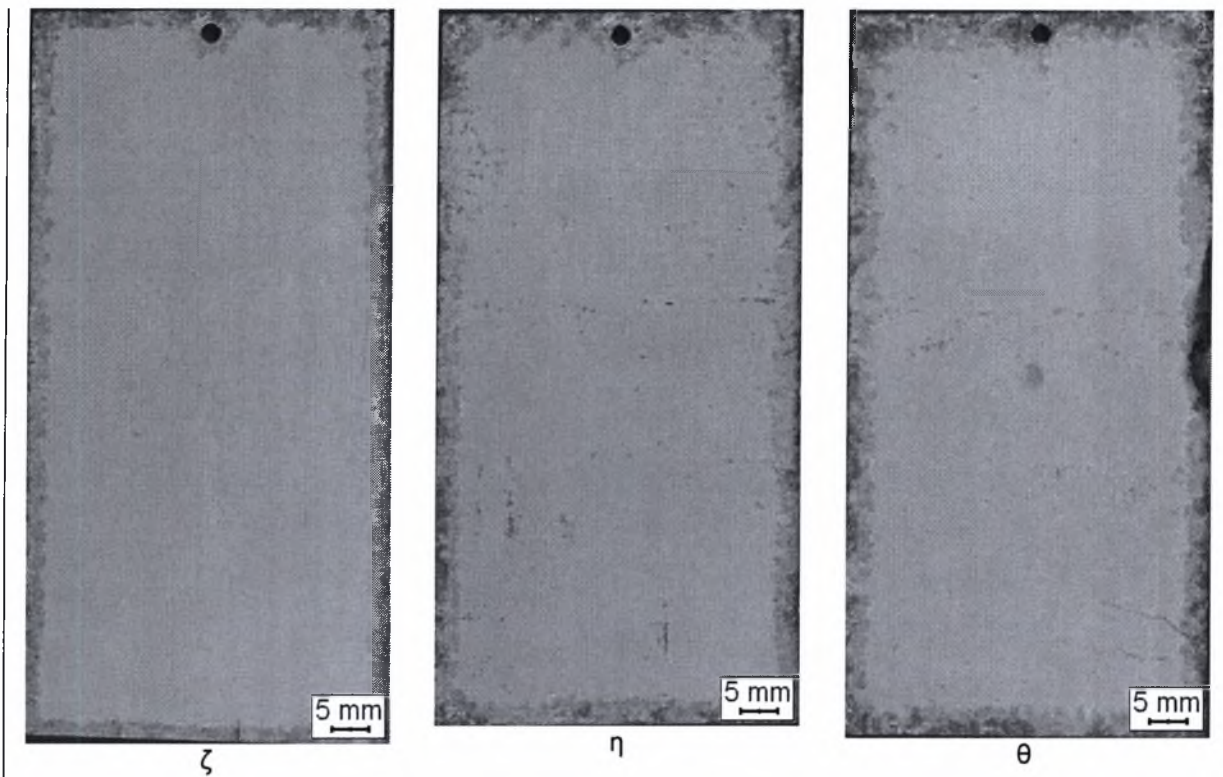
δ



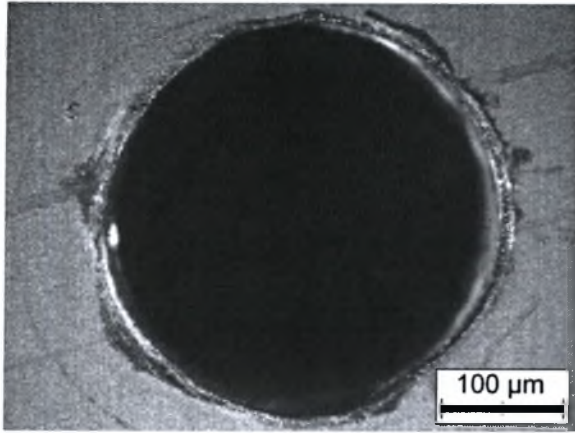
ε



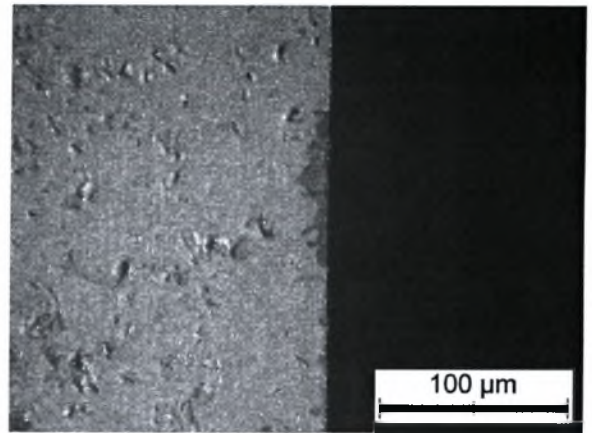
στ



Σχήμα Δ3: Φωτογραφίες των δοκιμίων Al αμέσως μετά τον καθαρισμό τους, επιφάνεια II. (α) Al(02), (β) Al(05), (γ) Al(10), (δ) Al(15), (ε) Al(30), (στ) Al(45), (ζ) Al(60), (η) Al(75), (θ) Al(90).

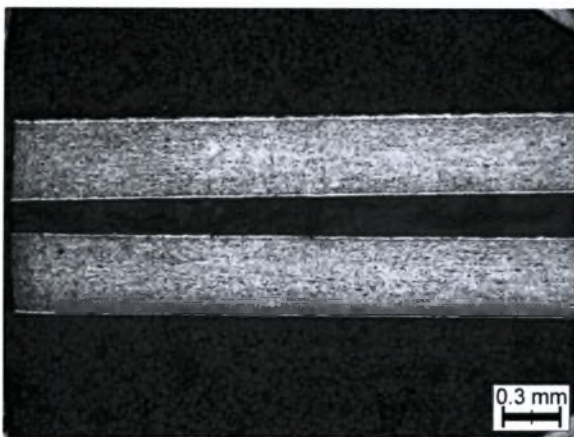


α

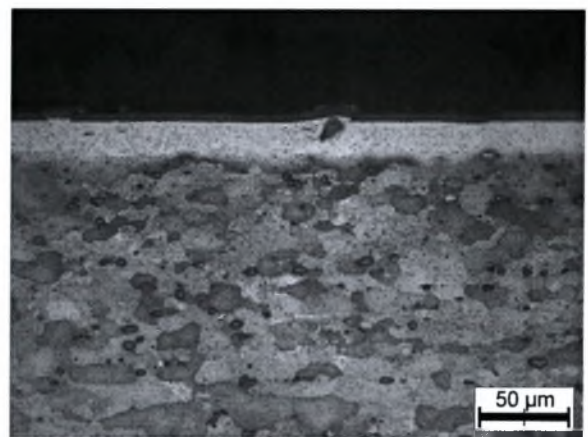


β

Σχήμα Δ.4: Δοκίμιο Al(O₂), στερεοσκοπικός έλεγχος.



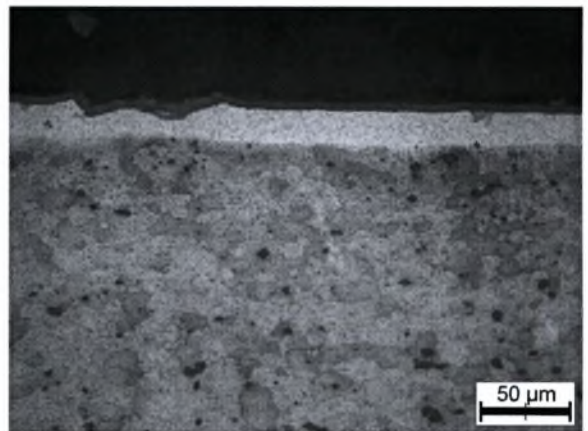
α



β

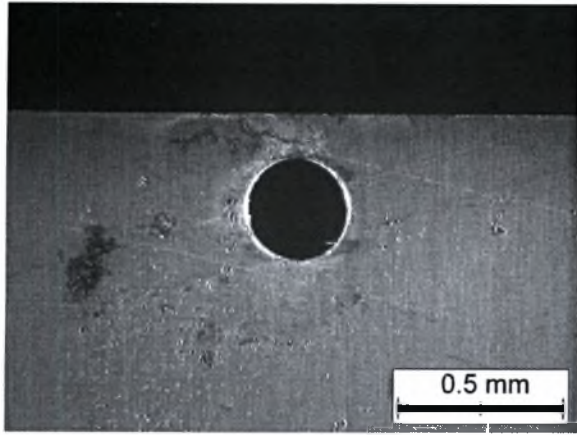


γ

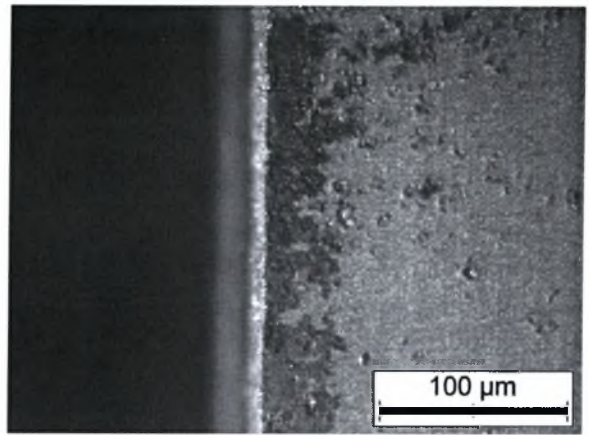


δ

Σχήμα Δ.5: Δοκίμιο Al(O₂), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

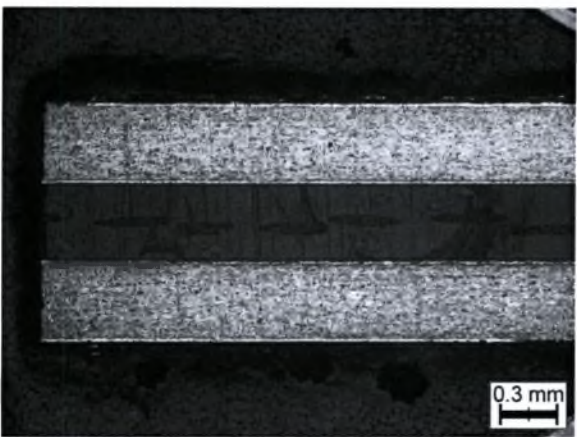


α

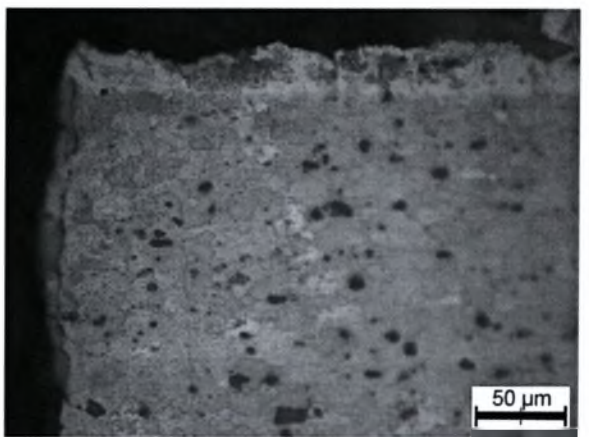


β

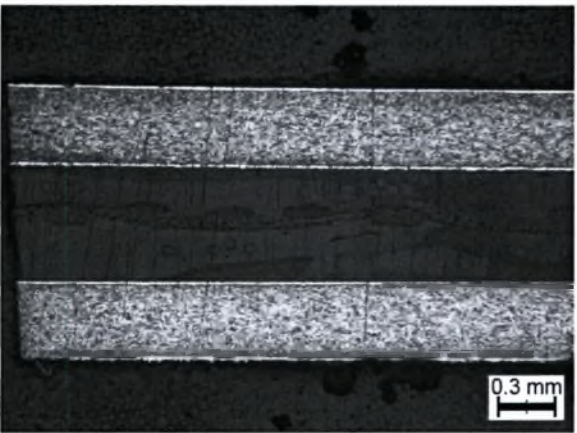
Σχήμα Δ.6: Δοκίμιο Al(05), στερεοσκοπικός έλεγχος.



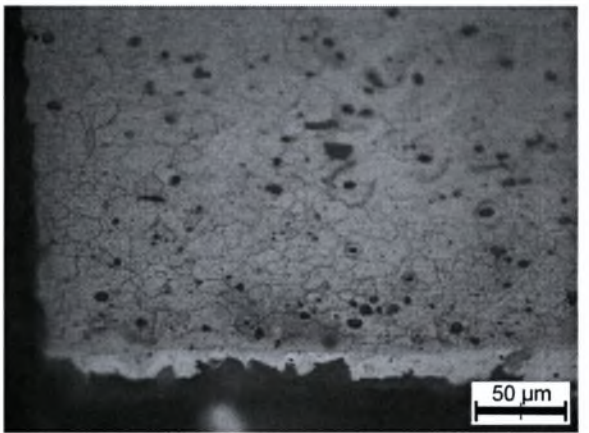
α



β

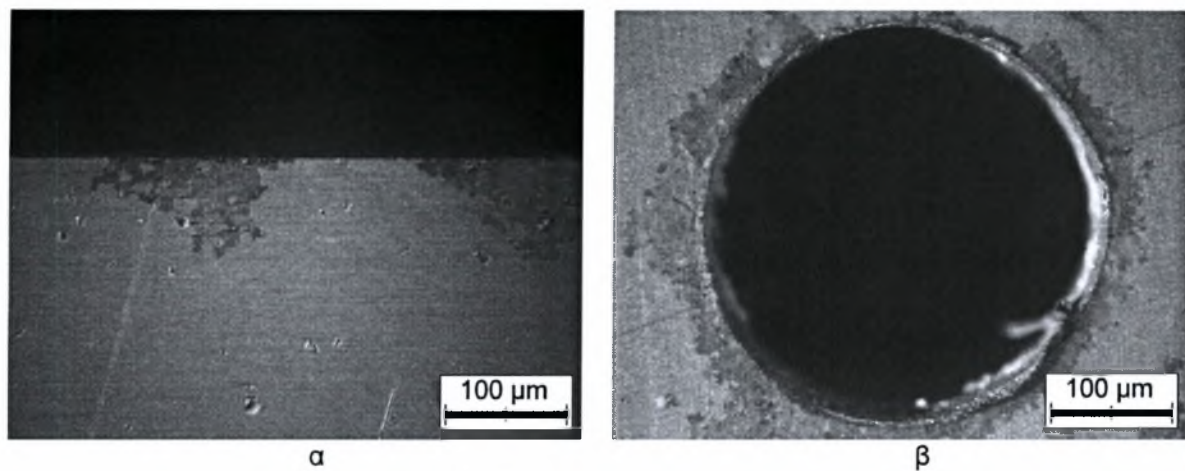


γ



δ

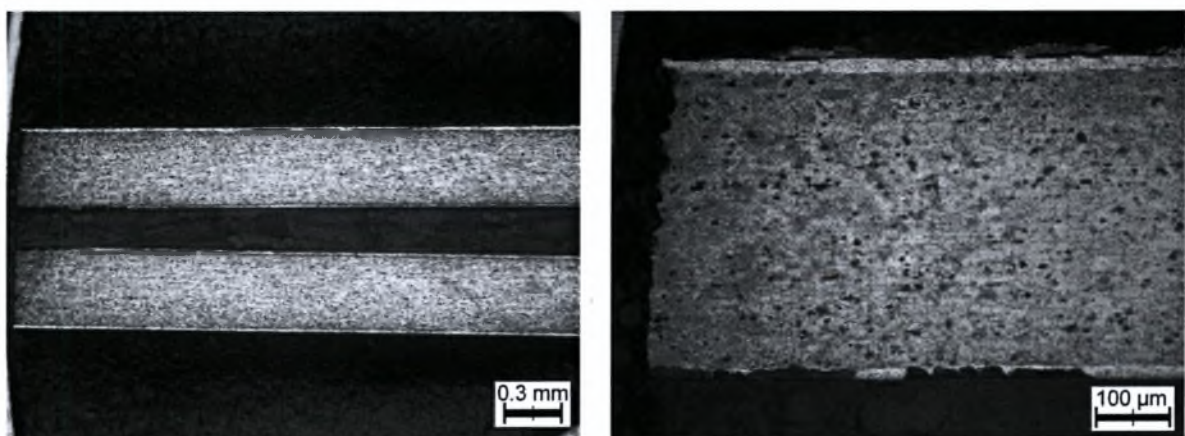
Σχήμα Δ.7: Δοκίμιο Al(05), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.



α

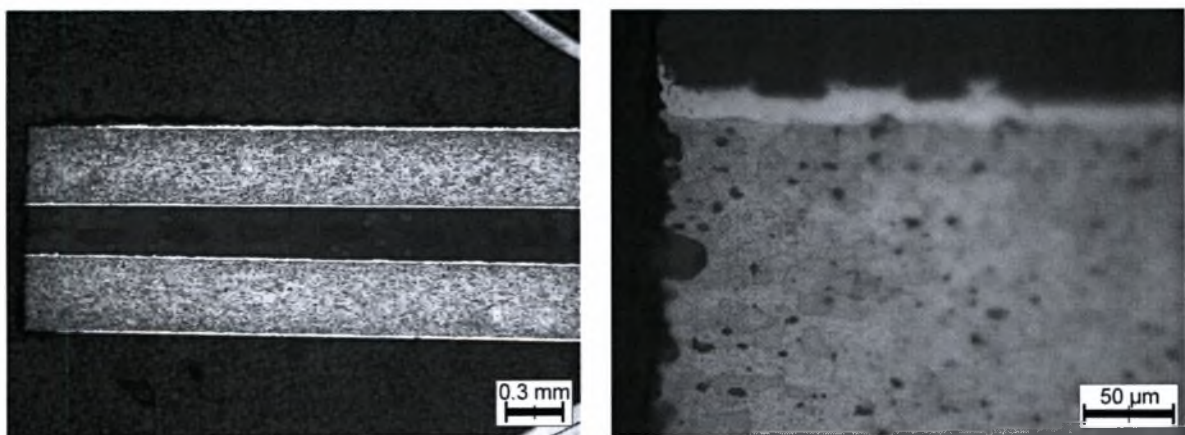
β

Σχήμα Δ.8: Δοκίμιο Al(10), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



α

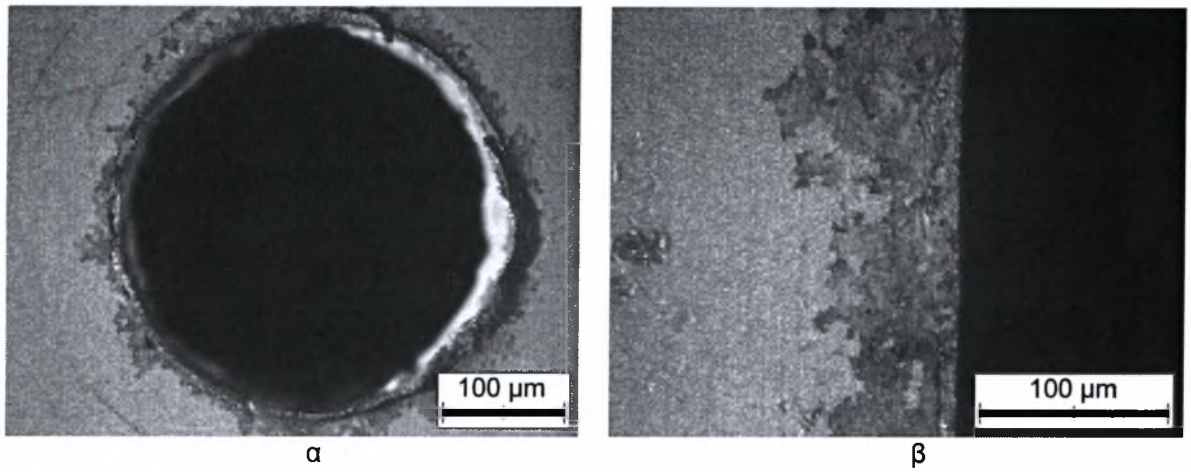
β



γ

δ

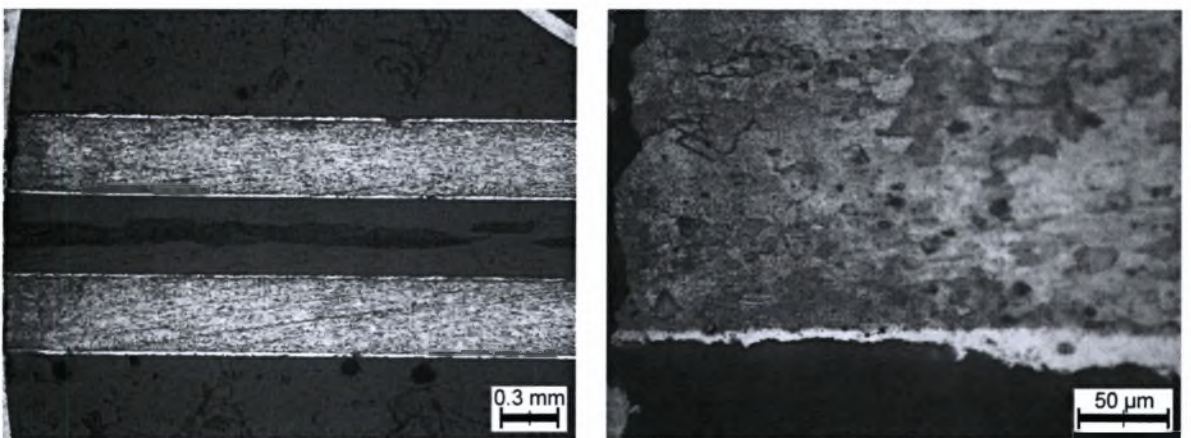
Σχήμα Δ.9: Δοκίμιο Al(10), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.



α

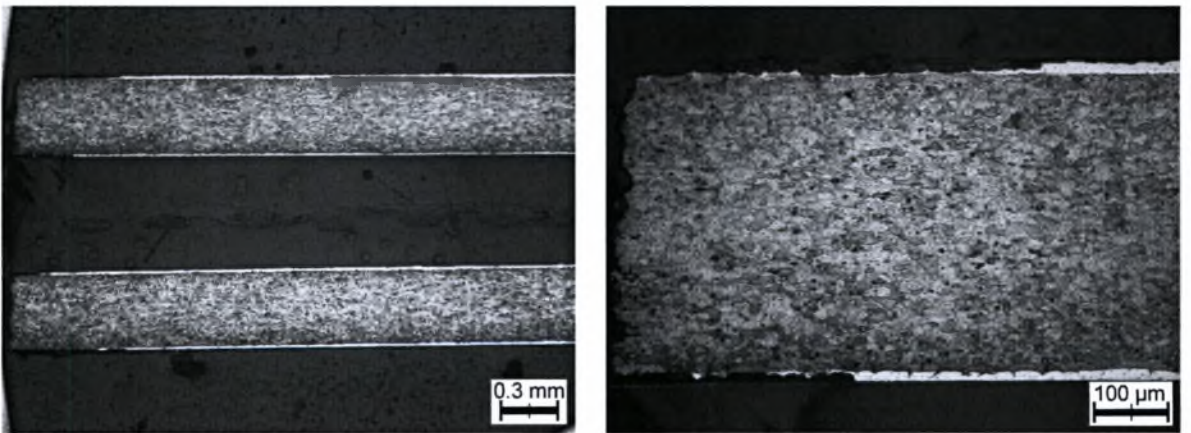
β

Σχήμα Δ.10: Δοκίμιο Al(15), στερεοσκοπικός έλεγχος.



α

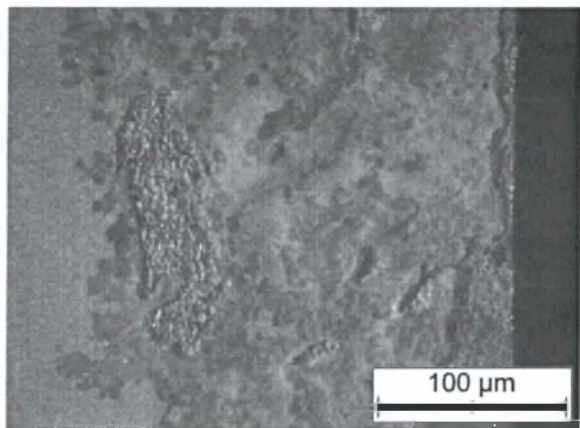
β



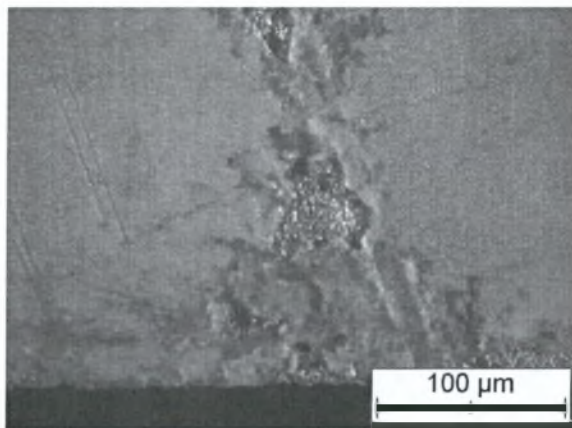
γ

δ

Σχήμα Δ.11: Δοκίμιο Al(15), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

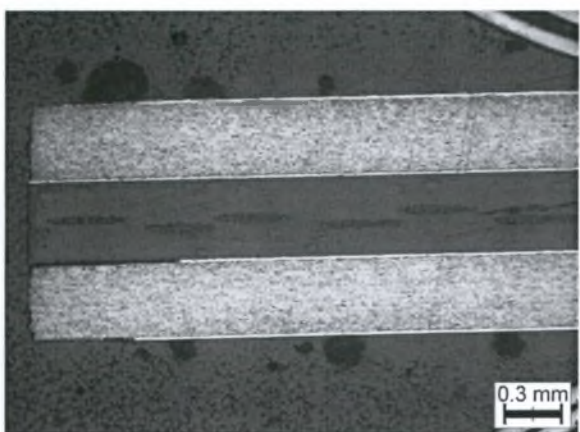


α

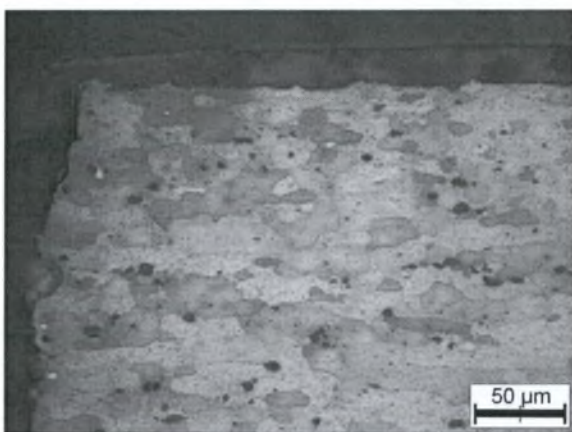


β

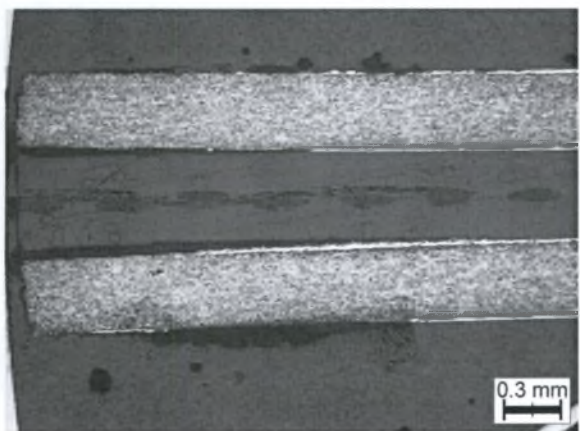
Σχήμα Δ.12: Δοκίμιο Al(31), στερεοσκοπικός έλεγχος.



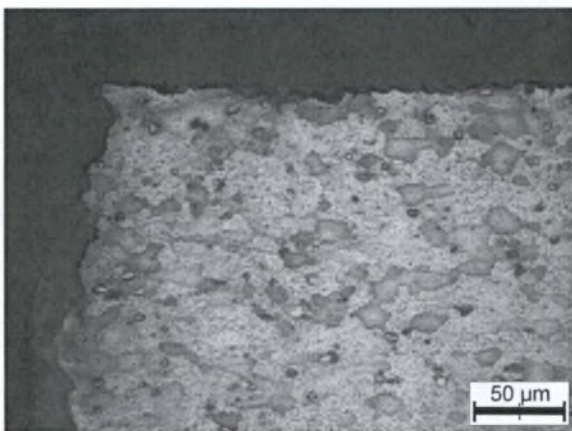
α



β

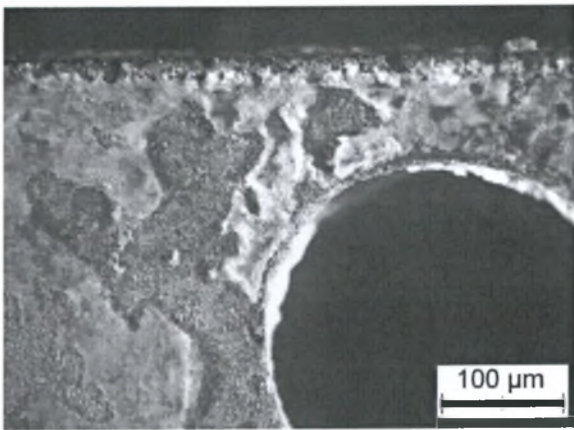


γ

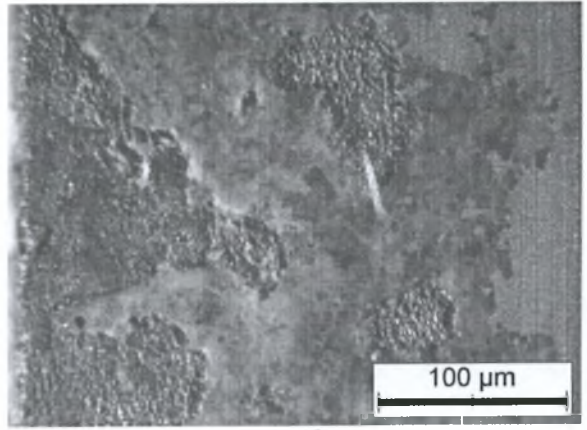


δ

Σχήμα Δ.13: Δοκίμιο Al(31), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

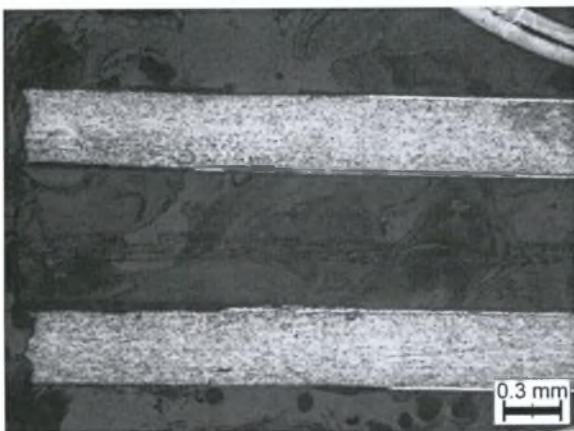


α

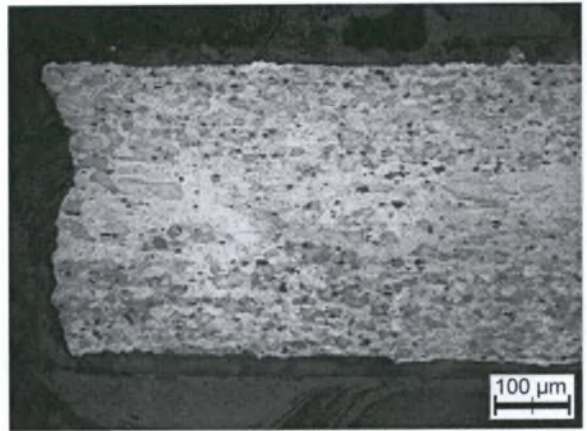


β

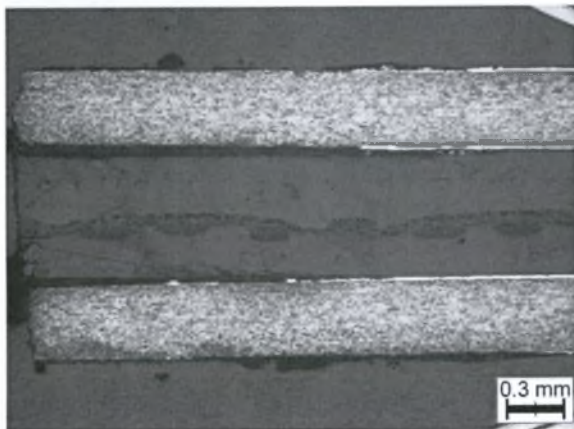
Σχήμα Δ.14: Δοκίμιο Al(45), στερεοσκοπικός έλεγχος.



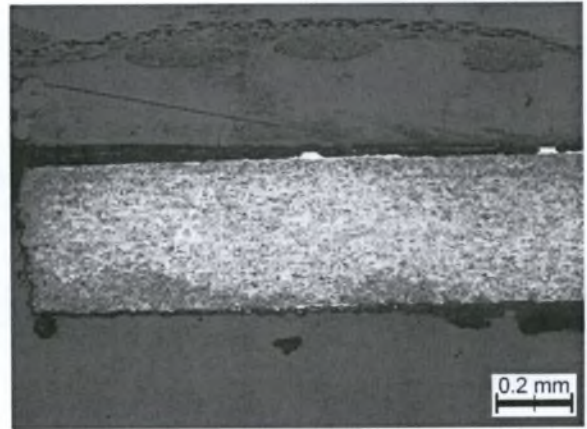
α



β

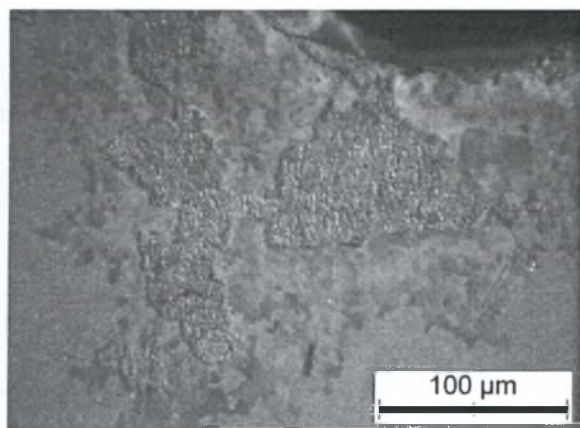


γ

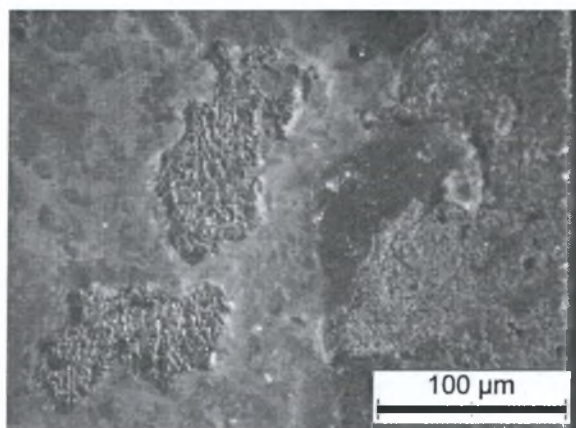


δ

Σχήμα Δ.15: Δοκίμιο Al(45), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

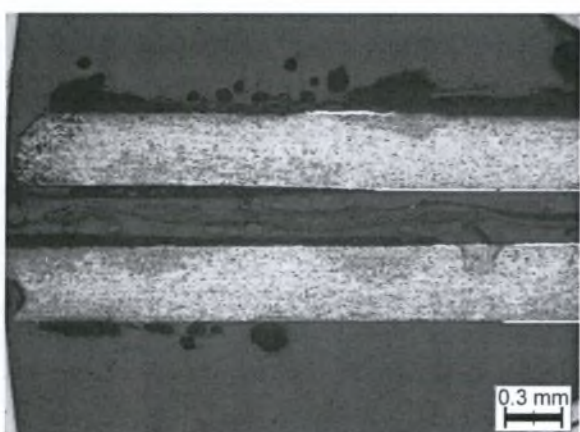


α

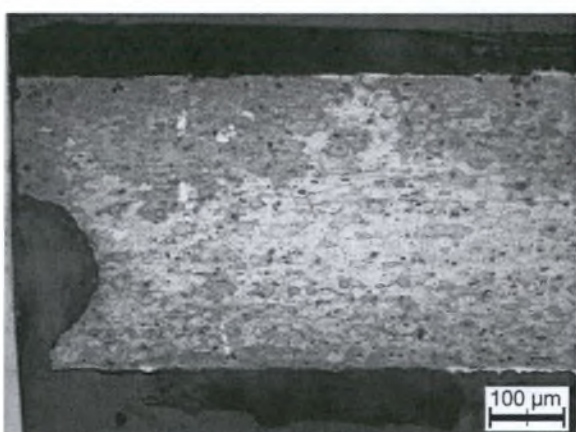


β

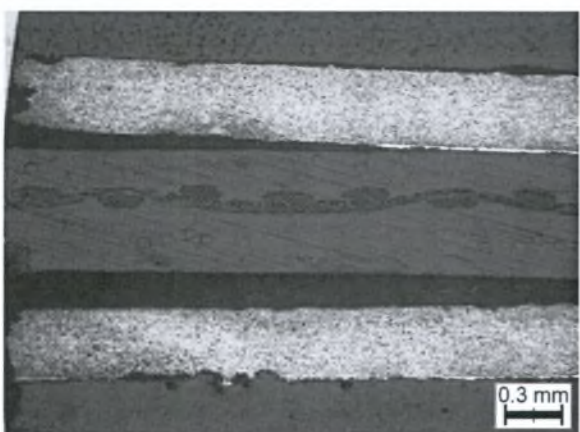
Σχήμα Δ.16: Δοκίμιο Al(60), στερεοσκοπικός έλεγχος.



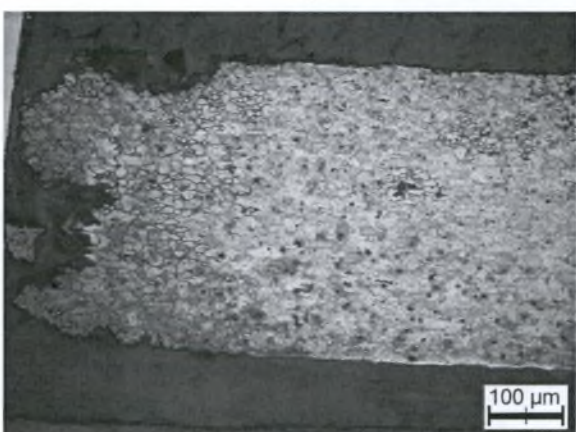
α



β

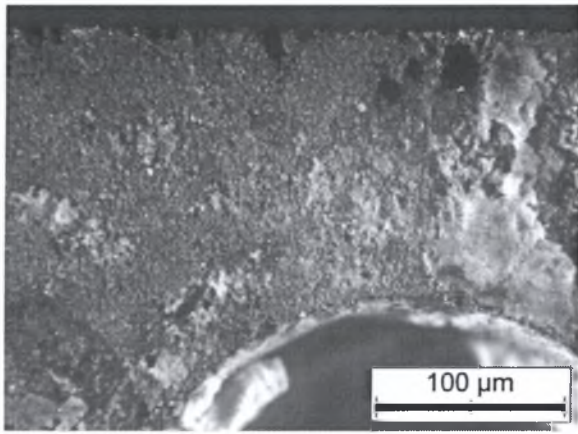


γ

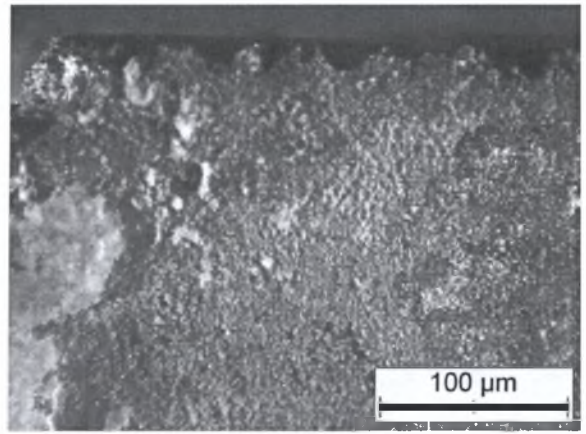


δ

Σχήμα Δ.17: Δοκίμιο Al(60), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

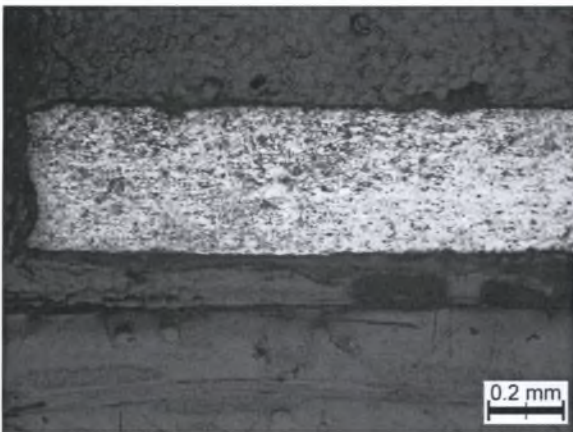


α

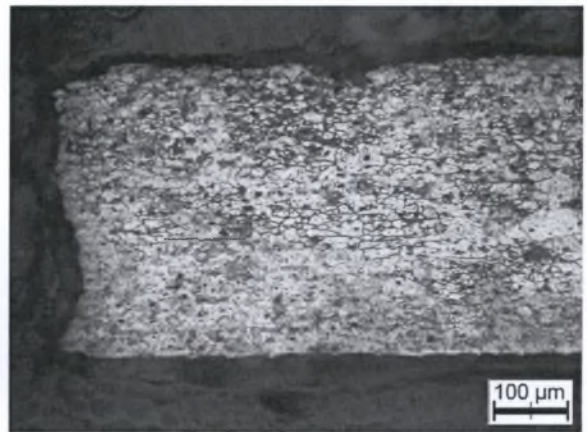


β

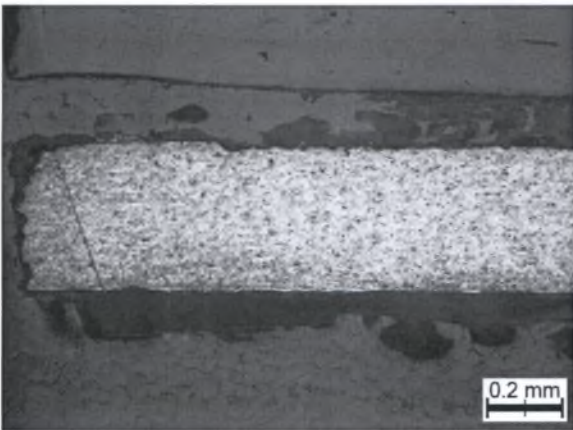
Σχήμα Δ.18: Δοκίμιο Al(75), στερεοσκοπικός έλεγχος. (α) πριν και (β) μετά τον καθαρισμό.



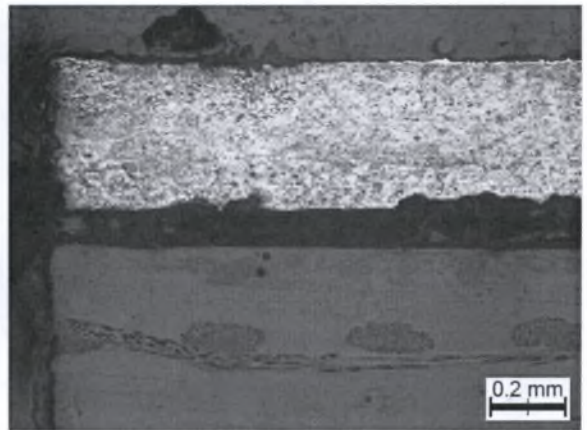
α



β

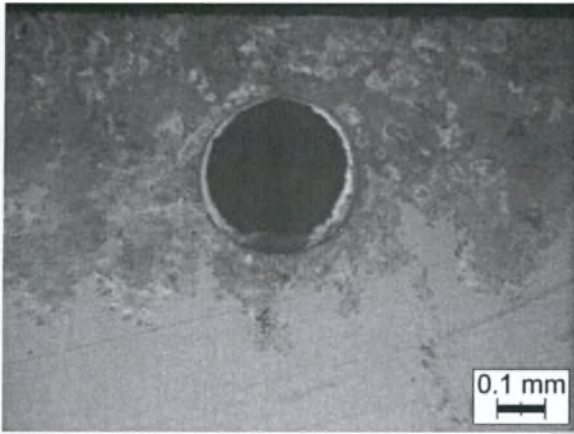


γ

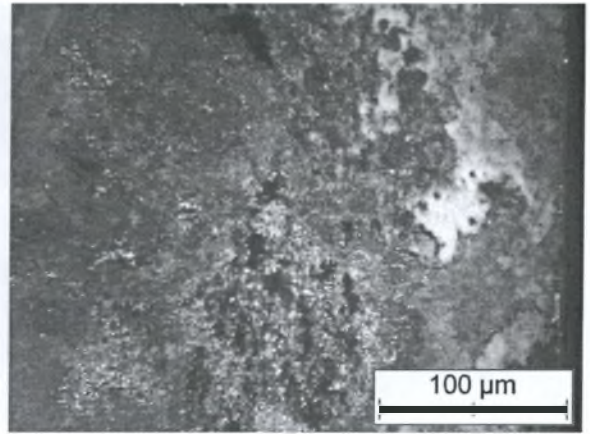


δ

Σχήμα Δ.19: Δοκίμιο Al(75), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.

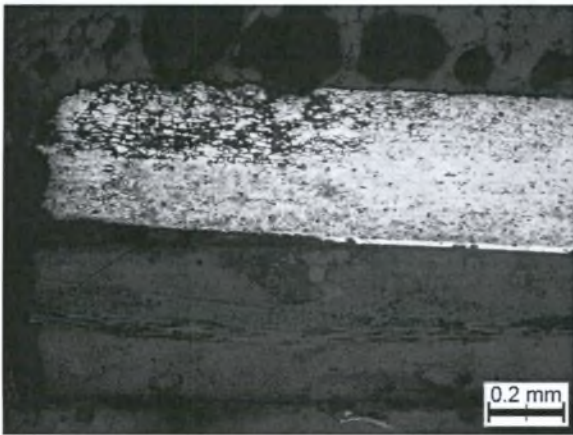


α

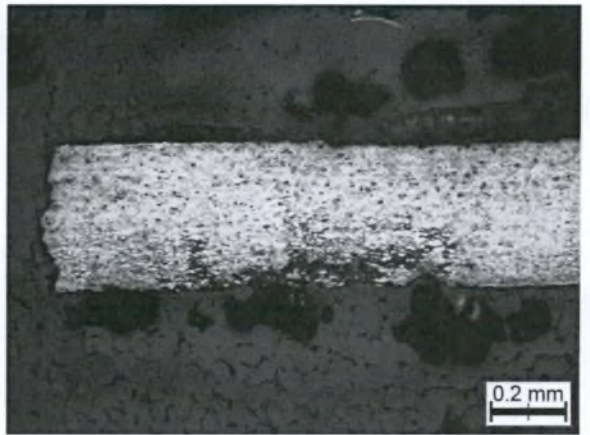


β

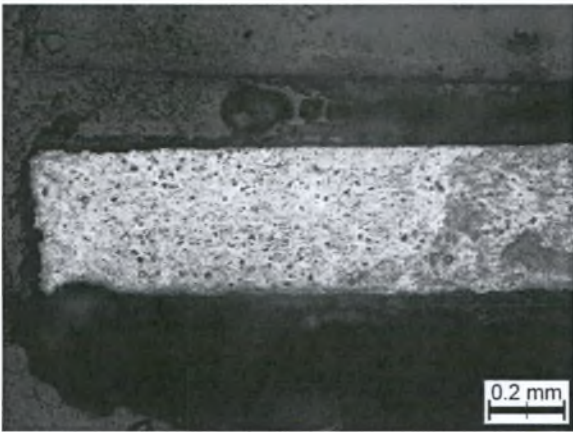
Σχήμα Δ.20: Δοκίμιο Al(90), στερεοσκοπικός έλεγχος.



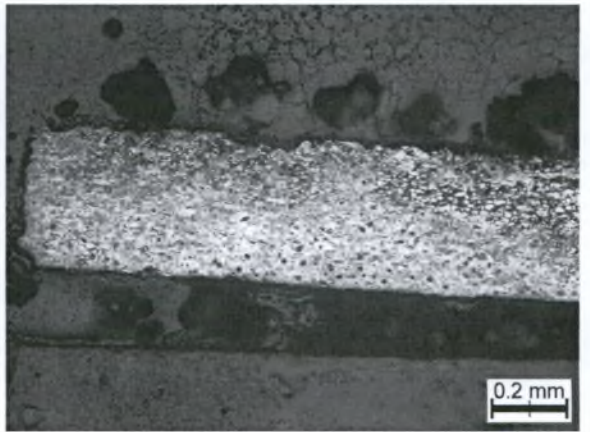
α



β



γ



δ

Σχήμα Δ.21: Δοκίμιο Al(90), οπτική μικροσκοπία. (α) και (β) διαμήκης τομή, (γ) και (δ) εγκάρσια τομή.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089099