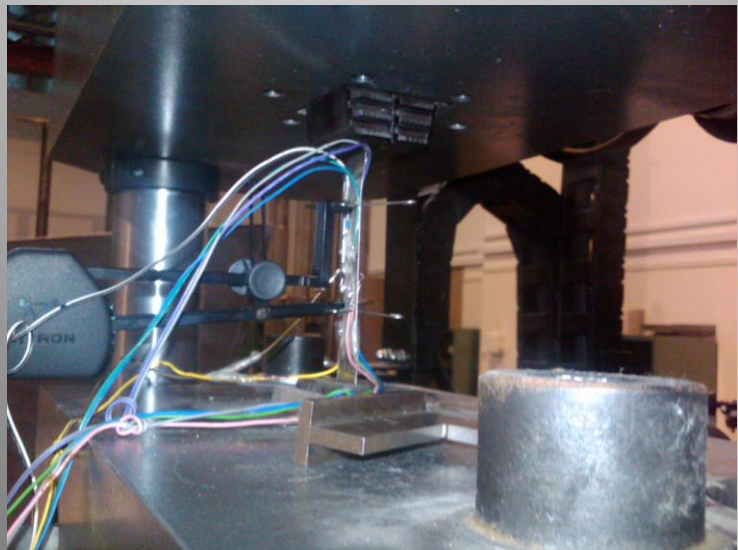




Διπλωματική Εργασία
«Μελέτη της υποβάθμισης της
μηχανικής συμπεριφοράς λεπτών
ελασμάτων αλουμινίου 2024 λόγω
διάβρωσης»

Δαλακούρας Χάρης (Α.Μ. 02103619)



Επιβλέπων Καθηγητής : Σταύρος Κ. Κουρκουλής
Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Εφαρμοσμένων
Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών



ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 Κράματα αλουμινίου και αεροπορικές εφαρμογές.....	6
1.2 Διάβρωση και η διάδοσή της στα κράματα αλουμινίου.....	9
1.3 Μορφές διάβρωσης του αλουμινίου και των κραμάτων του.....	12
1.4 Διάβρωση στα αεροσκάφη	17
1.5 Προσομοίωση της διάβρωσης	21
1.6 Βιβλιογραφικές αναφορές για τη διάβρωση αεροναυπηγικών δομικών υλικών.....	22
2.1 Μεθοδολογία προσέγγισης.....	30
2.2 Το κράμα αλουμινίου 2024-T3	31
2.3 Δοκίμια.....	32
2.4 Προστασία της επιφάνειας των δοκιμών.....	33
2.5 Επιταχυνόμενη διάβρωση.....	34
2.6 Δοκιμές εφελκυσμού	36
2.7 Μελέτη επιφανειών θραύσης.....	41
2.8 Πειραματικές σειρές δοκιμών	42
3.1 Δοκίμια αναφοράς	44
3.2 Εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων από τον χρόνο έκθεσης	45
3.3 Αποτίμηση εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων	52

3.3.1 Όριο διαρροής R_p	52
3.3.2 Εφελκυστική αντοχή R_m	58
3.3.3 Παραμόρφωση θραύσης A_f	62
3.3.4 Πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης W	66
3.4 Φωτογραφίες θραυσμένων δοκιμίων.....	71
3.5 Θραυστογραφικός έλεγχος.....	73
3.6 Εξάρτηση της διάβρωσης από το πάχος του δοκιμίου.....	78
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
5. ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	84
ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ.....	90

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη της υποβάθμισης λόγω διάβρωσης των μηχανικών ιδιοτήτων πολύ λεπτών ελασμάτων από κράμα αλουμινίου 2024-T3. Κατασκευάστηκαν δοκίμια εφελκυσμού σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές και για τις δυο διευθύνσεις επίπεδης ανισοτροπίας του ελάσματος. Δοκίμια εφελκυσμού εκτέθηκαν σε εργαστηριακό επιταχυνόμενο διαβρωτικό περιβάλλον για την προσομοίωση της ατμοσφαιρικής φυσικής διάβρωσης. Αριθμός δοκιμίων εκτέθηκε σε αμφοτέρες πλευρές, ενώ σε άλλα δοκίμια ήταν προστατευμένη η μία πλευρά τους. Πραγματοποιήθηκαν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού στα προ-διαβρωμένα δοκίμια εφελκυσμού και αποτιμήθηκαν οι εφελκυστικές μηχανικές ιδιότητές τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και ειδικότερα της εφελκυστικής ολκιμότητας ακόμα και για πολύ μικρούς χρόνους έκθεσης (π.χ. 20 λεπτά). Ο ρυθμός υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων παρατηρήθηκε ότι είναι μεγαλύτερος για τα δοκίμια της διεύθυνσης LT σε σχέση με την L και για τα δοκίμια με ακάλυπτες δυο επιφάνειες σε σχέση με τα δοκίμια με ακάλυπτη τη μια. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία των θραυσμένων επιφανειών των δοκιμίων εφελκυσμού ανέδειξε την σταδιακή αλλαγή του μηχανισμού αστοχίας από όλκιμη σε ημι-ψαθυρή και τελικώς σε πλήρως ψαθυρή θραύση με την αύξηση του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει εξάρτηση του μεγέθους υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων, με το ονομαστικό πάχος του δοκιμίου προς διάβρωση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κράματα αλουμινίου και αεροπορικές εφαρμογές

Τα περισσότερα κράματα αλουμινίου θεωρούνται ως τεχνολογικά μεταλλικά υλικά χαμηλών σχετικά τιμών αντοχής που συνοδεύονται από υψηλές τιμές ολκιμότητας. Το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι το αλουμίνιο παραμορφώνεται ελαστικά τρεις φορές περισσότερο από τον χάλυβα, κάτω από αντίστοιχη φόρτιση. Τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως σε μηχανολογικές εφαρμογές και ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές ειδικές αντοχές, δηλαδή οι μηχανικές ιδιότητες ανηγμένες ως προς την πυκνότητα του υλικού. Τα πλεονεκτήματα των κραμάτων αλουμινίου συνοψίζονται ως: είναι πολύ ελαφρά, έχουν πολύ καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, καλή αντοχή στη διάβρωση, χαρακτηρίζονται από υψηλή κατεργασιμότητα και θεωρούνται μη τοξικά και μη μαγνητικά υλικά. Τα κράματα αλουμινίου παράγονται από την προσθήκη διάφορων κραματικών στοιχείων, όπως ο χαλκός, το λίθιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος, στο αλουμίνιο. Αυτά τα κραματικά στοιχεία προσδίδουν διαφορετικές ιδιότητες στο υπό ανάπτυξη υλικό.

Στις αεροπορικές εφαρμογές ο λόγος αντοχής-βάρους των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες. Αυτός είναι και ο λόγος που στα σύγχρονα αεροσκάφη χρησιμοποιούνται

κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό τα κράματα αλουμινίου. Ενδεικτικό στοιχείο για την ανάδειξη της σημασίας της χρήσης κραμάτων αλουμινίου στα αεροσκάφη, αποτελεί το γεγονός ότι συναντώνται σε τμήματα της πρωτεύουσας δομής του αεροσκάφους όπως είναι π.χ. το κέλυφος και τα φτερά.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι κύριες κραματικές σειρές του αλουμινίου τόσο για κράματα χύτευσης όσο και για κράματα διαμόρφωσης [1]. Το πρώτο ψηφίο της κωδικοποίησης υποδεικνύει το κύριο κραματικό στοιχείο, ενώ τα επόμενα ψηφία δίνουν πληροφορίες σχετικά με τη χημική σύσταση και την κατεργασία του εκάστοτε κράματος.

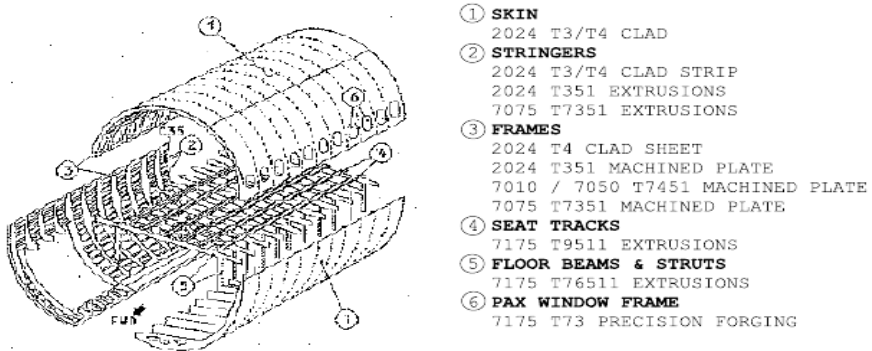
Πίνακας 1: Ταξινόμηση των κραμάτων αλουμινίου.

Κράματα Διαμόρφωσης	
1xxx	Καθαρό Αλουμίνιο
2xxx	Al-Cu
3xxx	Al-Mn
4xxx	Al-Si
5xxx	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si
7xxx	Al-Zn
8xxx	Κράματα Al με άλλα στοιχεία
9xxx	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Κράματα Χύτευσης	
1xx.x	Καθαρό Αλουμίνιο
2xx.x	Al-Cu
3xx.x	Al-Mn+Cu και/ή Mg
4xx.x	Al-Si
5xx.x	Al-Mg
6xx.x	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7xx.x	Al-Zn
8xx.x	Κράματα Al-Zn με άλλα στοιχεία
9xx.x	Κράματα Al με άλλα στοιχεία

Σχετικά με τα κράματα διαμόρφωσης (*wrought alloys*) αναφέρεται πως η σειρά 2xxx μπορεί να κατεργαστεί θερμικά και συνδυάζει σε κάποιες καταστάσεις υψηλή αντοχή και ολκιμότητα και σε ορισμένες

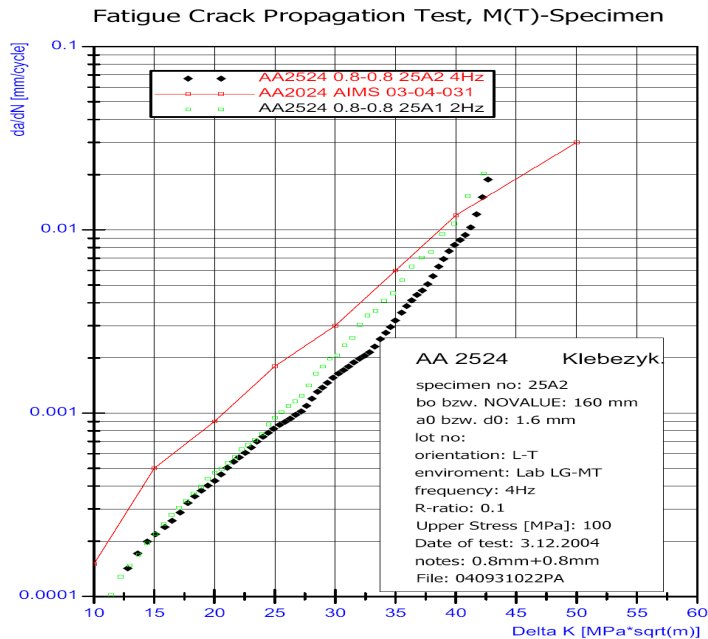
περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα [1]. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και για το λόγο αυτό πραγματοποιείται επικάλυψή του. Από τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx, που χρησιμοποιείται κυρίως σε αεροναυπηγικές εφαρμογές, είναι το κράμα 2024-T3. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται επιμέρους περιοχές του αεροσκάφους, στις οποίες χρησιμοποιείται το κράμα 2024 T3 καθώς και άλλα κράματα αλουμινίου.



Σχήμα 1: Περιοχές του κελύφους του αεροσκάφους που χρησιμοποιούνται κράματα αλουμινίου [2].

Το κράμα 2024 χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της πολύ καλής του συμπεριφοράς σε αντίσταση στη φθορά. Η φθορά στο παρών μεταλλικό υλικό έχει ερμηνευτεί από τη βιβλιογραφία [3,4] ως ο μηχανισμός δημιουργίας μικρορωγμών κόπωσης σε παρθένο υλικό καθώς και η αντίσταση στην διάδοσή της υπό το φάσμα των μηχανικών φορτίων λειτουργίας του αεροσκάφους. Για το λόγο αυτό, για την ευρεία χρησιμοποίηση ενός υλικού σε τέτοιες εφαρμογές, απαιτούνται οι

ιδιότητες κόπωσης, π.χ. η καμπύλη S-N ή Woehler και η ικανότητα αντίστασης στη ρωγμή και η ικανότητα αντίστασης στη ρωγμή υπό κοπωτικά φορτία (*fatigue crack growth*). Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η ικανότητα αντίστασης σε ρωγμή υπό κοπωτικά φορτία για ορισμένα κράματα της σειράς 2xxx.



Σχήμα 2: Καμπύλες διάδοσης ρωγμής υπό κοπωτικά φορτία σταθερού εύρους τάσης για κράματα αλουμινίου της σειράς 2xxx [5].

1.2 Διάβρωση και η διάδοσή της στα κράματα αλουμινίου

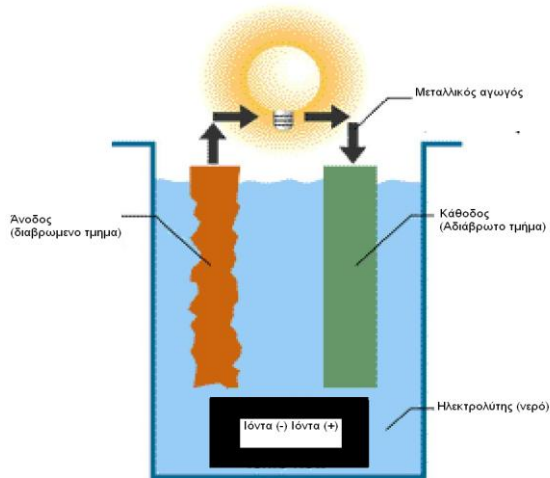
Το αλουμίνιο, όπως και πολλά από τα κράματά του, εάν εκτεθούν σε διαβρωτικό περιβάλλον λειτουργίας, υφίστανται μια συνολική διάβρωση σε όλη την επιφάνεια τους. Σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G15 με

τον όρο διάβρωση εννοείται «η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του» [6].

Οι μορφές διάβρωσης που συναντώνται, μπορούν αρχικά να ταξινομηθούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι η ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (*general corrosion*) ενώ στον αντίποδα βρίσκεται η τοπική διάβρωση (*localized corrosion*).

Ως ομοιόμορφη διάβρωση [7] χαρακτηρίζεται η βλάβη του μεταλλικού υλικού που πραγματοποιείται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνειά του, ανεξάρτητα αν η ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από το χρόνο ή όχι. Το είδος αυτό περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των βλαβών λόγω διάβρωσης. Στην ομάδα αυτή ανήκει το πιο συνηθισμένο φαινόμενο αυτό της οξειδωσης των χαλύβων που βρίσκονται εκτεθειμένοι στην ατμόσφαιρα και σχηματίζουν επιφανειακά οξείδια (σκουριά).

Αντίθετα η τοπική διάβρωση δεν εμφανίζεται σε όλη την επιφάνεια του μεταλλικού κράματος αλλά σε ορισμένες μόνο περιοχές του. Το Σχήμα 3 αναπαριστά τον μηχανισμό της διάβρωσης που συντελείται είτε σε δύο διαφορετικά μέταλλα που έρχονται σε επαφή σε κατάλληλο περιβάλλον, είτε ακόμα και στα διάφορα στοιχεία του κράματος ενός μετάλλου.



Σχήμα 3: Ο μηχανισμός της διάβρωσης για τεχνολογικά μεταλλικά υλικά [8].

Για να πραγματοποιηθεί η διάβρωση είναι αναγκαίο να πληρούνται οι τρεις ακόλουθες προϋποθέσεις [8]:

- παρουσία ανόδου και καθόδου: αυτό συμβαίνει όταν δύο ανόμοια μέταλλα ή δύο περιοχές διαφορετικής ηλεκτρολυτικής συγκέντρωσης δημιουργήσουν διαφορά δυναμικού,
- παρουσία μεταλλικού αγωγού, που συνδέει την άνοδο με την κάθοδο, και τέλος
- παρουσία ηλεκτρολύτη, όπως π.χ. είναι το νερό.

Ένα μεταλλικό κράμα αποτελείται από μέταλλα διαφορετικού δυναμικού. Όταν το μεταλλικό κράμα βρεθεί σε περιβάλλον όπου υπάρχει ηλεκτρολύτης, ο μεταλλικός αγωγός και το διαβρωτικό μέσο, αυτό υποβάλλεται σε ηλεκτροχημική διάβρωση. Το μέταλλο ή το τμήμα μετάλλου που οξειδώνεται αποτελεί την άνοδο ενώ το άλλο είναι η

κάθοδος και δεν υπόκειται σε οξειδωση. Το μέταλλο ή τα μεταλλικά στοιχεία που είναι πιο ενεργά ηλεκτρικά, γίνονται ανοδικά ενώ τα λιγότερο ενεργά ηλεκτρικά γίνονται καθοδικά. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δυο μέταλλα, τόσο εντονότερη αναμένεται να είναι και η επίδραση της διάβρωσης. Η ηλεκτροχημική διάβρωση αποτελεί την αιτία των περισσότερων μορφών διάβρωσης στη δομή και στα εξαρτήματα του αεροσκάφους.

1.3 Μορφές διάβρωσης του αλουμινίου και των κραμάτων του

Σε πραγματικές αεροναυπηγικές εφαρμογές, η ομοιόμορφη διάβρωση σπάνια συναντάται, καθώς όλα τα ελάσματα είναι κατάλληλα επικαλυμμένα για την αποφυγή της έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Αντίθετα η τοπική διάβρωση παρατηρείται συχνότερα σε πραγματικές κατασκευές και για αυτό το λόγο θα αναλυθεί περαιτέρω: οι κυριότερες μορφές της είναι οι ακόλουθες:

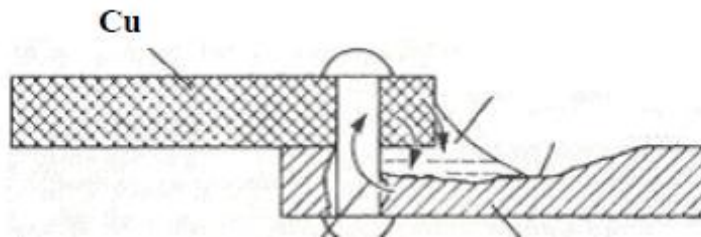
Η περικρυσταλλική διάβρωση (*intergranular corrosion*) [9]: Ορίζεται ως η επιλεκτική επίθεση στα όρια των κόκκων ή σε παρακείμενες περιοχές, δίχως να υπάρχει αξιοσημείωτη επίθεση στους ίδιους τους κόκκους. Αυτό γίνεται λόγω διαφορών στο δυναμικό μεταξύ των περιοχών των ορίων των κόκκων και των διάφορων μεσομεταλλικών φάσεων και προσμίξεων που σχηματίζονται σε αυτές τις περιοχές. Τα όρια των κόκκων είναι περιοχές για σχηματισμό και κατακρήμνιση και έτσι είναι χημικώς και φυσικώς διαφορετικά απ' αυτούς καθ' αυτούς τους

κόκκους. Η περικρυσταλλική διάβρωση στα κράματα του αλουμινίου μπορεί να είναι το αποτέλεσμα της απ' ευθείας επίθεσης σε ένα κόκκο μεσομεταλλικής φάσης ο οποίος είναι λιγότερο ανθεκτικός στη διάβρωση από την μήτρα. Στα κράματα αλουμινίου χαλκού όπως είναι και το κράμα 2024, σχηματίζεται η φάση Al_2Cu , η οποία είναι πιο δραστική από τη μήτρα. Αυτό σημαίνει ότι μάλλον λειτουργεί σαν κάθοδος και επιταχύνει τη διάβρωση σε μία ζώνη παρακείμενη στο όριο του κρυστάλλου. Παρόλο που με τον σχηματισμό πολλών κόκκων τα κράματα αλουμινίου είναι ευαίσθητα στην περικρυσταλλική διάβρωση, η αποφυγή σχηματισμού πολλών κόκκων, δεν αποτελεί λύση γιατί τα πολλά όρια κόκκων είναι σημαντικά για την επίτευξη μεγάλων τιμών αντοχής και απαραίτητα για την καλή μηχανική απόδοση των μεταλλικών υλικών. Το εάν το κράμα θα είναι υποκείμενο σε περικρυσταλλική διάβρωση σε ένα δεδομένο περιβάλλον είναι σημαντικός παράγοντας για την επιλογή ή όχι του συγκεκριμένου κράματος.



Σχήμα 4: Έναρξη περικρυσταλλικής διάβρωσης σε δοκίμιο κράματος 2024 T3 [10].

Γαλβανική Διάβρωση (galvanic corrosion) [1]: Το αλουμίνιο όταν βρίσκεται σε επαφή με άλλο μέταλλο μέσα σε ηλεκτρολύτη τείνει να διαβρωθεί πιο απότομα απ' ότι μόνο του στο ίδιο περιβάλλον. Η διάβρωση συμβαίνει εκεί όπου τα τρία στοιχεία (τα δύο μέταλλα και ο ηλεκτρολύτης) έρχονται σε επαφή. Η διάβρωση συνεχίζεται μέχρι που όλο το αλουμίνιο καταναλώνεται. Εάν ο ηλεκτρολύτης δεν περιέχει οξειδωτικό παράγοντα (π.χ. το ατμοσφαιρικό οξυγόνο) τότε δεν υφίσταται διάβρωση.



Σχήμα 5: Γαλβανική διάβρωση σε κελί Al-Cu ακατάλληλα συνδεδεμένου [1]

Σημειακή ή τρηματική διάβρωση (pitting corrosion) [7]: Χαρακτηρίζεται η διάβρωση που είναι τοπικά περιορισμένη, δηλαδή που εμφανίζεται σε συγκεκριμένα σημεία του υλικού και υπό την μορφή οπών. Είναι μια από τις πιο επικίνδυνες μορφές διάβρωσης, γιατί ξεκινά από ένα σημείο και διαδίδεται σχετικά πολύ γρήγορα μέσα στο υλικό, δημιουργώντας υπο-επιφανειακές οπές, χωρίς να γίνεται αισθητή η διάβρωση του στοιχείου. Η σημειακή αυτή διάβρωση οφείλεται στο γεγονός ότι μπορούν να δημιουργηθούν διαβρωτικά στοιχεία λόγω διαφοράς πυκνότητας οξυγόνου μεταξύ διαφορετικών σημείων της κατασκευής. Η διάβρωση αυτή παρατηρείται συνήθως στους κόμβους

σύνδεσης ελασμάτων από διαφορετικά μέταλλα, όταν η σύνδεση πραγματοποιηθεί με ηλώσεις ή κοχλίες. Η σημειακή διάβρωση είναι η πιο διαδεδομένη αλλά και επικίνδυνη μορφή διάβρωσης στις αεροναυπηγικές κατασκευές.

Η διάβρωση αποφλοίωσης (*exfoliation corrosion*) [9]: Είναι μια μορφή περικρυσταλλικής διάβρωσης, η οποία μπορεί να συμβεί όταν τα κράματα αλουμινίου έχουν τους κόκκους επιμηκυσμένους σε στρώματα παράλληλα με την επιφάνειά τους. Το προϊόν της διάβρωσης το οποίο παράγεται έχει μεγαλύτερο όγκο από τον όγκο του μητρικού μετάλλου. Ο επιπλέον όγκος αναγκάζει τα στρώματα να αποχωριστούν και κατ' αυτό τον τρόπο οδηγεί στη δημιουργία ρωγμών. Επειδή αυτό το είδος διάβρωσης είναι εύκολα αναγνωρίσιμο σε αρχικό στάδιο και το βάθος προσβολής είναι περιορισμένο, η διάβρωση αποφλοίωσης δεν προκαλεί ξαφνική δομική αστοχία. Εκτός από το παραπάνω φαινόμενο, κατά τη διάρκεια της έκθεσης ενός υλικού σε περιβάλλον διάβρωσης αποφλοίωσης, παρατηρείται και το φαινόμενο της ψαθυροποίησης του υλικού λόγω διάχυσης υδρογόνου στο εσωτερικό του. Η αποφλοίωση συμβαίνει κυρίως σε προϊόντα τα οποία έχουν επιμηκυσμένα σχήματα στα οποία οι κρύσταλλοί τους σχηματίζουν φύλλα τα οποία είναι σχετικά λεπτά σε σχέση με το μήκος και το πλάτος τους. Η δραστηριότητα αυτού του τύπου της διάβρωσης αυξάνει ελαφρώς σε όξινα περιβάλλοντα ή όταν το αλουμίνιο είναι σε σύζευξη με καθοδικά ανόμοιο μέταλλο. Ο μηχανισμός της αποφλοίωσης δεν επιτυγχάνεται λόγω της παρουσίας της τάσης. Κράματα με μεγαλύτερη ευαισθησία σε αποφλοίωση είναι τα θερμικώς κατεργάσιμα 2xxx και 7xxx κράματα αλουμινίου και συγκεκριμένα κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx. Σε αυτά τα κράματα,

η διάβρωση αποφλοΐωσης προκαλείται κυρίως λόγω της ανεπιθύμητης κατανομής των φάσεων. Η διεργασία για την εξαφάνιση αυτής της μορφής της διάβρωσης προϋποθέτει είτε την πιο ομοιόμορφη κατανομή των φάσεων είτε την μορφοποίηση των φάσεων σε πιο προχωρημένη μορφή.

Διάβρωση με ρωγμές (*crevice corrosion*) [1]: Η διάβρωση με ρωγμές μπορεί να εμφανιστεί σε στενές ρωγμές μεταξύ διαφορετικών μετάλλων (και μερικές φορές μεταξύ φύλλων του ίδιου μετάλλου) όπου υπάρχει συνήθως μια διαβάθμιση ποσότητας οξυγόνου μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής περιοχής της ρωγμής. Η συγκέντρωση οξυγόνου είναι η υψηλότερη έξω από την ρωγμή, όπου το οξυγόνο ανανεώνεται, και χαμηλότερη στο εσωτερικό, όπου το οξυγόνο έχει καταναλωθεί από τις αντιδράσεις διάβρωσης. Λόγω αυτής της διαβάθμισης οξυγόνου, εμφανίζεται πόλωση, προκαλώντας μια διάβρωση που μοιάζει πολύ με τη γαλβανική διάβρωση, αλλά είναι συνήθως λιγότερο έντονη. Η διάβρωση με ρωγμές απαιτεί συνήθως επαφή με τον αέρα. Η αποτελεσματικότερη μέθοδος πρόληψης είναι το σφράγισμα της ρωγμής.

Εργοδιάβρωση (*stress corrosion cracking*) [1]: Σύμφωνα με αυτόν τον τύπο της διάβρωσης, παρατηρείται αστοχία του υλικού όταν αυτό λειτουργεί υπό μηχανική τάση και σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η εργοδιάβρωση στα κράματα αλουμινίου είναι χαρακτηριστικά περικρυσταλλική. Επιπρόσθετα, αυτή δεν παρατηρείται σε όλα τα κράματα του αλουμινίου που υφίστανται περικρυσταλλική διάβρωση.

Συνήθως οι μορφές διάβρωσης που περιγράφηκαν προηγουμένως δεν εμφανίζονται αυτόνομα και ανεξάρτητα η μία από την άλλη αλλά συνυπάρχουν, αλληλοεπηρεάζονται και η μια μετατρέπεται στην άλλη.

1.4 Διάβρωση στα αεροσκάφη

Στα αεροσκάφη συνήθως η διάβρωση δεν εμφανίζεται από τα πρώτα στάδια της λειτουργικής τους ζωής. Το ενδεχόμενο συνδυασμού της βλάβης λόγω διάβρωσης με άλλες μορφές βλάβης, όπως π.χ. βλάβη λόγω κόπωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η συνέργεια μεταξύ της βλάβης λόγω διάβρωσης και της βλάβης λόγω κόπωσης, υποβαθμίζει σημαντικά την δομική ακεραιότητα των κατασκευαστικών στοιχείων και μπορεί να έχει μοιραίες συνέπειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συνέργειας των δυο παραπάνω παραγόντων είναι το θανατηφόρο ατύχημα στο αεροσκάφος τύπου *Boeing 737* της πτήσης 243 της εταιρείας *Aloha Airlines* [11,12] στην Χαβάη. Όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 6, η αστοχία του κατασκευαστικού στοιχείου ξεκίνησε από περιοχή υψηλής καταπόνησης του υλικού ανάμεσα σε οπές συνδέσεως, όπου με την συνέργεια της διάβρωσης πραγματοποιήθηκε ταχύτατη θραύση μεγάλου μέρους της ατράκτου του αεροσκάφους. Προφανώς αυτή η αστοχία δεν μπορούσε να προβλεφθεί από τους υπεύθυνους μηχανικούς κατά τους περιοδικούς ελέγχους του αεροσκάφους. Επιπρόσθετα, σε όλες τις έξι (6) πτήσεις της 28ης Απριλίου 1988, δεν αναφέρθηκε καμία βλάβη κατά τους συνήθεις οπτικούς ελέγχους πριν από την πτήση του αεροσκάφους.

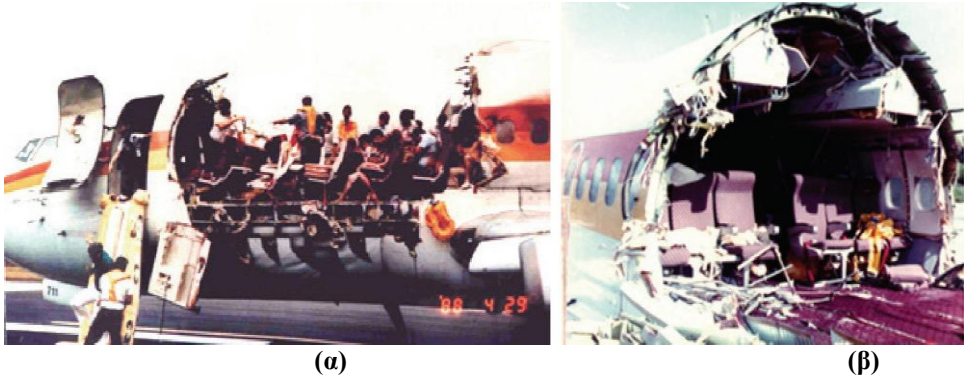


Σχήμα 6: (α) Πιθανή εκκίνηση της βλάβης σε περιοχή υψηλής καταπόνησης του κατασκευαστικού στοιχείου (β) απότομη θραύση μέρους της ατράκτου του αεροπλάνου τύπου Boeing 737 της πτήσης 243 της Aloha Airlines [11].

Η ταχεία αστοχία εκδηλώθηκε κατά την διάρκεια της πτήσης του αεροσκάφους και σε ύψος 24.000 ποδών. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές μικροφωτογραφίες του εν λόγω αεροσκάφους, το οποίο προσγειώθηκε στο αεροδρόμιο του Μάουϊ με ασφάλεια. Το συγκεκριμένο ατύχημα αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης της διάβρωσης στην υποβάθμιση της δομικής ακεραιότητας των αεροναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου, η οποία είναι, προφανώς, πρωτεύουσας σημασίας.

Τα τμήματα ενός αεροσκάφους που θεωρούνται ότι είναι τα πιο επιρρεπή στη διάβρωση είναι:

- σύστημα προσγείωσης και χώρος υποδοχής των τροχών,
- διάκενα πτερυγίων και φθορέων αντώσεως,
- νεροπαγίδες,
- περιοχές εξωτερικών επικαλύψεων.



Σχήμα 7: Χαρακτηριστικές μακροφωτογραφίες του ατυχήματος του αεροπλάνου του Boeing 737 της πτήσης 243 της Aloha Airlines [12].

Ειδικότερα το φαινόμενο της διάβρωσης εξελίσσεται κυρίως σε σημεία όπου υπάρχουν συνδέσεις, ηλώσεις και ρωγμές. Συνηθισμένα λάθη στις συναρμολογήσεις των μερών του αεροσκάφους, που ενισχύουν το σχηματισμό της διάβρωσης είναι τα παρακάτω [13]:

- ρωγμές στο σώμα της ατράκτου και στο σκελετό,
- κενά, όπου το στεγανωτικό υλικό αποτυγχάνει να εμποδίσει την διεπαφή επιφανειών και να μειώσει τις τάσεις που αναπτύσσονται,
- συναρμολογημένες συνδέσεις χωρίς σφράγιση (sealants),
- ενισχυτικές δομές (stringers) σε ελάσματα και σε περιοχές όπου εγκλωβίζεται το νερό λόγω βαρύτητας.

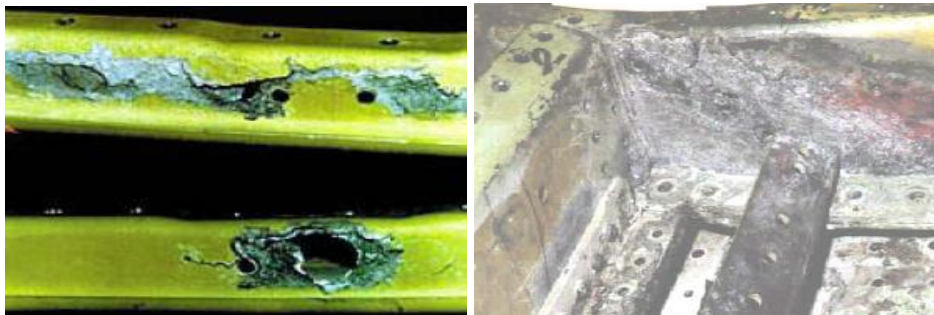
Σε ορισμένες εφαρμογές όπως π.χ. η καμπίνα των επιβατών (*pressurized cabin*) ή η ανώτερη επιδερμίδα των φτερών (*upper wing skins*), το πρόβλημα της διάβρωσης έχει πρακτικά αγνοηθεί, Σχήμα 8. Οι έλεγχοι διάβρωσης που πραγματοποιούνται, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ευαισθησίας των υλικών σε διάβρωση λαμβάνοντας υπόψη

παραμέτρους όπως η απώλεια βάρους, το βάθος της διάβρωσης και ο τύπος της διάβρωσης [14].



Σχήμα 8: Τμήματα καμπίνας αεροσκάφους Airbus A340 [13].

Άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα της ύπαρξης της διάβρωσης παρατηρούνται στις δοκούς εγκάρσιας ενίσχυσης (*stringers*) καθώς και σε εξωτερικές πόρτες του αεροσκάφους, π.χ. η πόρτα των εμπορευμάτων (*cargo door*), Σχήμα 9.



(α)

(β)

Σχήμα 9: Διάβρωση σε αεροσκάφος τύπου Boeing 720 (α) Διάβρωση αποφλοίωσης (*exfoliation corrosion*) στα ενισχυτικά ατράκτου και (β) φαινόμενο προχωρημένης διάβρωσης στην πόρτα εμπορευμάτων [15].

1.5 Προσομοίωση της διάβρωσης

Η ανάγκη για ενδελεχή μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης στα γηράσκοντα αεροσκάφη οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης. Με τη βοήθεια αυτών των δοκιμών προσομοιώνονται όσο το δυνατόν καλύτερα οι συνθήκες κάτω από τις οποίες διαβρώνεται ένα αεροσκάφος. Οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιούνται τόσο από τις αεροπορικές όσο και από άλλες βιομηχανίες. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης συνοψίζονται παρακάτω:

- η διάβρωση αποφλοίωσης (*exfoliation corrosion test*),
- η αλατονέφωση (*salt spray test*),
- η εναλλακτική εμβάπτιση (*alternate immersion test*),
- η κυκλική έκθεση σε αλατονέφωση (*cyclic acidified salt fog test*), και
- η περικρυσταλλική διάβρωση (*intergranular corrosion test*).

Στην παρούσα εργασία έχει επιλεγεί η μέθοδος της διάβρωσης αποφλοίωσης (*exfoliation corrosion*). Η δοκιμή αυτή είναι η πιο διαδεδομένη σε κραματικές σειρές 2xxx και 7xxx, καθώς όπως έχει αποδειχθεί για το κράμα 2024-T4, χρόνος έκθεσης 24 ωρών στη συγκεκριμένη δοκιμή ισοδυναμεί με περίπου 6 χρόνια έκθεσης σε φυσικές περιβαλλοντικές συνθήκες [16]. Η τεχνική της διάβρωσης αποφλοίωσης προκαλεί στα κράματα αλουμινίου τρηματική διάβρωση, περικρυσταλλική διάβρωση αλλά και ψαθυροποίηση λόγω διάχυσης και

παγίδευσης υδρογόνου. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή Exfoliation Corrosion Test (EXCO) σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34-90 [17]. Στα πλαίσια της ενότητας που ακολουθεί, η οποία ασχολείται με τις πειραματικές διαδικασίες της εργασίας αυτής, θα αναλυθεί περαιτέρω η δοκιμή της επιταχυνόμενης διάβρωσης αποφλοίωσης (EXCO).

1.6 Βιβλιογραφικές αναφορές για τη διάβρωση αεροναυπηγικών δομικών υλικών

Η αντίσταση ενός υλικού στη διάβρωση μπορεί να εκτιμηθεί με επιταχυνόμενες εργαστηριακές δοκιμές διάβρωσης, σύμφωνα με τις έγκυρες προδιαγραφές όπως είναι π.χ. η ASTM G1 [18]. Αυτές προβλέπουν τον χαρακτηρισμό του υλικού με βάση τη μέτρηση της απώλειας βάρους του υλικού, την μεταλλογραφική ανάλυση της μικροδομής, τον καθορισμό του μέγιστου βάθους προσβολής του υλικού λόγω της διάβρωσης και τέλος το είδος της προσβολής που προκαλεί η διάβρωση στο υλικό (π.χ τρηματική, αποφλοίωση, κλπ.). Με την εξαίρεση της ατμοσφαιρικής διάβρωσης του υλικού, σε καμία προδιαγραφή δεν προβλέπεται η διεξαγωγή μηχανικών δοκιμών στο διαβρωμένο υλικό και δεν συσχετίζεται ο βαθμός διάβρωσης με τις απομένουσες μηχανικές ιδιότητες.

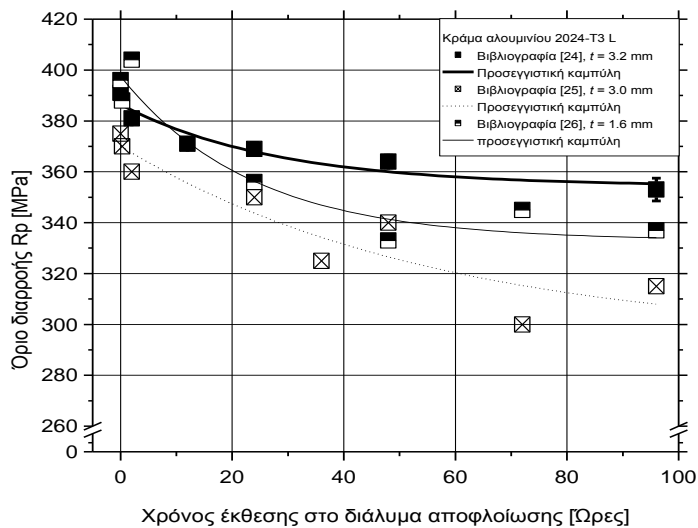
Στην βιβλιογραφία [19,20] διερευνήθηκε η επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος, όπως το ατμοσφαιρικό περιβάλλον, περιβάλλον

αλατονέφωσης, περιβάλλον διαλύματος αποφλοΐωσης καθώς και εναλλακτικής εμβάπτισης στην μικροδομή και στις απομένουσες εφελκυστικές μηχανικές ιδιότητες των κυριότερων αεροναυπηγικών ελατών κραμάτων αλουμινίου. Κυρίως για το κράμα 2024, το οποίο είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο ελατό κράμα αλουμινίου στο αεροσκάφος, πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετοι έλεγχοι για τη μηχανική συμπεριφορά του διαβρωμένου υλικού. Οι μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού και κόπωσης σε προδιαβρωμένα υλικά 2024-T3 [21, 22] έδειξαν σαφή υποβάθμιση των αρχικών μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, γεγονός που χαίρει περαιτέρω διερεύνησης. Σε μια πιο λεπτομερή προσέγγιση της βλάβης λόγω διάβρωσης στο ίδιο υλικό [23], παρατηρήθηκε σημαντική υποβάθμιση των εφελκυστικών ιδιοτήτων του υλικού με το χρόνο έκθεσής του στο επιταχυνόμενο εργαστηριακό διάλυμα αποφλοΐωσης.

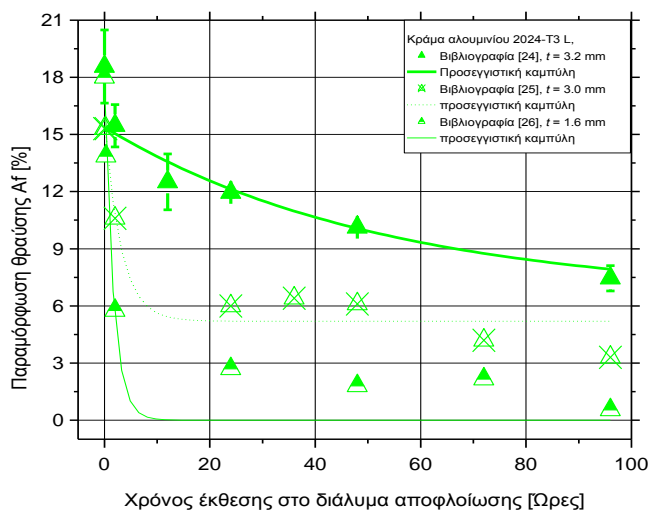
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 10, οι μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού του κράματος 2024- T3, για διάφορα ονομαστικά πάχη, κατά τη διαμήκη (*longitudinal*, L) διεύθυνση έλασης υποβαθμίζονται βαθμιαία και με εκθετικό τρόπο. Η έκθεση του υλικού στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοΐωσης οδηγεί σε μέτρια υποβάθμιση του ορίου διαρροής R_p . Αντιθέτως, η υποβάθμιση που παρατηρείται στην παραμόρφωση θραύσης A_f , για όλα τα δοκίμια, είναι δραματική.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για κράμα αλουμινίου ονομαστικού πάχους 3 mm αναφέρεται στη βιβλιογραφία [25] υποβάθμιση των ιδιοτήτων ολκιμότητας σε ποσοστό της τάξης μεγέθους του 35% στην L διεύθυνση και σε 50% εγκάρσια σε αυτή (*longitudinal transverse*, LT), ακόμα και για χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα

αποφλοιώσης μόνο 2 ωρών. Με την αύξηση του χρόνου έκθεσης του κράματος 2024-T3 στο διάλυμα αποφλοιώσης, η υποβάθμιση των εν λόγω ιδιοτήτων γίνεται δραματική και φθάνει σε ποσοστό της τάξης μεγέθους του 80% μετά από 96 ώρες έκθεσης. Στον ίδιο χρόνο έκθεσης, η υποβάθμιση των ιδιοτήτων αντοχής φθάνει μόνο σε ποσοστό της τάξης μεγέθους του 20% και προφανώς οφείλεται στο φαινόμενο των μικρορωγμών (*notch effect*) που έχουν προκληθεί από τον εκτεταμένο βαθμό διάβρωσης της επιφάνειας του υλικού.



(α)



(β)

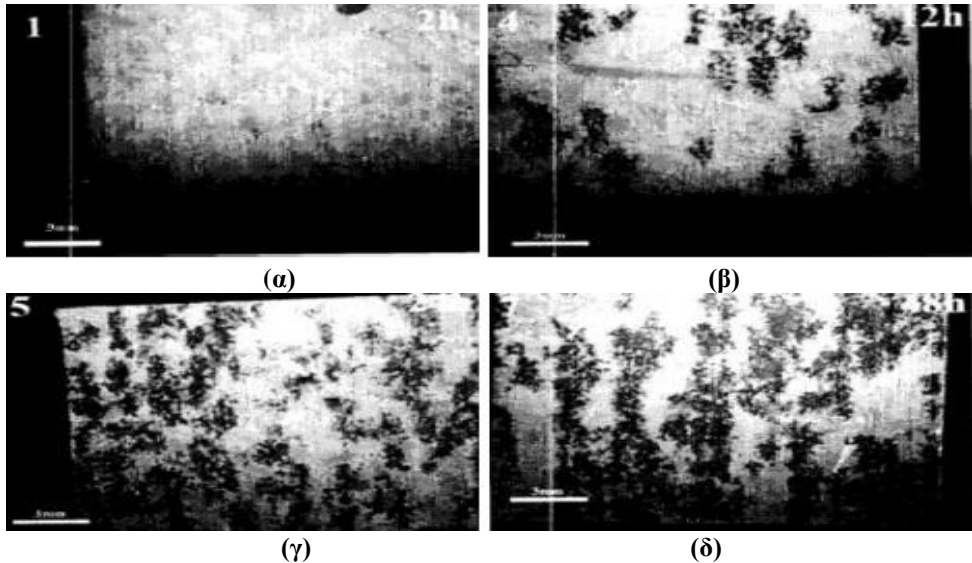
Σχήμα 10: Καμπύλες των μηχανικών ιδιοτήτων (α) ορίου διαρροής R_p και (β) παραμόρφωσης θραύσης A_f , του κράματος αλουμινίου 2024, για διάφορα ονομαστικά πάχη, συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης [24].

Στην εργασία [23] παρατηρήθηκε ότι η μηχανουργική αφαίρεση του επιφανειακού στρώματος των προϊόντων διάβρωσης που δημιουργήθηκε μετά από έκθεση 24 ωρών του κράματος 2024-T3 στο διάλυμα αποφλοιώσης, επαναφέρει τις ιδιότητες της εφελκυστικής αντοχής αλλά όχι και τις ιδιότητες της εφελκυστικής ολκιμότητας. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν ενδεικτικά για την λειτουργία ενός μηχανισμού ψαθυροποίησης λόγω του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Στην εργασία [10] πραγματοποιήθηκε ανάλυση των επιφανειών θραύσης που επιβεβαιώνουν την ύπαρξη ψαθυροποιημένης περιοχής στο υλικό. Τα διαβρωμένα υλικά υπεβλήθησαν σε πρότυπες πειραματικές δοκιμές όπου μετρήθηκε η ποσότητα υδρογόνου που προσροφήθηκε στο υλικό λόγω της διεργασίας

της διάβρωσης και συσχετίστηκε με την υποβάθμιση των εφελκυστικών ιδιοτήτων ολκιμότητας. Στην ίδια εργασία πραγματοποιήθηκε ευρείας κλίμακας διερεύνηση της μακροδομής καθώς και της μικροδομής του κράματος 2024-T3 για διαφορετικούς χρόνους έκθεσής του στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοΐωσης. Στην εργασία [24] αναφέρεται ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός υποβάθμισης τόσο σε δοκίμια εφελκυσμού όσο και σε δοκίμια δυσθραυστότητας είναι η ψαθυροποίηση λόγω διάχυσης υδρογόνου για μικρούς χρόνους έκθεσης, ενώ για μεγάλους χρόνους έκθεσης κυριαρχεί ο μηχανισμός υποβάθμισης λόγω των επιφανειακών εγκοπών, ως προϊόντα της διάβρωσης.

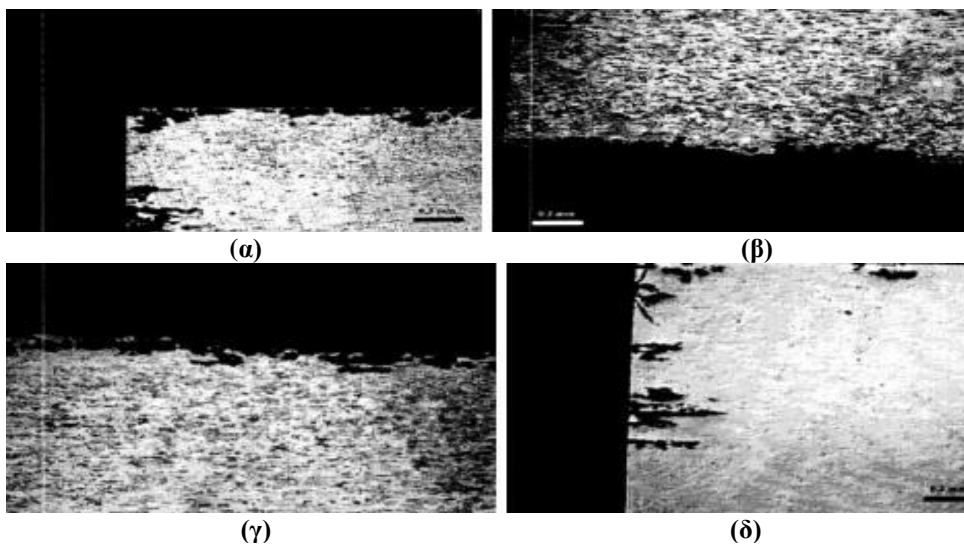
Χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 12 μακροφωτογραφίες των επιφανειών του κράματος 2024-T3 για διάφορους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοΐωσης. Αναφέρεται [10] ότι ο τύπος της διάβρωσης καθώς και η διαβρωτική προσβολή δεν είναι ομοιόμορφη στις επιφάνειες των δοκιμίων του υλικού για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα. Με την αύξηση του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα, η αρχική τρηματική προσβολή ακολουθείται από περικρυσταλλική προσβολή και καταλήγει στην δημιουργία ρωγμών που επεκτείνονται παράλληλα με την διεύθυνση εξέλασης και οι οποίες οδηγούν σε αποφλοΐωση για χρόνους έκθεσης έως και τις 96 ώρες. Η δημιουργία των περικρυσταλλικών ρωγμών αποτελεί βασική δίοδο για την είσοδο του υδρογόνου στο εσωτερικό του υλικού, ενώ ο πυθμένας των τρημάτων διάβρωσης είναι με την σειρά του θέση για περαιτέρω διάχυση του υδρογόνου. Στις εργασίες [10,27] τα παραπάνω αποτελέσματα για τις μηχανικές ιδιότητες συσχετίστηκαν με ποσοτικές μετρήσεις υδρογόνου στο υλικό, και δόθηκαν σαφείς ενδείξεις ότι η

παρατηρούμενη υποβάθμιση της ολκιμότητας οφείλεται στην ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου.



Σχήμα 12: Μακροφωτογραφίες της επιφάνειας του ελάσματος από κράμα 2024-T3 μετά από έκθεση (α) 2 ωρών, (β) 12 ωρών, (γ) 24 ωρών, (δ) 48 ωρών στο διάλυμα αποφλοιώσεως [10].

Στην εργασία [10], μελετήθηκε εκτενώς η μικροδομή των δοκιμίων μετά από την έκθεσή τους για διαφορετικούς χρόνους στο διάλυμα αποφλοιώσεως. Στο Σχήμα 13 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές μεταλλογραφίες με ενδεικτικά προϊόντα διάβρωσης καθώς και το βάθος διείσδυσης του διαβρωμένου στρώματος για δοκίμιο από κράμα 2024-T3, για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσεως. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, παρατηρείται επίσης μια ανομοιόμορφη κατανομή της διαβρωτικής προσβολής στις εξωτερικές επιφάνειες του υλικού. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι οι παράπλευρες επιφάνειες είναι πιο επιδεκτικές στη διάβρωση σε σύγκριση με τις επιφάνειες έλασης.



Σχήμα 13: Μεταλλογραφίες της διατομής του ελάσματος από κράμα 2024-T3 και προϊόντα διάβρωσης μετά από έκθεση (α) 12 ωρών, (β) 24 ωρών, (γ) 36 ωρών, (δ) 48 ωρών στο διάλυμα αποφλοίωσης [10].

Το πιο σημαντικό στοιχείο που αναδείχθηκε από την μεταλλογραφική ανάλυση είναι ότι το μέγιστο βάθος προσβολής λόγω διάβρωσης αποφλοίωσης ξεπερνάει τα 350 μm για έκθεση 24 ωρών στο διάλυμα αποφλοίωσης και αυξάνεται έως περίπου τα 500 μm ανά επιφάνεια διάβρωσης για μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης

Ο μηχανικός που θα σχεδιάσει και θα καθορίσει τα διαστήματα ελέγχου της δομικής ακεραιότητας των κρίσιμων κατασκευαστικών στοιχείων του αεροσκάφους, συνήθως λαμβάνει υπόψη του το όριο διαρροής R_p , τον κρίσιμο συντελεστή έντασης τάσεων K_{cr} , τις καμπύλες κόπωσης S/N και τις καμπύλες διάδοσης της ρωγμής da/dN του μεταλλικού υλικού του στοιχείου. Καθώς το υλικό του κατασκευαστικού στοιχείου διαβρώνεται, είναι αναμενόμενο οι παραπάνω μηχανικές ιδιότητες του υλικού να

μεταβάλλονται και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της δομικής ακεραιότητας του κατασκευαστικού στοιχείου. Μολονότι υπάρχουν αρκετές πληροφορίες στη βιβλιογραφία για την υποβάθμιση των εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων καθώς και των ιδιοτήτων κόπωσης, δεν υπάρχουν πληροφορίες για την επίδραση της διάβρωσης στον κρίσιμο συντελεστή έντασης τάσεων του υλικού, η οποία είναι η κατ' εξοχήν μηχανική ιδιότητα που λαμβάνεται υπόψη για το σχεδιασμό των ελαφρών κατασκευών.

Επιπρόσθετα, υπάρχει στη βιβλιογραφία η εμπειρική συσχέτιση ότι οι 24 ώρες επιταχυνόμενης διάβρωσης του κράματος 2024-T4 στο διάλυμα αποφλοΐωσης αντιστοιχούν σε διάβρωση 6 ημερολογιακών ετών του κατασκευαστικού στοιχείου ως προς την δημιουργούμενη αποφλοΐωσή του [16]. Ωστόσο, δεν υπάρχει απ' ευθείας εμπειρική συσχέτιση μεταξύ της επιταχυνόμενης και της φυσικής διάβρωσης ως προς τις απομένουσες μηχανικές ιδιότητες του ίδιου κράματος. Ενδιαφέρον για τον μηχανικό θα ήταν η απ' ευθείας συσχέτιση του βαθμού διάβρωσης του υλικού με την απομείωση που προκαλούν επιφανειακές εγχοπές στο υλικό, σε σχέση με την υποβάθμιση στις εφελκυστικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε με κατάλληλα υπολογιστικά εργαλεία ή μέσω αναζήτησης σε βάσεις δεδομένων να υπολογίσει κανείς τις απομένουσες μηχανικές ιδιότητες του διαβρωμένου υλικού.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι να παρουσιάσει την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, να περιγράψει τις πειραματικές διαδικασίες και να παρουσιάσει τις πειραματικές σειρές που διεξήχθησαν για τον προσδιορισμό της επίδρασης της διάβρωσης στις μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού για το αεροπορικό κράμα αλουμινίου 2024 T3 καθώς και για την μελέτη των μηχανισμών που προκαλούν την επίδραση αυτή.

2.1 Μεθοδολογία προσέγγισης

Η μεθοδολογία προσέγγισης περιελάμβανε αρχικά κοπή και καθαρισμό των δοκιμίων εφελκυσμού σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Σε ορισμένα από τα δοκίμια εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε μονωτικό υλικό ώστε να προστατευτεί η μία πλευρά του δοκιμίου από το διαβρωτικό περιβάλλον. Στη συνέχεια όλα τα δοκίμια, πλην των δοκιμίων αναφοράς, υπεβλήθησαν σε έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον (δηλαδή σε διαβρωτικό διάλυμα) στο Εργαστήριο, με σκοπό την επιταχυνόμενη διάβρωσή τους. Ακολουθώς, τόσο τα δοκίμια αναφοράς (αδιάβρωτα), όσο και τα διαβρωμένα δοκίμια του ίδιου υλικού υπεβλήθησαν σε μηχανική δοκιμή εφελκυσμού σύμφωνα με την αντίστοιχη προδιαγραφή. Αποτιμήθηκαν οι εφελκυστικές μηχανικές ιδιότητες από τις πειραματικές δοκιμές και καταγράφηκε η μεταβολή τους σε συνάρτηση με τον χρόνο

έκθεσής τους στο διαβρωτικό περιβάλλον. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός της επιφάνειας θραύσης των δοκιμίων εφελκυσμού για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).

2.2 Το κράμα αλουμινίου 2024-T3

Το κράμα αλουμινίου 2024 σε θερμική κατεργασία T3 είναι ευρέως διαδεδομένο σε αεροπορικές εφαρμογές, λόγω των αυξημένων μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει. Ανήκει στην κραματική σειρά 2xxx του αλουμινίου (Πίνακας 1), έχει υψηλή αντοχή στη διάβρωση, παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και είναι θερμικά κατεργάσιμο [28]. Η χημική σύσταση του κράματος 2024 παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Χημική σύσταση του κράματος Al 2024 T3 (% κ.β.) [12]

Υλικό	SI	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2024 T3	0,50	0,50	4,35	0,64	1,50	0,10	0,25	0,15	92,01

Τυπικές τιμές των εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος 2024- T3 που ευρέθηκαν στη βιβλιογραφία [28] εμφανίζονται στον Πίνακα 3.

Τα ελάσματα από κράμα αλουμινίου 2024 που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία είχαν θερμική κατεργασία T3, η οποία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [28] περιελάμβανε θερμική κατεργασία στερεής

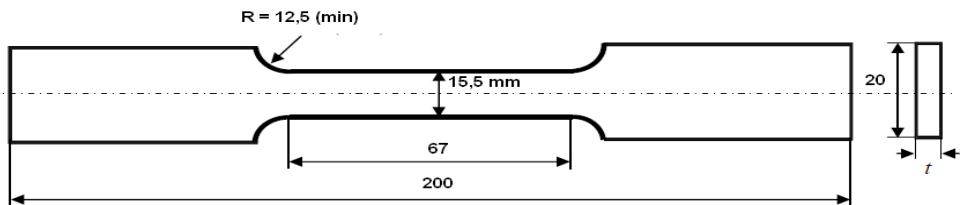
διαλυτοποίησης στους 495°C, βαφή στους 0°C, κατεργασία (έλαση) εν ψυχρώ και τέλος φυσική γήρανση (25°C) για δυο ημέρες.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος Al 2024 T3.

Υλικό	Όριο Διαρροής Rp [MPa]	Όριο Θραύσης Rm [MPa]	Μέτρο Ελαστικότητας E [GPa]	Παραμόρφωση Θραύσης Af [%]
2024 T3	345	485	72	18

2.3 Δοκίμια

Τα δοκίμια εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της Διπλωματικής Εργασίας κατασκευάστηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN 50125 [29] και ήταν σε μορφή ελασμάτων ονομαστικού πάχους 0.4 mm. Δοκίμια εφελκυσμού κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης (L) αλλά και εγκάρσια σε αυτή (LT). Η γεωμετρία των δοκιμίων εφελκυσμού που κατασκευάστηκαν παρουσιάζεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Γεωμετρία δοκιμίου εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN 50125.

Όλα τα δοκίμια κόπηκαν από ελάσματα που χορηγήθηκαν από την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία (ΕΑΒ). Τα ελάσματα αυτά είχαν γεωμετρικές διαστάσεις 35 x 50 cm. Τα δοκίμια κόπηκαν στο μηχανουργείο του Εργαστήριου Αντοχής Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Συνολικά κόπηκαν 115 δοκίμια εφελκυσμού.

2.4 Προστασία της επιφάνειας των δοκιμίων

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ακριβής μελέτη της επίδρασης της διάβρωσης στο έλασμα, ορισμένα από τα δοκίμια εφελκυσμού διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά τους (ακάλυπτη πλευρά). Συνεπώς, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον εφελκυσμό των δοκιμίων που διαβρώθηκαν από τη μία πλευρά και αυτών που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές. Η προετοιμασία των δοκιμίων για την διάβρωση ήταν η ακόλουθη: αρχικά τα δοκίμια καθαρίστηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G1 [18], με κατάλληλο υγρό που είχε ως βάση την ακετόνη και στη συνέχεια, σε ορισμένα από αυτά έγινε επικάλυψη της μιας πλευράς τους με μονωτική ταινία. Με αυτή την διαδικασία (*masking*), τα δοκίμια διακρίθηκαν σε δύο επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με τις επιφάνειες διάβρωσης τους. Τα δοκίμια που διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά τους θα ονοματίζονται από εδώ και στο εξής «ONE» ενώ τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους «BOTH».

2.5 Επιταχυνόμενη διάβρωση

Πριν την μηχανική δοκιμή εφελκυσμού των δοκιμίων είναι αναγκαία η επιταχυνόμενη έκθεση τους σε περιβάλλον διάβρωσης, ώστε να επιτευχθεί σε σύντομο χρόνο η προσομοίωση των φυσικών συνθηκών διάβρωσης στα «γηράσκοντα» αεροσκάφη. Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης υπάρχουν αρκετές δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης. Στην συγκεκριμένη Διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η διάβρωση με αποφλοίωση (*exfoliation corrosion* - EXCO) καθώς όπως έχει επισημανθεί σε προηγούμενες εργασίες, προσομοιώνει ικανοποιητικά στο εργαστήριο τη φυσική διάβρωση στα αεροπορικά κράματα αλουμινίου, σχετικά με τα χαρακτηριστικά της βλάβης διάβρωσης σε πραγματικές αεροπορικές κατασκευές [19,30]. Η επιταχυνόμενη διάβρωση EXCO πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34-90 [17]. Το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε διαβρωτικό διάλυμα που περιέχει τις χημικές ενώσεις χλωριούχο νάτριο (NaCl), νιτρικό κάλιο (KNO₃) και νιτρικό οξύ (HNO₃) αραιωμένες σε 1 λίτρο απιονισμένο νερό στις ακόλουθες αναλογίες:

234 gr NaCl
50 gr KNO ₃
6.3 mL HNO ₃ (70% κ.β.)

Η αρχική τιμή του pH ήταν 0.4 και η θερμοκρασία του διαλύματος διατηρήθηκε σταθερή στους 25±2°C. Στην παρούσα εργασία

χρησιμοποιήθηκε αναλογία όγκου διαλύματος προς επιφάνεια δοκιμίου ίση με 10 ml/cm^2 . Οι αναλογίες των χημικών ενώσεων ανά κατηγορία δοκιμίων στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης (EXCO) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Αναλογίες των χημικών ενώσεων ανά δοκίμιο έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα EXCO.

Δοκίμια	Συνολική Επιφάνεια Διάβρωσης [cm ²]	Ποσότητα Nacl [gr]	Ποσότητα KNO ₃ [gr]	Ποσότητα HNO ₃ [ml]	Απιονισμένο Νερό [ml]
Δύο επιφάνειες διάβρωσης «BOTH»	27.9	65.7	14	1.76	279
Μία επιφάνεια διάβρωσης «ONE»	13.95	32,85	7	0.88	139.5

Πριν την έναρξη της δοκιμής επιταχυνόμενης διάβρωσης τα δοκίμια καθαρίστηκαν από όλες τις πλευρές τους χρησιμοποιώντας ακετόνη. Στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν στο διάλυμα αποφλοίωσης και εκτέθηκαν για διάφορους χρόνους. Με το πέρας της επιλεγείσας χρονικής περιόδου στο διάλυμα, τα δοκίμια αφαιρούνταν προσεκτικά από τα ειδικά διαρρυθμισμένα δοχεία εμβάπτισης (δοχεία PVC), ξεπλένονταν με νερό και αφήνονταν να στεγνώσουν.

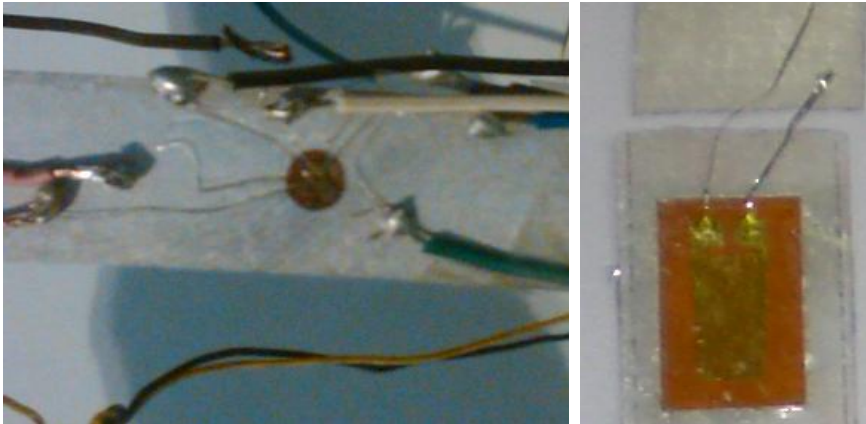
2.6 Δοκιμές εφελκυσμού

Τα απαραίτητα δεδομένα για τον προσδιορισμό της επίδρασης της διάβρωσης στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2024 T3 προέκυψαν με τη διεξαγωγή δοκιμών εφελκυσμού σε δοκίμια, που είχαν ήδη εκτεθεί σε διαβρωτικό περιβάλλον αποφλοιώσης για ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN 50125 [29]. Για την διεξαγωγή τους χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρομηχανική μηχανή γενικών δοκιμών MTS τύπου 569329-04, με ικανότητα εφαρμογής μέγιστου εφελκυστικού φορτίου 10 kN (Σχήμα 15) του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του ΕΜΠ. Σε όλες τις δοκιμές εφελκυσμού, ο ρυθμός μετατόπισης των αρπαγών της μηχανής εφελκυσμού διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 0.3 mm/min. Η καταγραφή της επιμήκυνσης των υπό εξέταση δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κατάλληλου επιμηκυνσιομέτρου (*extensometer*). Επιπρόσθετα, ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (*strain gages*) [31] επικολλήθηκαν σε επιλεγμένα δοκίμια εφελκυσμού για τη μελέτη των δεδομένων σε σχέση με τα αντίστοιχα του επιμηκυνσιομέτρου. Στο Σχήμα 16 απεικονίζονται οι δύο τύποι ηλεκτρομηκυνσιομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Στο Σχήμα 16(α) απεικονίζεται ένα ηλεκτρομηκυνσιόμετρο με δυνατότητα καταγραφής παραμόρφωσης σε τρεις διευθύνσεις (ροζέτα τύπου 0°, 45° και 90°), με συντελεστή ευαισθησίας (*gage factor*) $K=2.09$ και με απόκλιση 1% επί της τιμής. Το Σχήμα 16 (β) παρουσιάζει ένα ηλεκτρομηκυνσιόμετρο με δυνατότητα καταγραφής παραμόρφωσης σε μία μόνο διεύθυνση που έχει συντελεστή

ευαισθησίας (*gage factor*) $K= 2.08$, με απόκλιση 1% επί της τιμής. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων όλα τα δεδομένα δύναμης, μετατόπισης των αρπαγών της μηχανής και παραμόρφωσης του επιμηκυνσιόμετρου καταγράφονταν και αποθηκεύονταν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχήμα 15: Ηλεκτρομηχανική μηχανή γενικών δοκιμών MTS.



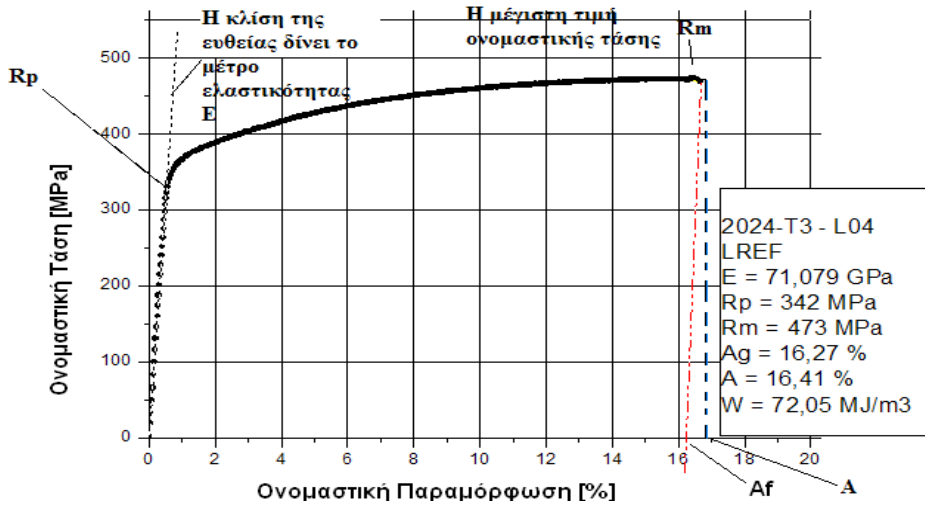
(α)

(β)

Σχήμα 16: Ηλεκτρομηκυσιόμετρα (α) τριών διευθύνσεων και (β) μιας διεύθυνσης παραμόρφωσης.

Στο σημείο αυτό, για την καλύτερη εποπτεία των πειραματικών αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται συνοπτικά οι αποτιμήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν από την δοκιμή εφελκυσμού. Από τις πειραματικές τιμές δύναμης – μετατόπισης του μήκους αναφοράς του δοκιμίου, υπολογίζεται η καμπύλη ονομαστικών τάσεων - ονομαστικών παραμορφώσεων. Μια τυπική τέτοια καμπύλη παρουσιάζεται στο Σχήμα 17 που απεικονίζει τον τρόπο αποτίμησης των εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων που ενδιαφέρουν.

Με βάση την καμπύλη ονομαστικών τάσεων - ονομαστικών παραμορφώσεων, προσδιορίζεται και η γενικότερη εφελκυστική συμπεριφορά του εκάστοτε υλικού. Ένα υλικό θεωρείται ότι είναι όλκιμο (*ductile*) όταν επιδέχεται μεγάλες παραμορφώσεις μέχρι την τελική του αστοχία. Τα όλκιμα υλικά μπορούν να παραμορφώνονται πλαστικά και να αποταμιεύουν μεγάλες τιμές ελαστικής ενέργειας παραμορφώσεων ανά μονάδα όγκου έως τη θραύση τους. Αντίθετα, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως ψαθυρό (*brittle*) όταν αστοχεί αμέσως μόλις εισέλθει στην περιοχή πλαστικών παραμορφώσεων, δηλαδή ξεφύγει από τη γραμμική περιοχή [32].



Σχήμα 17: Καμπύλη ονομαστικών τάσεων - ονομαστικών παραμορφώσεων του δοκιμίου αναφοράς κράματος 2024 T3 στην διεύθυνση έλασης (L).

Με τη βοήθεια του Σχήματος 17 που παρουσιάζει μια τυπική εφελκυστική καμπύλη για το κράμα αναφοράς, αποτιμήθηκαν οι παρακάτω μηχανικές ιδιότητες [32]:

- ❖ Μέτρο ελαστικότητας (*modulus of elasticity, E*): Ορίζεται ως η κλίση της ευθείας που είναι εφαπτόμενη της καμπύλης ονομαστικών τάσεων-ονομαστικών παραμορφώσεων, στην γραμμικώς ελαστική περιοχή. Το μέτρο ελαστικότητας μετράται σε GPa.
- ❖ Όριο διαρροής (*yield strength, R_p*): Ορίζεται ως το σημείο εκείνο στο εμφανίζονται για πρώτη φορά μη αντιστρεπτές παραμορφώσεις. Δηλαδή, δημιουργούνται πλαστικές παραμορφώσεις οι οποίες δεν μηδενίζονται με την απομάκρυνση του επιβαλλόμενου φορτίου. Έχει ως μονάδα μέτρησης τα MPa.

- ❖ Εφελκυστική αντοχή (*tensile strength*, R_m): Είναι η μέγιστη ονομαστική τάση που αναπτύσσεται στο υλικό πριν αυτό αστοχήσει. Υπολογίζεται ως το πηλίκο του μέγιστου φορτίου P_{max} προς την αρχική διατομή του υλικού A_0 . Μετράται σε MPa.
- ❖ Παραμόρφωση θραύσης (*elongation at fracture*, A_f): Αποτελεί ένα μέτρο της ολκιμότητας (*ductility*) του υλικού. Ορίζεται ως το πηλίκο της μεταβολής του μήκους της περιοχής μέτρησης του εν λόγω δοκιμίου, προς το αρχικό μήκος αναφοράς (L_0). Σύμφωνα με το Σχήμα 14 αν από το σημείο θραύσης (τελευταίο σημείο της καμπύλης) φέρουμε παράλληλη ως προς την ελαστική περιοχή (γραμμική) του υλικού, τότε το σημείο τομής αυτής της ευθείας με τον άξονα των ονομαστικών παραμορφώσεων δίνει την παραμόρφωση θραύσης. Η παραμόρφωση θραύσης είναι αδιάστατο μέγεθος ενώ συνήθως εκφράζεται ως επί τοις εκατό παραμόρφωση [%].
- ❖ Παραμόρφωση για τη θραύση (*elongation to fracture*, A): Αποτελεί ουσιαστικά τη συνολική παραμόρφωση που έχει υποστεί το υλικό μέχρι την αστοχία του. Δηλαδή περιλαμβάνει τόσο την πλαστική παραμόρφωση (A_f) όσο και την αντίστοιχη ελαστική παραμόρφωση. Σχηματικά απεικονίζεται ως το σημείο τομής του άξονα των ονομαστικών παραμορφώσεων με την ευθεία που φέρεται από το σημείο θραύσης (τελευταίο σημείο της καμπύλης). Είναι σύνηθες να εκφράζεται επίσης ως επί τοις εκατό παραμόρφωση [%].
- ❖ Πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης (*strain energy density*, W): Είναι το εμβαδό κάτω από ολόκληρη την καμπύλη

ονομαστικής τάσης/ονομαστικής παραμόρφωσης του εφελκυσμού μέχρι τη θραύση. Αντιπροσωπεύει την ικανότητα του υλικού να απορροφά/ αποθηκεύει ενέργεια παραμορφώσεων στην μικροδομή του ως την αστοχία του και υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της εφελκυστικής καμπύλης. Η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης έχει μονάδες ενέργειας ανά όγκο, δηλαδή MJ/m^3 .

2.7 Μελέτη επιφανειών θραύσης

Η μελέτη της επιφάνεια θραύσης επιλεγμένων δοκιμίων εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια συσκευής ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM) της Σχολής Μεταλλειολόγων και Μηχανικών Μεταλλείων του ΕΜΠ. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου JEOL JSM- 6100 με δυνατότητα μεγέθυνσης έως και χίλιες φορές ($\times 1000$) και ονομαστικό φορτίο 25 kV. Η προετοιμασία των δοκιμίων αρχικά περιελάμβανε τον καθαρισμό της επιφάνειας από τα προϊόντα διάβρωσης. Στην συνέχεια τα δοκίμια κόβονταν στο κατάλληλο μέγεθος (περίπου $2 \times 2 \text{ cm}^2$). Για την παρατήρηση με SEM είναι απαραίτητο να εξασφαλισθεί η αγωγιμότητα του δοκιμίου κατά την διάρκεια της παρατήρησης. Για τον λόγο αυτό στα κομμάτια των θραυσμένων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε γραφίτης. Στην συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνταν στον θάλαμο κενού του μικροσκοπίου για την παρατήρηση.

2.8 Πειραματικές σειρές δοκιμών

Στις πειραματικές σειρές που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια που είχαν κοπεί μηχανουργικά τόσο κατά τη διεύθυνση έλασης (L), όσο και εγκάρσια σε αυτή (LT). Ορισμένα από τα δοκίμια διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους («BOTH») ενώ άλλα είχαν επικαλυμμένη τη μία πλευρά τους («ONE») κατά τη διάρκεια της έκθεσής τους στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι διάφοροι χρόνοι έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης καθώς και ο ακριβής αριθμός των δοκιμίων που υποβλήθηκαν στην αντίστοιχη δοκιμή διάβρωσης.

Πίνακας 5: Δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια κράματος 2024 T3, πάχους 0.4 mm, μετά την έκθεση τους σε περιβάλλον διάβρωσης αποφλοιώσης για διάφορους χρόνους.

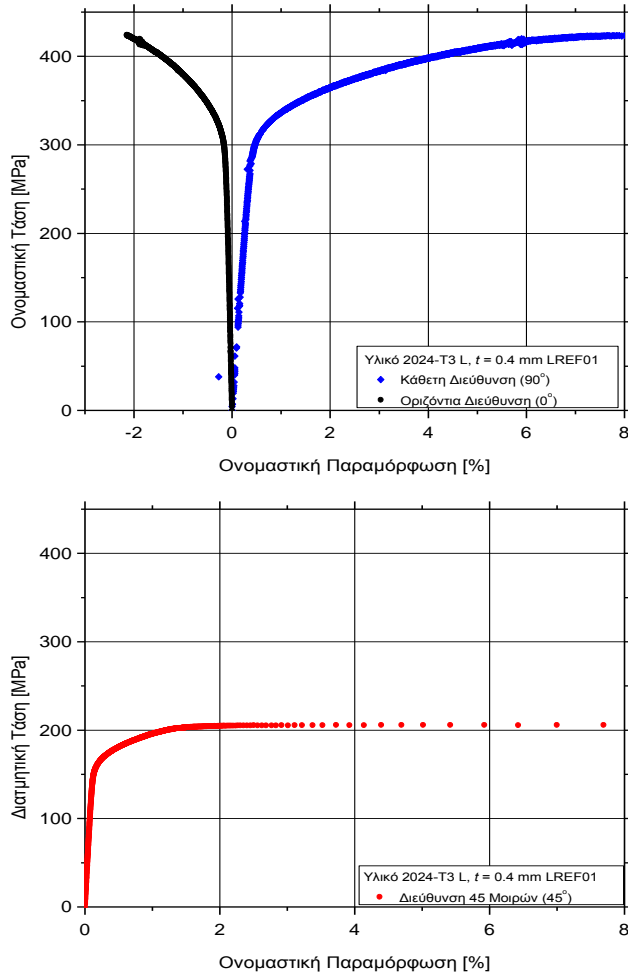
ΥΛΙΚΟ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΟΠΗΣ				ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ [ΩΡΕΣ]
		L		LT		
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 2024 T3	9	5		4		Αναφοράς
		«BOTH»	«ONE»	«BOTH»	«ONE»	
	11	2	4	2	3	t ₁ = 0,33
	11	4	3	2	2	t ₂ = 0,66
	12	4	2	3	3	t ₃ = 1,33
	11	3	3	2	3	t ₄ = 2
	10	3	2	2	3	t ₅ = 4
	7	2	2	1	2	t ₆ = 6
	4	0	1	1	2	t ₇ = 12
	2	0	0	1	1	t ₈ = 20
	4	0	1	1	2	t ₉ = 24

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Τα εν λόγω αποτελέσματα θα αξιοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη επίδραση της διάβρωσης στην δομική ακεραιότητα κατασκευαστικών υλικών του αεροσκάφους καθώς και τον ποσοτικό προσδιορισμό της υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, εξαιτίας της προκαλούμενης βλάβης λόγω διάβρωσης.

3.1 Δοκίμια αναφοράς

Για να μελετηθεί η συμπεριφορά των αδιάβρωτων δοκιμίων εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (*strain gage*) με δυνατότητα καταγραφής τιμών παραμόρφωσης σε τρεις διευθύνσεις ελέγχου (ροζέτα τύπου οριζόντια ή 0° , 45° και κάθετη ή 90°). Στο Σχήμα 18 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες ονομαστικής τάσης και ονομαστικών παραμορφώσεων για το δοκίμιο αναφοράς.

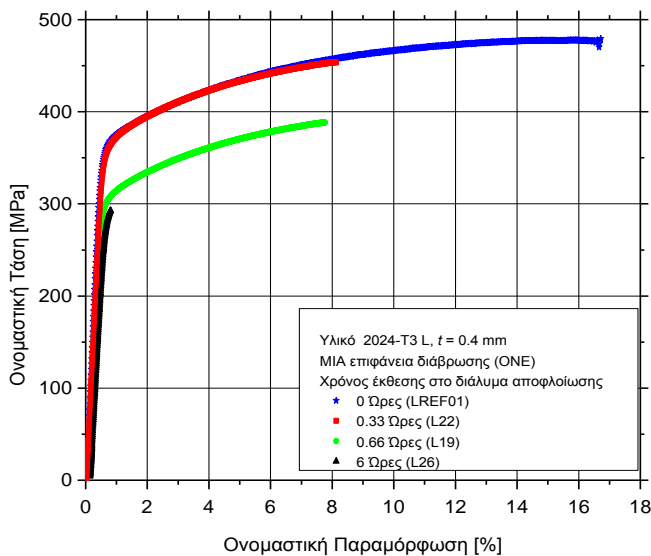


Σχήμα 18: Τυπικές καμπύλες ονομαστικών τάσεων – ονομαστικών παραμορφώσεων για δοκίμιο αναφοράς στη διεύθυνσης έλασης (L).

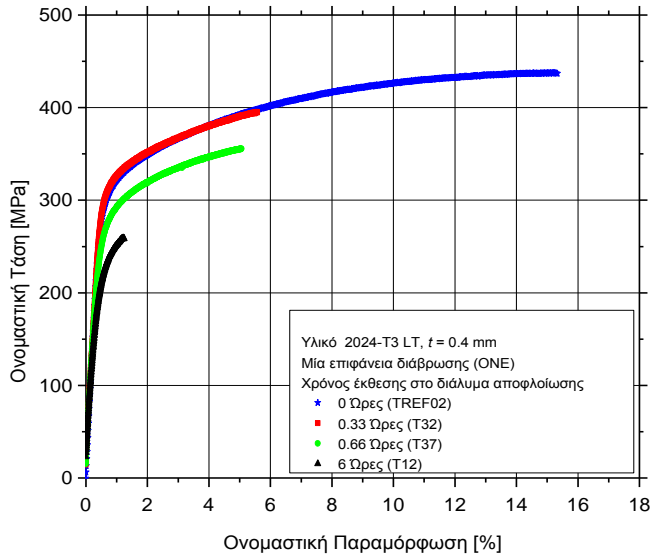
3.2 Εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων από τον χρόνο έκθεσης

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες ονομαστικών τάσεων - ονομαστικών παραμορφώσεων για ενδεικτικές τιμές του χρόνου έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης. Στο Σχήμα 19(α) διακρίνεται ότι για

τα δοκίμια της L διεύθυνσης έλασης που διαβρώθηκαν μόνο από τη μια επιφάνεια τους, η βαθμιαία αύξηση του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα οδήγησε σε μείωση τόσο της τιμής του ορίου αντοχής όσο και της τιμής της παραμόρφωσης θραύσης, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 19(β) παρουσιάζονται οι καμπύλες ονομαστικής τάσης-ονομαστικής παραμόρφωσης για δοκίμια που κόπηκαν κάθετα στη διεύθυνση έλασης και διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά τους. Οι εν λόγω καμπύλες παρουσιάζονται να έχουν ανάλογη συμπεριφορά με αυτή των δοκιμίων της L διεύθυνσης έλασης για αυξανόμενο χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα. Όπως ήταν αναμενόμενο, από το Σχήμα 19 διακρίνεται ότι οι τιμές του ορίου αντοχής και της παραμόρφωσης θραύσης για τα δοκίμια της διεύθυνσης L, είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των δοκιμίων της διεύθυνσης LT για τους διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα.



(α)



(β)

Σχήμα 19: Τυπικές καμπύλες ονομαστικών τάσεων - ονομαστικών παραμορφώσεων για διάφορους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσεως: (α) για δοκίμια της διαμήκης διεύθυνσης έλασης L και (β) για δοκίμια της διεύθυνσης LT.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού του κράματος 2024-T3 για διάφορους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσεως παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Ειδικότερα, ο Πίνακας 6(α) συνοψίζει τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών που διενεργήθηκαν σε δοκίμια κράματος 2024-T3, τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης L και διαβρώθηκαν μόνο από τη μία επιφάνεια τους. Στον Πίνακα 6(β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών των δοκιμίων που κόπηκαν επίσης κατά τη διεύθυνση έλασης L και διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δοκιμίων 2024-T3 που κόπηκαν κατά την κάθετη στη

διεύθυνση έλασης LT συνοψίζονται στους Πίνακες 6(γ) και Πίνακα 6(δ), αντίστοιχα.

Πίνακας 6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων εφελκυσμού δοκιμίων κράματος 2024-T3 ονομαστικού πάχους 0.4 mm (α) στη διεύθυνση έλασης L και μία επιφάνεια διάβρωσης, (β) στη διεύθυνση έλασης L και δύο επιφάνειες διάβρωσης, (γ) στη διεύθυνση LT και μία επιφάνεια διάβρωσης και (δ) στη διεύθυνση LT και δύο επιφάνειες διάβρωσης.

(α)

ΔΟΚΙΜΙΑ 2024 T3, L Μία Επιφάνεια Διάβρωσης	Χρόνος Έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσεως [Ωρες]						
	0	0,33	0,66	1,33	2	4	6
Μηχανικές Ιδιότητες							
Όριο Διαρροής, R_p [MPa]							
Μέση τιμή	326	309	276	269	270	260	211
Τυπική Απόκλιση	27	20	27	21	10	6	19
Όριο Αντοχής, R_m [MPa]							
Μέση τιμή	461	428	389	359	358	329	365
Τυπική Απόκλιση	16	17	9	3	18	14	28
Παραμόρφωση Θραύσεως, A_f [%]							
Μέση τιμή	15.91	6.98	5.85	3.53	3.40	0.82	0.60
Τυπική Απόκλιση	0.43	0.76	0.90	0.24	0.10	0.26	0.21
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης, W [MJ/m³]							
Μέση τιμή	69.54	28.34	19.68	11.77	11.17	2.23	0.86
Τυπική Απόκλιση	3.64	4.49	3.15	2.30	1.50	1.28	0.50
Μέτρο Ελαστικότητας, E [GPa]							
Μέση τιμή	72.682	68.143	69.032	70.051	44.618	64.864	63.556
Τυπική Απόκλιση	2.620	0.362	2.252	0.221	5.650	0.553	2.922

(β)

ΔΟΚΙΜΙΑ 2024 T3, L Δύο Επιφάνειες Διάβρωσης	Χρόνος Έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης [Ωρες]						
	0	0,33	0,66	1,33	2	4	6
Μηχανικές Ιδιότητες							
Όριο Διαρροής, R_p [MPa]							
Μέση τιμή	326	299	268	240	238	224	151
Τυπική Απόκλιση	27	21	19	20	25	19	14
Όριο Αντοχής, R_m [MPa]							
Μέση τιμή	461	416	365	323	311	278	173
Τυπική Απόκλιση	16	27	28	32	40	31	27
Παραμόρφωση Θραύσης, A_f [%]							
Μέση τιμή	15.91	6.02	3.23	2.21	2.24	0.64	0.41
Τυπική Απόκλιση	0.43	0.31	0.60	0.50	0.70	0.16	0.20
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης, W [MJ/m³]							
Μέση τιμή	69.54	23.37	11.39	6.78	8.17	1.64	0.36
Τυπική Απόκλιση	3.64	2.75	2.00	3.20	1.20	1.12	0.50
Μέτρο Ελαστικότητας, E [GPa]							
Μέση τιμή	72.682	67.981	66.241	67.339	60.764	57.878	51.718
Τυπική Απόκλιση	2.620	0.815	1.740	2.913	3.410	8.433	0.885

(7)

ΔΟΚΙΜΙΑ 2024 T3, LT Μία Επιφάνεια Διάβρωσης	Χρόνος Έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης [Ωρες]						
	0	0,33	0,66	1,33	2	4	6
Μηχανικές Ιδιότητες							
Όριο Διαρροής, R_p [MPa]							
Μέση τιμή	294	275	259	239	234	199	179
Τυπική Απόκλιση	4	6	7	17	9	25	19
Όριο Αντοχής, R_m [MPa]							
Μέση τιμή	438	407	354	344	339	294	265
Τυπική Απόκλιση	8	9	5	19	13	28	6
Παραμόρφωση Θραύσης, A_f [%]							
Μέση τιμή	13.64	4.97	4.95	2.03	2.36	1.46	0.94
Τυπική Απόκλιση	1.27	0.87	0.16	1.01	0.18	0.53	0.09
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης, W [MJ/m³]							
Μέση τιμή	54.87	21.91	16.17	10.10	8.03	4.24	1.97
Τυπική Απόκλιση	4.64	2.15	0.52	3.46	0.86	2.11	0.52
Μέτρο Ελαστικότητας, E [GPa]							
Μέση τιμή	67.051	64.325	62.743	61.453	62.299	49.890	45.686
Τυπική Απόκλιση	1.140	5.235	1.666	3.803	2.171	4.011	2.098

(δ)

ΔΟΚΙΜΙΑ 2024 T3, LT Δύο Επιφάνειες Διάβρωσης	Χρόνος Έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσεως [Ωρες]						
	0	0,33	0,66	1,33	2	4	6
Μηχανικές Ιδιότητες							
Όριο Διαρροής, R_p [MPa]							
Μέση τιμή	294	236	217	189	187	184	103
Τυπική Απόκλιση	4	6	17	19	20	7	3
Όριο Αντοχής, R_m [MPa]							
Μέση τιμή	438	337	329	301	305	260	127
Τυπική Απόκλιση	8	14	27	10	25	27	15
Παραμόρφωση Θραύσεως, A_t [%]							
Μέση τιμή	13.64	3.34	2.85	1.76	1.76	1.35	0.13
Τυπική Απόκλιση	1.27	1.28	1.47	0.90	0.50	0.23	0.40
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης, W [MJ/m³]							
Μέση τιμή	54.87	10.67	9.76	6.15	5.60	3.81	0.16
Τυπική Απόκλιση	4.64	3.60	2.50	1.89	0.20	1.45	1.30
Μέτρο Ελαστικότητας, E [GPa]							
Μέση τιμή	67.051	61.839	64.374	55.669	55.667	53.380	50.126
Τυπική Απόκλιση	1.140	0.443	3.045	6.708	1.001	2.605	0.864

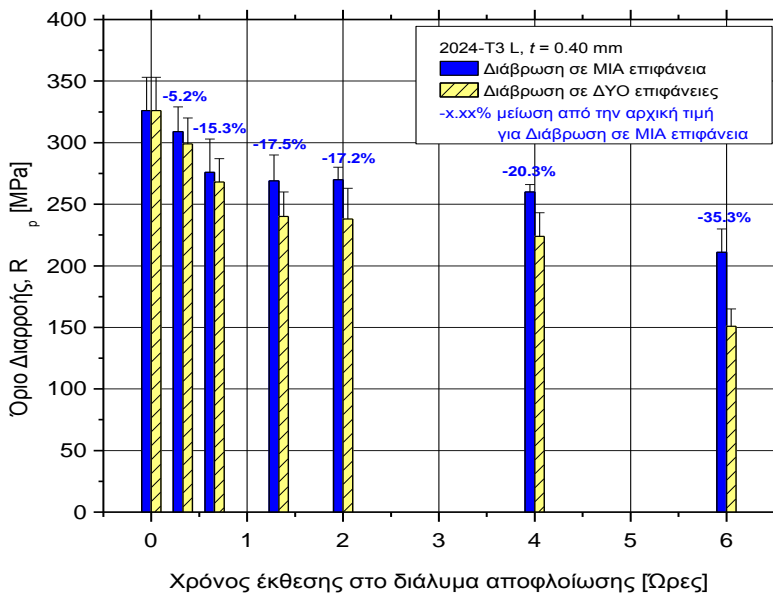
3.3 Αποτίμηση εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων

3.3.1 Όριο διαρροής R_p

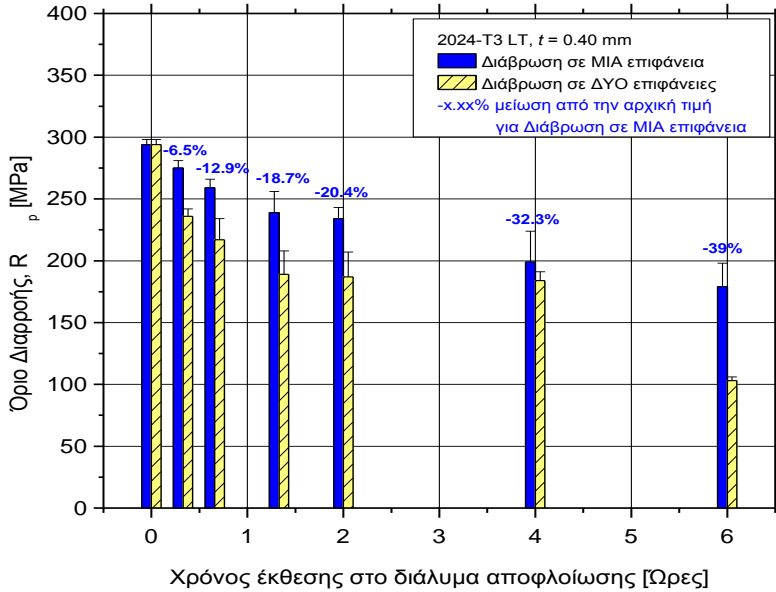
Κατά την αποτίμηση των δοκιμών εφελκυσμού στα δοκίμια αναφοράς στην διεύθυνση L, δίδεται η τιμή του ορίου διαρροής $R_p = 326$ MPa. Στη βιβλιογραφία [24] για αντίστοιχο υλικό με ονομαστικό πάχος 3.2 mm, δίδεται ως μέση τιμή του ορίου διαρροής $R_p = 391$ MPa. Η διαφορά των 65 MPa ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, θεωρείται αποδεκτή καθώς υπεισέρχονται και οι τυπικές αποκλίσεις των πειραματικών μετρήσεων.

Στα δύο σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το όριο διαρροής για τους διάφορους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης. Στο Σχήμα 20 παρατηρείται μέτρια υποβάθμιση του ορίου διαρροής και για τις δύο διευθύνσεις που μελετήθηκαν και για δοκίμια που διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για έκθεση 6 ωρών στο διάλυμα αποφλοιώσης, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 20(α), τα δοκίμια που κόπηκαν κατά την L διεύθυνση και διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά τους δίδουν τιμή ορίου διαρροής $R_p = 211$ MPa, δηλαδή παρατηρήθηκε μείωση 115 MPa σε σχέση με την αρχική τιμή του ορίου διαρροής των δοκιμών αναφοράς. Τα δοκίμια της ίδιας διεύθυνσης έλασης που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους για αντίστοιχο χρόνο, παρουσιάζουν τιμή ορίου διαρροής $R_p = 151$ MPa. Η μείωση των 175 MPa που παρουσιάζει η τιμή του ορίου διαρροής των δοκιμών με δύο επιφάνειες διάβρωσης και L

διεύθυνσης κοπής, σε σχέση με την τιμή του ορίου διαρροής των αδιάβρωτων δοκιμίων, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά σημαντική. Στο Σχήμα 20(β) δίδεται η τιμή του ορίου διαρροής $R_p = 294$ MPa για τα αδιάβρωτα δοκίμια, η οποία όπως ήταν αναμενόμενο παρουσιάζει μείωση σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του ορίου διαρροής για τα δοκίμια που κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης. Το σύνολο των τιμών του ορίου διαρροής της διεύθυνσης LT, για όλους τους χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα, παρουσιάζει μείωση σε σύγκριση με τις τιμές του ορίου διαρροής για τα δοκίμια της L διεύθυνσης. Συγκεκριμένα για έκθεση 6 ωρών στο διάλυμα αποφλοιώσης, τα δοκίμια που διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά τους δίδουν τιμή ορίου διαρροής $R_p = 179$ MPa ενώ τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους $R_p = 103$ MPa.



(α)



(β)

Σχήμα 20: Μεταβολή του ορίου διαρροής R_p για τους διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης για το κράμα 2024-T3 (α) διεύθυνση L και (β) διεύθυνση LT.

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζονται αδιάστατες οι τιμές του ορίου διαρροής που αποτιμήθηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω ως ποσοστά επί των αρχικών τιμών, των δοκιμίων αναφοράς για κάθε διεύθυνση. Οι καμπύλες του σχήματος αποτελούν εκθετική προσέγγιση και οι συντελεστές που περιγράφουν την αντίστοιχη Εξίσωση (1) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

$$y = y_0 + A_1 \cdot \exp(x / t_1) \quad (1)$$

Στην εξίσωση αυτή x είναι ο χρόνος έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης και A_1 , t_1 , y_0 είναι εμπειρικές σταθερές που εξαρτώνται από την εκάστοτε μηχανική ιδιότητα και το τεχνολογικό μεταλλικό υλικό.

Πίνακας 7: Συντελεστές της εξίσωσης που προσομοιώνει την εκθετική παρεμβολή (α) για δοκίμια που κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης και (β) για δοκίμια που κόπηκαν κατά τη διεύθυνση LT.

(α)

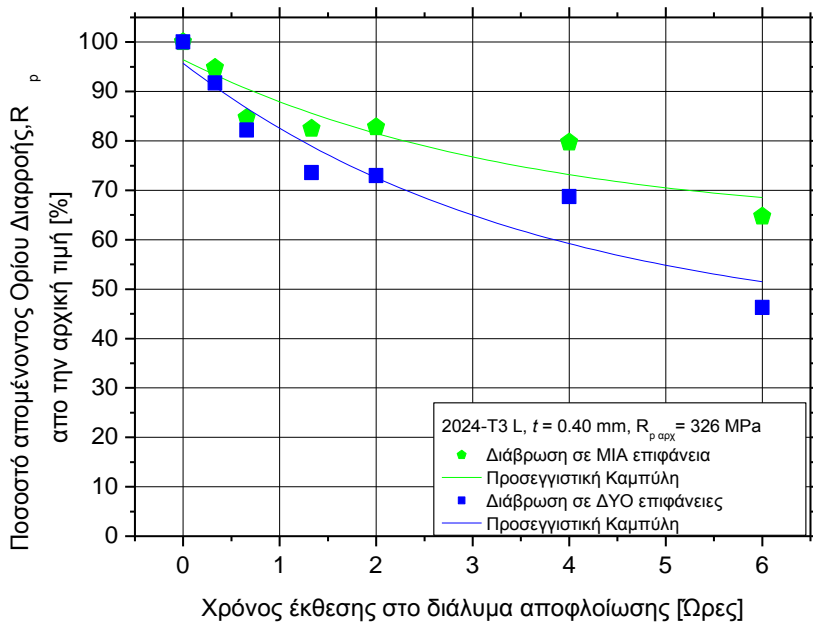
ΔΟΚΙΜΙΑ 2024 T3, L	Σταθερές Εκθετικής Προσέγγισης $y = y_0 + A_1 \cdot \exp (x / t_1)$		
	y_0	A_1	t_1
Όριο Διαρροής, R_p ΜΙΑ επιφάνεια Διάβρωσης	62.58855 ± 16.4993	33.86407 ± 15.02603	3.44357 ± 3.46454
Όριο Διαρροής, R_p ΔΥΟ επιφάνειες Διάβρωσης	41.03865 ± 22.76409	54.66438 ± 20.80584	3.63188 ± 3.03453
Όριο Αντοχής, R_m , ΜΙΑ επιφάνεια Διάβρωσης	54.54749 ± 9.76955	43.79629 ± 8.86482	3.00538 ± 1.49176
Όριο Αντοχής, R_m , ΔΥΟ επιφάνειες Διάβρωσης	33.10572 ± 17.9217	62.63866 ± 16.27157	3.21482 ± 1.97212
Παραμόρφωση Θραύσης, A_f ΜΙΑ επιφάνεια Διάβρωσης	12.80567 ± 5.76562	84.62367 ± 11.34323	0.43797 ± 0.13878
Παραμόρφωση Θραύσης, A_f ΔΥΟ επιφάνειες Διάβρωσης	8.26465 ± 2.6444	91.36263 ± 5.67912	0.30858 ± 0.04742
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης, W ΜΙΑ επιφάνεια Διάβρωσης	8.55670 ± 3.90196	90.0558 ± 7.99707	0.37902 ± 0.08017
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης, W ΔΥΟ επιφάνειες Διάβρωσης	5.94201 ± 2.37853	93.81155 ± 5.19663	0.28122 ± 0.03967

(β)

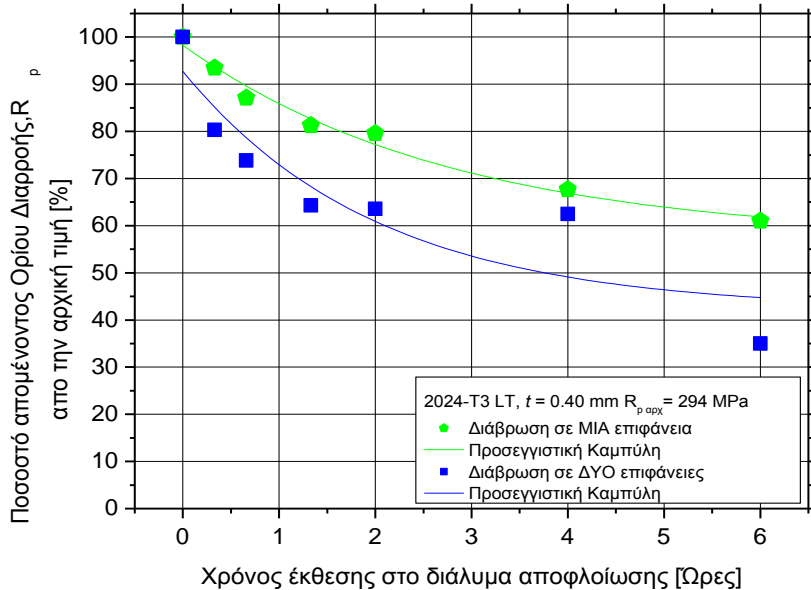
ΔΟΚΙΜΙΑ 2024 T3, LT	Σταθερές Εκθετικής Προσέγγισης $y = y_0 + A_1 \cdot \exp(x / t_1)$		
	y_0	A_1	t_1
Όριο Διαρροής, R_p ΜΙΑ επιφάνεια Διάβρωσης	57.01361 ± 4.60143	41.25112 ± 4.18698	2.8012 ± 0.72275
Όριο Διαρροής, R_p ΔΥΟ επιφάνειες Διάβρωσης	42.18819 ± 13.33328	50.5570 ± 13.15445	2.01194 ± 1.45735
Όριο Αντοχής, R_m ΜΙΑ επιφάνεια Διάβρωσης	61.25133 ± 4.84032	36.56882 ± 4.97338	1.84394 ± 0.69769
Όριο Αντοχής, R_m ΔΥΟ επιφάνειες Διάβρωσης	40.2396 ± 10.9217	49.3875 ± 8.3319	2.0198 ± 0.8855
Παραμόρφωση Θραύσης, A_f ΜΙΑ επιφάνεια Διάβρωσης	13.04331 ± 4.24829	85.30737 ± 8.95866	0.33667 ± 0.08567
Παραμόρφωση Θραύσης, A_f ΔΥΟ επιφάνειες Διάβρωσης	10.28983 ± 3.05601	89.41725 ± 6.99262	0.20331 ± 0.04836
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης, W ΜΙΑ επιφάνεια Διάβρωσης	10.66311 ± 3.37113	88.07213 ± 7.02006	0.35556 ± 0.06804
Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης, W ΔΥΟ επιφάνειες Διάβρωσης	8.48993 ± 2.7913	91.35251 ± 6.50871	0.17044 ± 0.0431

Η κλίση καθεμίας καμπύλης από αυτές, αντιστοιχεί στην ταχύτητα μείωσης της τιμής του ορίου διαρροής. Συνεπώς, παρατηρείται ταχύτερη μείωση του ορίου διαρροής στα δοκίμια που έχουν διαβρωθεί και από τις δύο πλευρές τόσο για τη διεύθυνση L όσο και για τη διεύθυνση LT. Στο Σχήμα 21 διαφαίνεται η τάση σταθεροποίησης των τιμών του ορίου διαρροής και για τις δυο διευθύνσεις, για χρόνο έκθεσης 6 ωρών στο διάλυμα αποφλοιώσης. Μετά από 6 ώρες διάβρωσης στο διάλυμα αποφλοιώσης, τα δοκίμια της L διεύθυνσης που διαβρώθηκαν μόνο από

τη μία πλευρά τους, παρουσιάζουν μείωση 35% επί της αρχικής τιμής ενώ τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους παρουσιάζουν μείωση 53%, Σχήμα 21(α). Οι αντίστοιχες τιμές στο Σχήμα 21(β) για την LT διεύθυνση δείχνουν μείωση 39% του ορίου διαρροής επί της αρχικής τιμής του δοκιμίου αναφοράς για δοκίμια που διαβρώθηκαν από τη μία πλευρά, ενώ για δοκίμια που διαβρώθηκαν και οι δύο επιφάνειές τους η μείωση αγγίζει το 65%.



(α)



(β)

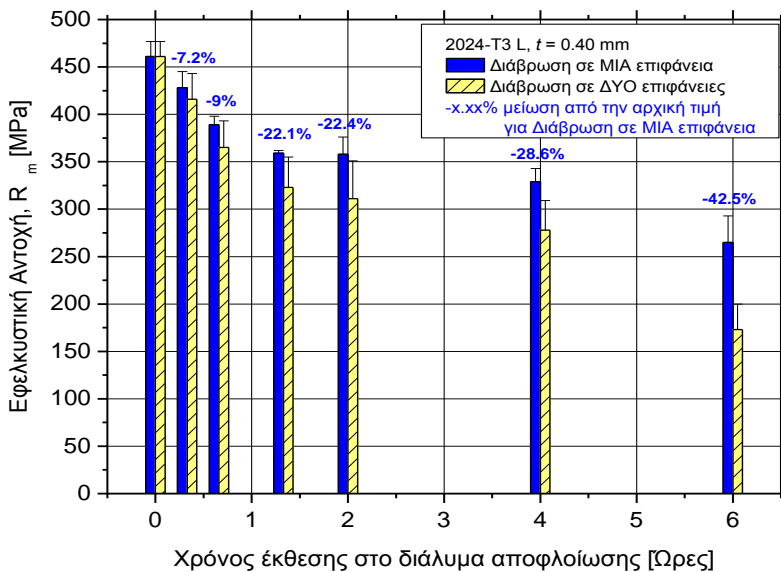
Σχήμα 21: Ποσοστιαίο απομένον όριο διαρροής R_p για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσεως του κράματος 2024-T3 (α) στη διεύθυνση L και (β) στη διεύθυνση LT.

3.3.2 Εφελκυστική αντοχή R_m

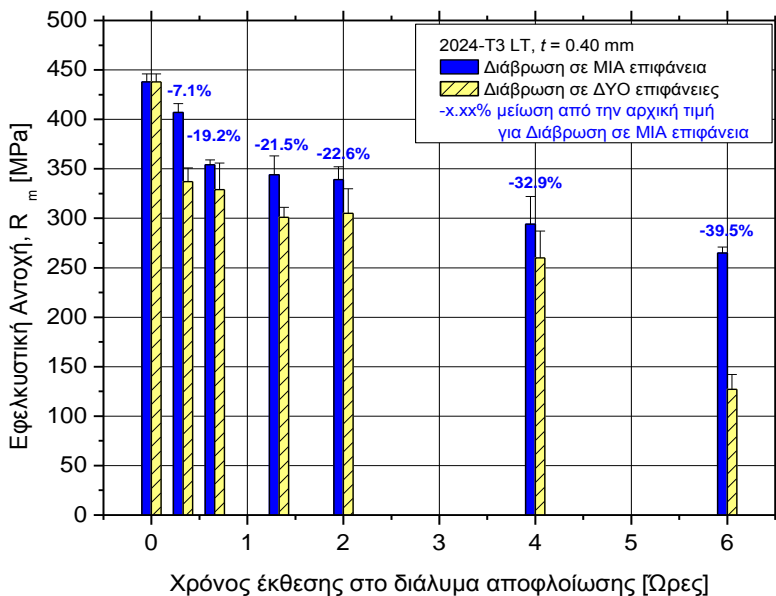
Τα αποτελέσματα των εφελκυσμών σε αδιάβρωτα δοκίμια (δοκίμια αναφοράς) που κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης L, δίδουν την τιμή του ορίου αντοχής να είναι ίση με $R_m = 461$ MPa. Η βιβλιογραφία [24] για αντίστοιχο υλικό με ονομαστικό πάχος 3.2 mm, δίδει το όριο αντοχής του να ισούται με $R_m = 494$ MPa. Με δεδομένη την πειραματική διασπορά των μετρήσεων, η μειωμένη κατά 6% εν λόγω μηχανική ιδιότητα κρίνεται ικανοποιητική.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της εφελκυστικής μηχανικής ιδιότητας εφελκυστική αντοχή για τους διάφορους χρόνους έκθεσης στο

διάλυμα αποφλοιώσης παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 22. Παρατηρείται ότι οι τιμές του ορίου αντοχής των δοκιμών που κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης παρουσιάζονται αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για τα δοκίμια που κόπηκαν κατά την διεύθυνση LT και για τους αντίστοιχους χρόνους διάβρωσης. Επιπρόσθετα, και για τις δύο διευθύνσεις έλασης του ελάσματος, παρατηρείται ότι τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο επιφάνειες παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές ορίου αντοχής σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που διαβρώθηκαν μόνο από την μία επιφάνειά τους. Χαρακτηριστικά επισημαίνεται ότι για έκθεση μόλις 2 ωρών στο διάλυμα αποφλοιώσης, στα δοκίμια L το όριο αντοχής μειώθηκε περίπου κατά 103 MPa για τα δοκίμια με μία επιφάνεια διάβρωσης και κατά 150 MPa για τα δοκίμια με δύο επιφάνειες διάβρωσης. Αντίστοιχα, για τα δοκίμια LT, η μείωση ήταν 99 MPa και 133 MPa.



(α)

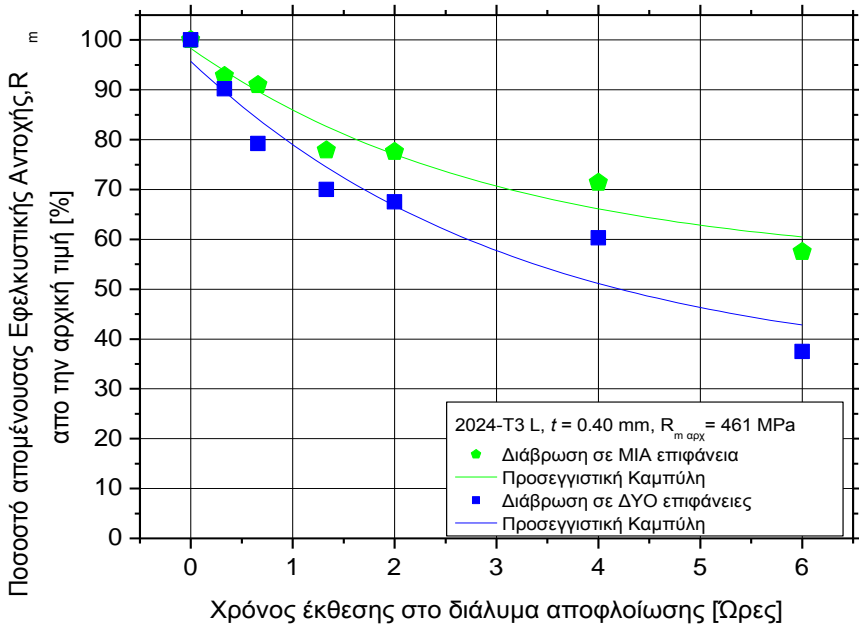


(β)

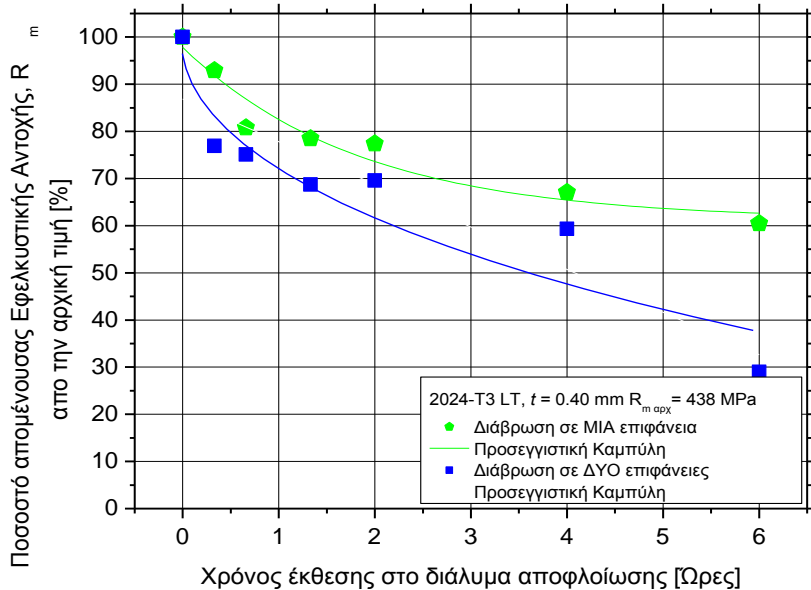
Σχήμα 22: Μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής R_m για τους διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσεως για το κράμα 2024-T3 (α) διεύθυνση L και (β) διεύθυνση LT.

Τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα για (α) τους διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοιώσεως, (β) την διαφορετική διεύθυνση φόρτισης και (γ) τις επιφάνειες διάβρωσης, υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στο Σχήμα 23 ως ποσοστά επί των αντίστοιχων τιμών του ορίου αντοχής αναφοράς σε κάθε διεύθυνση έλασης. Όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση του ορίου αντοχής είναι ταχύτερη για διάβρωση σε δύο επιφάνειες, και για τις δυο διαφορετικές διευθύνσεις έλασης. Οι προσεγγιστικές καμπύλες μείωσης του ορίου αντοχής για μια επιφάνεια παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 23 και μπορούν να προσομοιαστούν όμοια με εκθετικές καμπύλες μείωσης. Οι συντελεστές της Εξίσωσης (1) για την εφελκυστική αντοχή

παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Επιπρόσθετα, για τις καμπύλες ποσοστιαίας μείωσης για μια επιφάνεια διάβρωσης, οι τιμές του R_m φαίνεται να σταθεροποιούνται στο 60% της αρχικής τιμής και μετά από 6 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα.



(α)



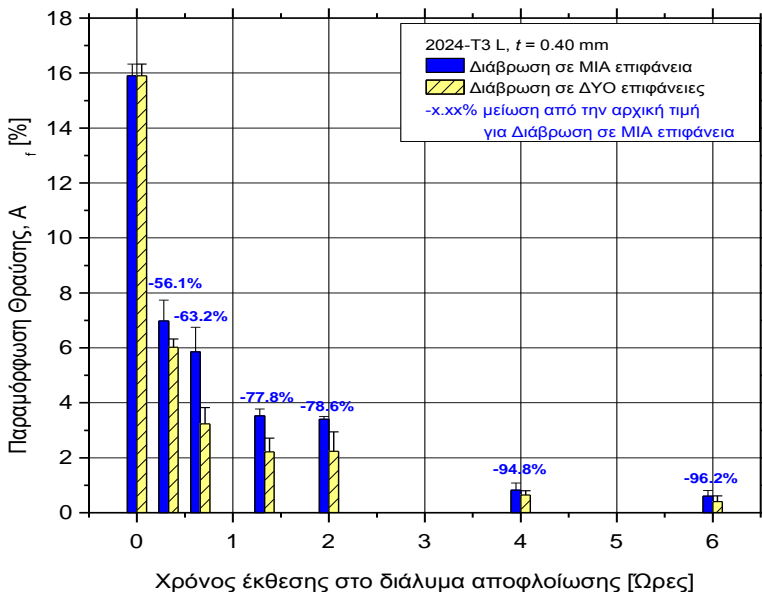
(β)

Σχήμα 23: Ποσοστιαία απομένουσα εφελκυστική αντοχή R_m για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης του κράματος 2024-T3 (α) στη διαμήκη L και (β) στην εγκάρσια LT διεύθυνση έλασης.

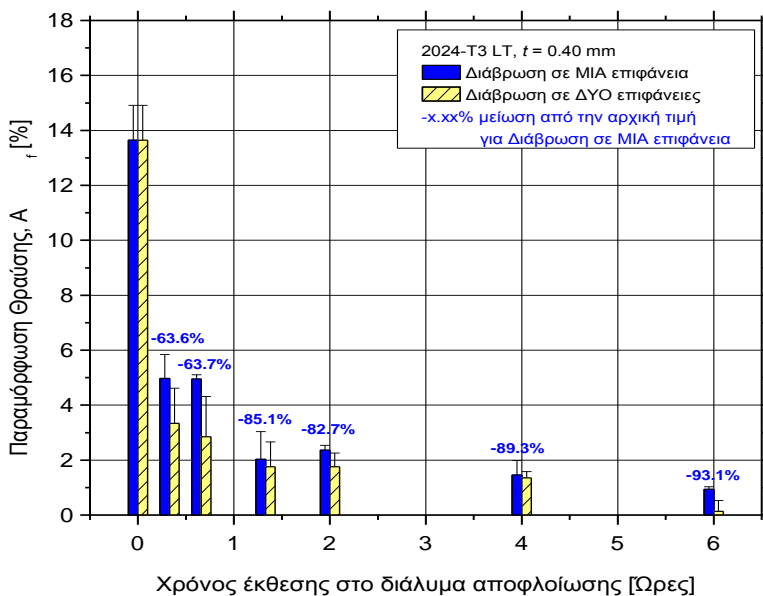
3.3.3 Παραμόρφωση θραύσης A_f

Στη βιβλιογραφία [24] για υλικό 2024-T3 και ονομαστικό πάχος 3.2 mm, δίδεται για δοκίμια αναφοράς της L διεύθυνσης, τιμή παραμόρφωσης θραύσης $A_f = 18.57\%$. Η αποτίμηση των πειραματικών δοκιμών σε αντίστοιχο υλικό και δοκίμια ίδιας διεύθυνσης έλασης και ονομαστικού πάχους 0.4 mm, δίδει τιμή παραμόρφωσης θραύσης $A_f = 15.90\%$. Η διαφορά των δύο αυτών τιμών της παραμόρφωσης θραύσης κατά 2.67% χαρακτηρίζεται ως αναμενόμενη. Στο Σχήμα 24 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραμόρφωσης θραύσης σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης. Είναι εμφανώς διακριτό πως η

μηχανική ιδιότητα της παραμόρφωσης θραύσης εμφανίζει δραματική μείωση και στις δύο διευθύνσεις έλασης του ελάσματος. Στο Σχήμα 24(α) επισημαίνεται ότι για έκθεση μόλις 20 λεπτών (0.33 ώρες) στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοιώσης, τα δοκίμια της διεύθυνσης L, που διαβρώθηκαν από τη μία επιφάνεια τους, παρουσιάζουν τιμή παραμόρφωσης θραύσης $A_f = 6.98 \%$. Επίσης, από το ίδιο Σχήμα η τιμή της παραμόρφωσης θραύσης για ίδιο χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης, ίδια διεύθυνση έλασης και δύο επιφάνειες διάβρωσης, δίδεται ως $A_f = 6.02 \%$. Από το Σχήμα 24(β) οι αντίστοιχες τιμές για χρόνο διάβρωσης 20 λεπτών και κατά τη διεύθυνση LT, παρουσιάζουν ακόμη μεγαλύτερη υποβάθμιση. Ενδεικτικό είναι πως για μία επιφάνεια διάβρωσης η τιμή της παραμόρφωσης θραύσης είναι $A_f = 4.97 \%$, ενώ για δύο επιφάνειες διάβρωσης είναι μόλις $A_f = 3.34 \%$.



(α)

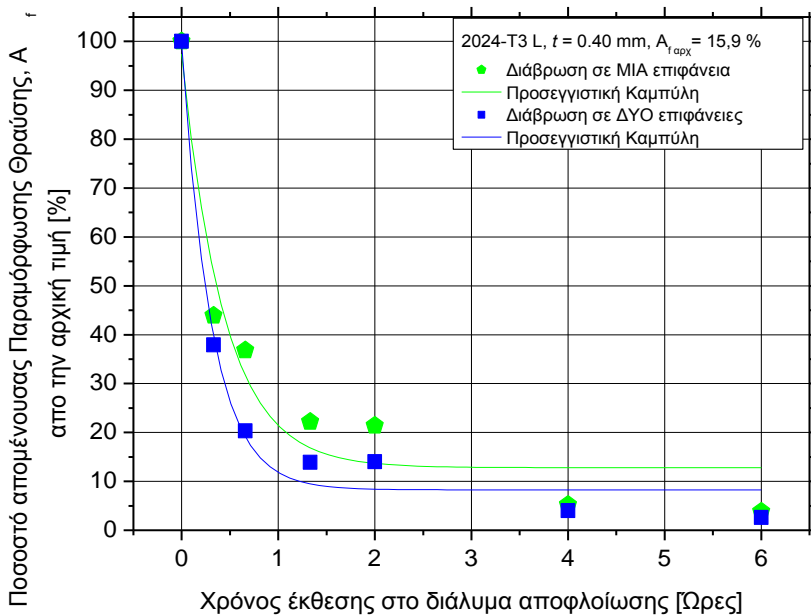


(β)

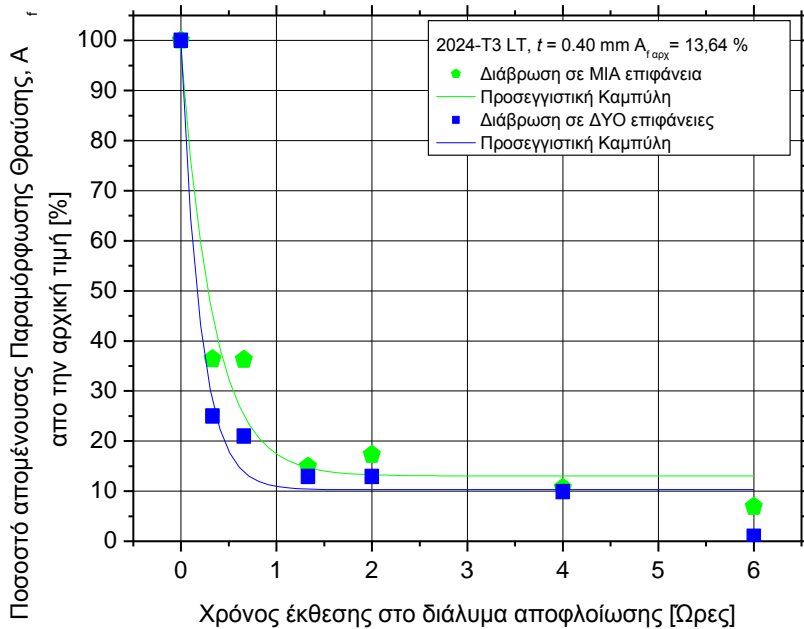
Σχήμα 24: Μεταβολή της παραμόρφωσης θραύσης A_f για τους διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης για το κράμα 2024-T3 (α) διεύθυνση L και (β) διεύθυνση LT.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της εφελκυστικής μηχανικής ιδιότητας παραμόρφωσης θραύσης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 25 ως ποσοστιαία μεταβολή επί των αρχικών τιμών παραμόρφωσης θραύσης των δοκιμίων αναφοράς, για τους διάφορους χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα. Στο Σχήμα 25(α) χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για δοκίμια της διεύθυνσης L, με μία μόνο επιφάνεια διάβρωσης η μείωση της τιμής της παραμόρφωσης θραύσης φτάνει σε ποσοστό 77.9 %, για χρόνο έκθεσης 80 λεπτών (1.33 ωρών). Από το ίδιο Σχήμα παρατηρείται ότι για τον ίδιο χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο επιφάνειες τους, παρουσιάζουν μείωση της τιμής

παραμόρφωσης θραύσης κατά 86.1 % επί της αρχικής τιμής παραμόρφωσης των αδιάβρωτων δοκιμίων. Το Σχήμα 25(β) για δοκίμια μίας επιφάνειας διάβρωσης, διεύθυνσης LT και για έκθεση μόνο 80 λεπτών στο διάλυμα αποφλοιώσης, δίδει ποσοστιαία μείωση της παραμόρφωσης θραύσης επί της αρχικής τιμής 85.1 %. Επιπρόσθετα από το ίδιο Σχήμα δίδεται ότι το ποσοστό μείωσης της παραμόρφωσης θραύσης επί της αρχικής τιμής των δοκιμίων αναφοράς είναι 87 %, για δοκίμια δύο επιφανειών διάβρωσης, διεύθυνσης LT και για έκθεση μόνο 80 λεπτών στο διάλυμα αποφλοιώσης. Αξιοσημείωτο είναι πως και για τις δύο διευθύνσεις έλασης, παρουσιάζεται σταθεροποίηση του ποσοστού μείωσης της τιμής της παραμόρφωσης θραύσης από τις 2 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα.



(α)



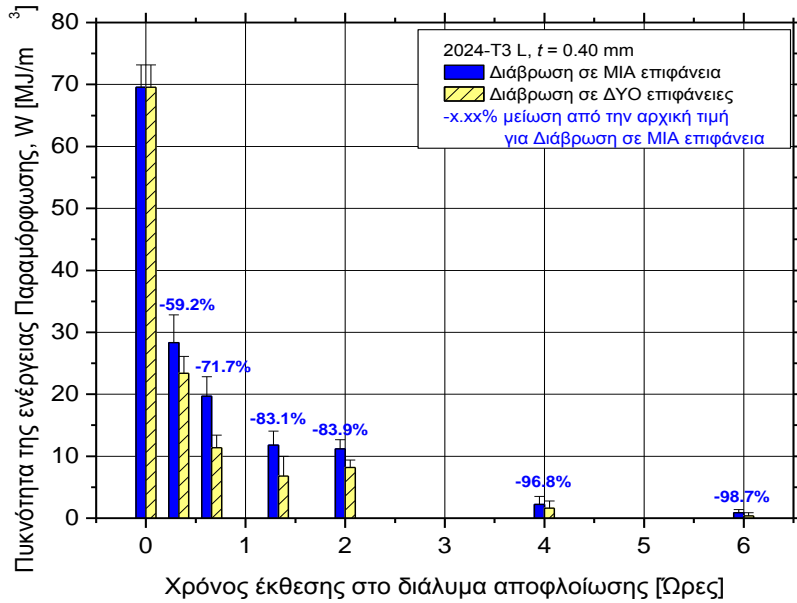
(β)

Σχήμα 25: Ποσοστιαία απομένουσα παραμόρφωση θραύσης A_f για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης του κράματος 2024-T3 (α) στη διεύθυνση L και (β) στη διεύθυνση LT.

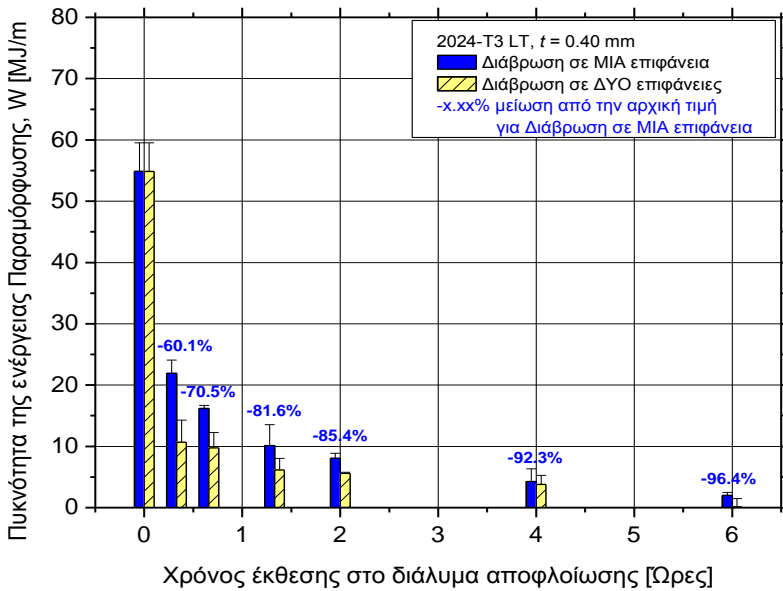
3.3.4 Ποκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης W

Η αποτίμηση των δεδομένων των πειραματικών δοκιμών δίδει για την εφελκυστική μηχανική ιδιότητα της ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης τιμή $W = 69.54 \text{ MJ/m}^3$, για αδιάβρωτα δοκίμια, διεύθυνσης L. Η τιμή που δίδεται στη βιβλιογραφία [24] για αντίστοιχο υλικό και ονομαστικό πάχος δοκιμίου 3.2 mm είναι $W = 86.79 \text{ MJ/m}^3$. Συνεπώς η τιμή της ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης που προέκυψε από τις πειραματικές δοκιμές εκφράζεται μικρότερη κατά 19% σε σχέση με την τιμή που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία.

Στο Σχήμα 26 διακρίνεται η δραματική μεταβολή της εφελκυστικής μηχανικής ιδιότητας της πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης για τους διάφορους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 26(α) που απεικονίζει την μεταβολή της ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης για δοκίμια που κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης, παρατηρείται ότι για χρόνο έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης μόλις 40 λεπτών (0.66 ωρών), η τιμή της πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης για δοκίμια που διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά τους είναι $W = 19.68 \text{ MJ/m}^3$, ενώ για τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους $W = 11.39 \text{ MJ/m}^3$. Το Σχήμα 26(β) που απεικονίζει την μεταβολή της πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης για δοκίμια που κόπηκαν κατά την εγκάρσια διεύθυνση, παρατηρείται ότι για χρόνο έκθεσης αντίστοιχο με αυτόν που εξετάστηκε για τα δοκίμια της διεύθυνσης L, η τιμή της πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης για δοκίμια που διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά τους είναι $W = 16.17 \text{ MJ/m}^3$, ενώ για τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους $W = 9.76 \text{ MJ/m}^3$.



(α)



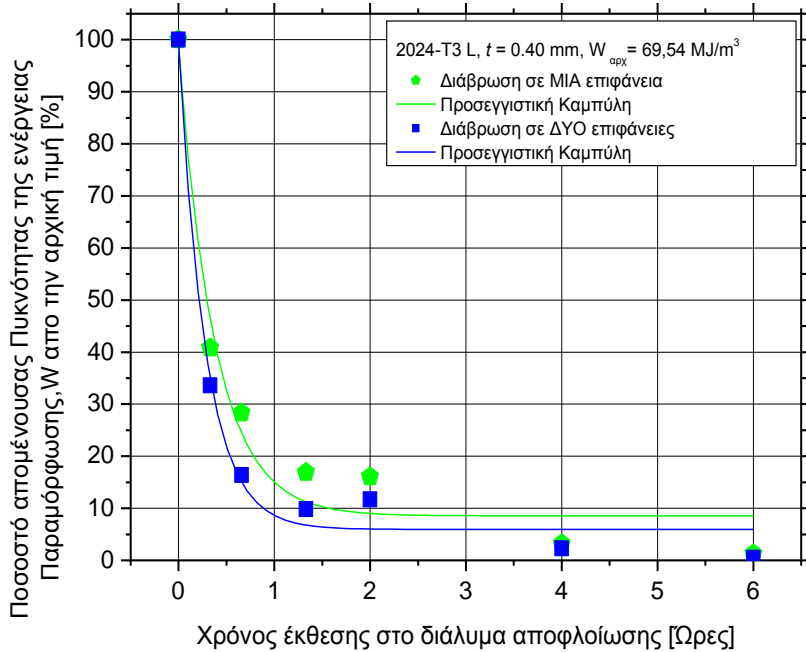
(β)

Σχήμα 26: Μεταβολή της πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης W για τους διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης για το κράμα 2024-T3 (α) διεύθυνση L και (β) διεύθυνση LT.

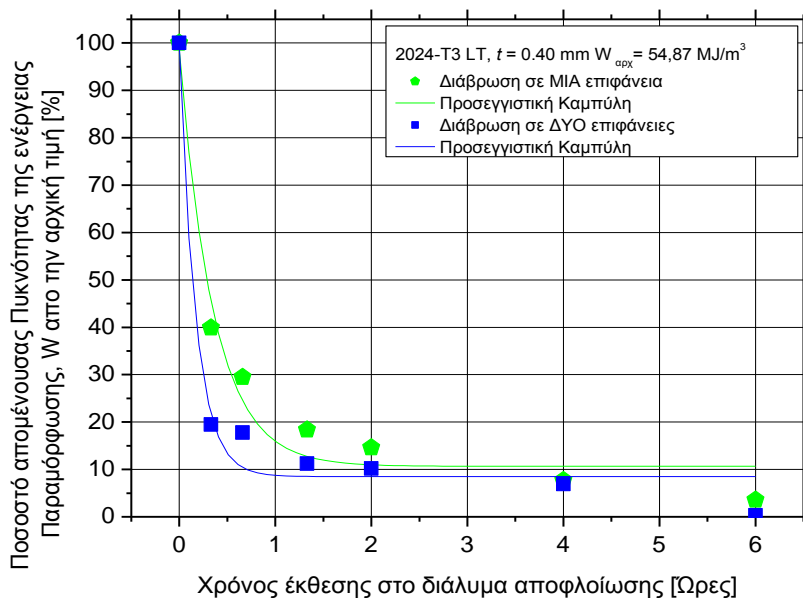
Τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα για (α) τους διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοιώσης, (β) την διαφορετική διεύθυνση έλασης και (γ) τις επιφάνειες διάβρωσης, υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στο Σχήμα 27 ως ποσοστά επί των αντίστοιχων τιμών της πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης αναφοράς σε κάθε διεύθυνση. Αρχικά παρατηρείται πως και για τις δύο διευθύνσεις έλασης ο ρυθμός μείωσης της ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης, είναι μεγαλύτερος για τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές τους. Ωστόσο, οι ρυθμοί μείωσης ανάμεσα στα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο πλευρές και αυτά που διαβρώθηκαν μόνο από τη μία πλευρά, παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς μείωσης. Αυτό παρατηρείται και στη μηχανική ιδιότητα της παραμόρφωσης θραύσης ενώ για τις ιδιότητες αντοχής η διαφορά ανάμεσα στις δύο ταχύτητες μείωσης των συγκεκριμένων ιδιοτήτων είναι αρκετά μεγαλύτερη. Στο Σχήμα 27(α) για δοκίμια που κόπηκαν κατά τη διαμήκη διεύθυνση και διαβρώθηκαν μόνο από τη μία επιφάνεια τους παρατηρείται ότι η τιμή της ποσοστιαίας απομένουσας πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης μετά από έκθεση 40 λεπτών (0.66 ωρών) στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοιώσης, είναι μόλις 28.3 %. Η αντίστοιχη ποσοστιαία απομένουσα ειδική ενέργεια παραμόρφωσης μετά από έκθεση 40 λεπτών (0.66 ωρών) στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοιώσης, για διάβρωση δύο επιφανειών δίδεται ως 16.4 %. Παρομοίως Στο Σχήμα 27(β) για δοκίμια που κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης και διαβρώθηκαν μόνο από τη μία επιφάνεια τους παρατηρείται ότι η τιμή της ποσοστιαίας παραμένουσας ειδική ενέργεια

παραμόρφωσης μετά από έκθεση 40 λεπτών στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης, είναι μόλις 29.4 %.

Η αντίστοιχη ποσοστιαία απομένουσα πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης μετά από έκθεση 40 λεπτών (0.66 ωρών) στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης, για διάβρωση δύο επιφανειών δίδεται ως 17.7 %. Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως και για τις δύο διευθύνσεις, παρουσιάζεται σταθεροποίηση του ποσοστού μείωσης της τιμής της παραμόρφωσης θραύσης από τις 2 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα.



(α)



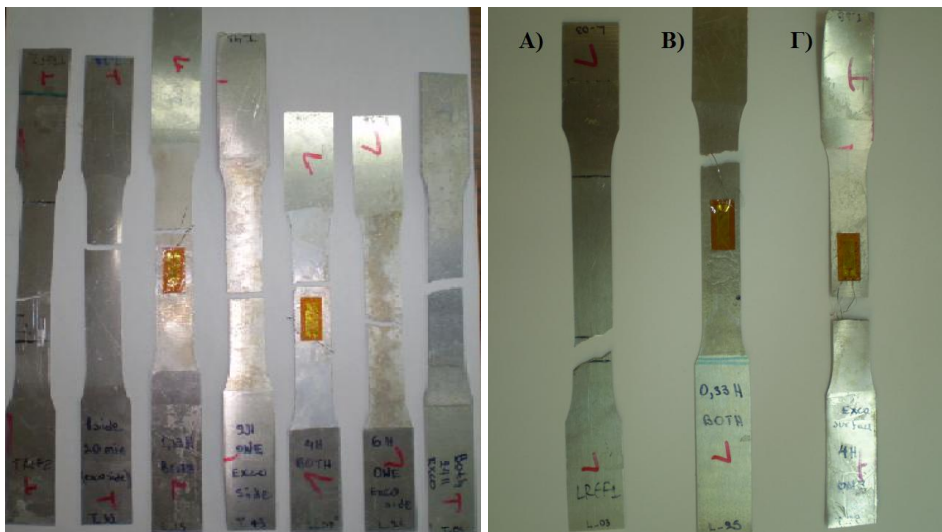
(β)

Σχήμα 27: Ποσοστιαία απομένουσα πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης W για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης του κράματος 2024-T3 (α) στη διεύθυνση L και (β) στη διεύθυνση LT.

3.4 Φωτογραφίες θραυσμένων δοκιμίων

Στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται οι φωτογραφίες από επιλεγμένα δοκίμια εφελκυσμού και των δύο διευθύνσεων έλασης, για διάφορους χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 28(α) απεικονίζονται δοκίμια και κατά τις δύο διευθύνσεις για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοίωσης. Χαρακτηριστικό είναι πως μακροσκοπικά **δεν παρατηρείται ο σχηματισμός τρηματικής διάβρωσης (pitting corrosion)** στην επιφάνεια των δοκιμίων που εκτέθηκαν σε διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης, τουλάχιστον μέχρι τις

έξι (6) ώρες διάβρωσης. Η διαπίστωση αυτή είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες ενδείξεις για την διάβρωση αντίστοιχου κράματος αλουμινίου μεγαλύτερου ονομαστικού πάχους (3.2 mm), π.χ. [24]. Από το Σχήμα 28(β) παρατηρείται πως τα αδιάβρωτα δοκίμια παρουσιάζουν την κλασική γωνία θραύσης των όλκιμων υλικών, που κυμαίνεται περίπου στις 45° σε σχέση με την εγκάρσια διεύθυνση του δοκιμίου εφελκυσμού. Με την αύξηση του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα, παρατηρείται ότι η εν λόγω γωνία θραύσης μειώνεται σταδιακά (π.χ. δοκίμιο Β στο Σχήμα 28(β)), μέχρις ότου η θραύση των δοκιμίων πραγματοποιείται απολύτως κάθετα στην διεύθυνση μονοαξονικού εφελκυσμού. Χαρακτηριστική τιμή χρόνου έκθεσης για αυτή την μεταβολή στην διεύθυνση του επιπέδου αστοχίας είναι οι τέσσερις (4) ώρες και δυο (2) ώρες για μία και δυο επιφάνειες διάβρωσης, αντίστοιχα.



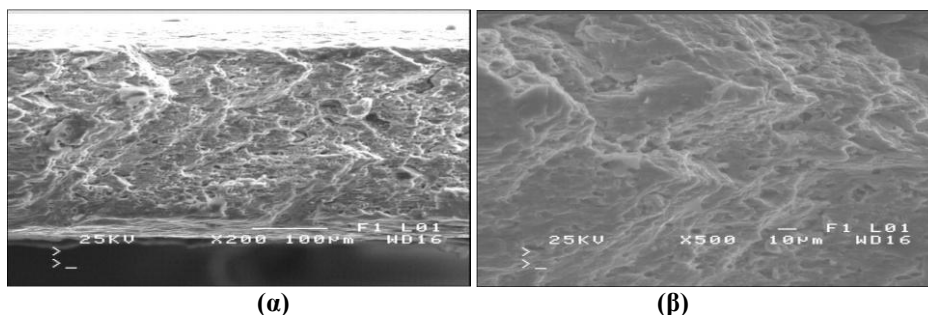
(α)

(β)

Σχήμα 28 : Μακροφωτογραφία διάφορων θραυσμένων δοκιμίων εφελκυσμού από κράμα 2024-T3 και πάχους 0.4 mm για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διάλυμα αποφλοιώσης.

3.5 Θραυστογραφικός έλεγχος

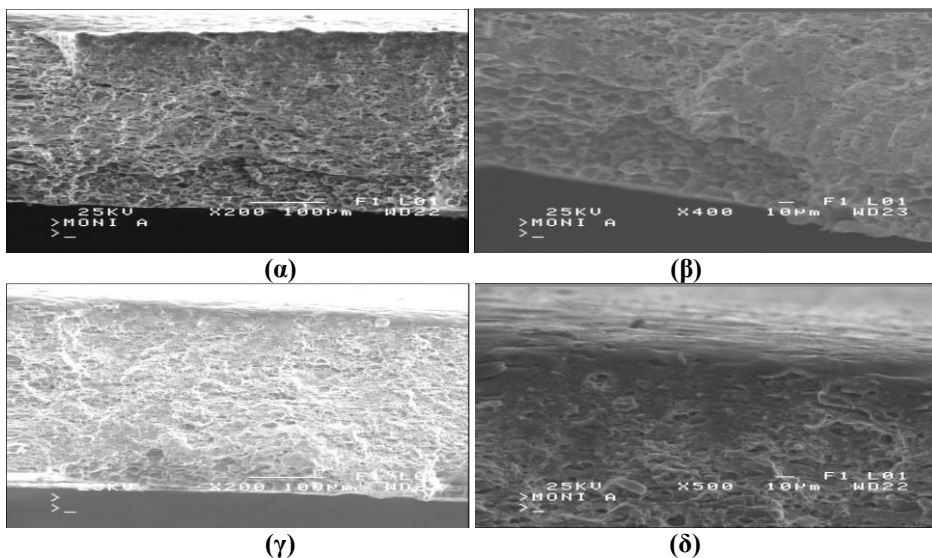
Στο Σχήμα 29(α) απεικονίζεται μια τυπική επιφάνεια θραύσης από δοκίμιο εφελκυσμού για το αδιάβρωτο δοκίμιο 2024-T3. Παρατηρείται ότι ο μηχανισμός αστοχίας είναι η όλκιμη θραύση με έντονες πλαστικές παραμορφώσεις, γεγονός που προκύπτει από την τραχεία επιφάνεια θραύσης. Στο Σχήμα 29(β) παρατηρείται η ίδια περιοχή αστοχίας σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Παρατηρούνται πλαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται εντονότερες στο κέντρο της διατομής ελέγχου του δοκιμίου εφελκυσμού. Χαρακτηριστική είναι και η απεικόνιση της διεύθυνσης θραύσης του εν λόγω δοκιμίου, η οποία όπως παρατηρήθηκε και από την μακροφωτογραφία του Σχήματος 28, σχηματίζει γωνία περίπου 45° σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 29: Τυπικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου εφελκυσμού αναφοράς 2024-T3, $t = 0.4$ mm.

Χαρακτηριστικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης ενός προ-διαβρωμένου δοκιμίου για 0.66 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα και για μια επιφάνεια διάβρωσης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 30. Στο σχήμα φαίνεται όλη η θραυσμένη διατομή του δοκιμίου με ονομαστικό

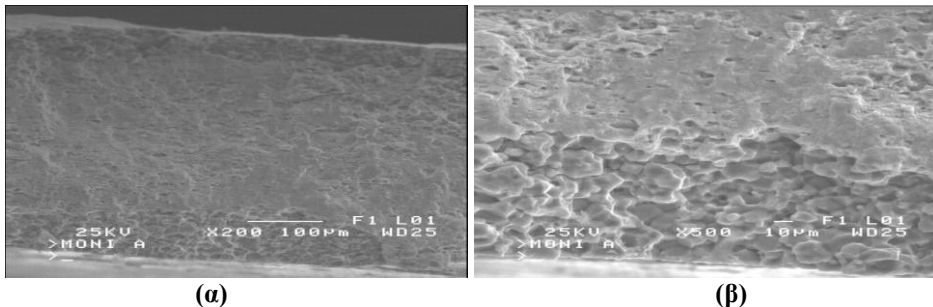
πάχος 0.4 mm και η κάτω επιφάνεια όπως παρουσιάζεται στο σχήμα είναι η ελεύθερη επιφάνεια προς διάβρωση. Μολονότι δεν έχουν παρουσιαστεί επιφανειακά προϊόντα διάβρωσης που θα ήταν ορατά με τον κλασικό τρόπο εξέτασης με οπτικό μικροσκόπιο, παρατηρείται ότι έχουν σχηματιστεί προϊόντα διάβρωσης κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Η ζώνη από τα εν λόγω προϊόντα παρατηρείται ότι δεν είναι ομοιόμορφη κατά το πλάτος της διατομής του δοκιμίου και το βάθος προσβολής κυμαίνεται κατά μέσο όρο περίπου στα 60 μm. Το εύρος του βάθους προσβολής είναι ορατό στο Σχήμα 30(α) καθώς παρατηρείται τοπικά η αλλαγή της μορφολογίας της επιφάνειας θραύσης. Επιπρόσθετα, στη μη-επηρεασμένη από τα προϊόντα διάβρωσης περιοχή της διατομής, η μορφολογία αστοχίας παρουσιάζει έντονες πλαστικές παραμορφώσεις που κατά τόπους διακόπτεται από περιοχές ψευδο-ψαθυρής θραύσης (*quasi-cleavage*). Αυτές οι περιοχές παρουσιάζουν σχετικά λεία επιφάνεια θραύσης και μπορεί να παρατηρηθούν τόσο στο κέντρο της διατομής όσο και κοντά στην διεπιφάνεια διαβρωμένου – αδιάβρωτου υλικού, Σχήμα 30(β). Στο Σχήμα 30(γ) εμφανίζεται στην κάτω επιφάνεια η περιοχή διαβρωτικής προσβολής. Η διάβρωση φαίνεται να έχει εισχωρήσει αρκετά στη δομή του δοκιμίου, δεδομένης της έκθεσης 40 λεπτών στο διάλυμα αποφλοιώσης. Επιπρόσθετα, προς το κέντρο του σχήματος εντοπίζονται τόσο ψαθυρές περιοχές (λείες), όσο και όλκιμες (τραχείες). Επίσης, η άνω επιφάνεια, η όποια δεν διαβρώθηκε και ήταν επικαλυμμένη με μονωτικό υλικό εμφανίζεται λεία γεγονός που παραπέμπει σε ψαθυρή θραύση. Το Σχήμα 30(δ) παρουσιάζει σε μεγέθυνση x400 φορές την περιοχή κάτω από την αδιάβρωτη επιφάνεια, στην οποία εντοπίζεται η ψαθυρή θραύση



Σχήμα 30: Τυπικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης προ-διαβρωμένου (σε μία επιφάνεια) δοκιμίου εφελκυσμού 2024-T3, $t = 0.4$ mm για 0.66 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα.

Στο Σχήμα 31 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης ενός προ-διαβρωμένου δοκιμίου για 0.66 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα και για δύο επιφάνειες διάβρωσης. Στο Σχήμα 31(α) παρουσιάζεται όλη η θραυσμένη διατομή του δοκιμίου με ονομαστικό πάχος 0.4 mm. Διακρίνεται ο σχηματισμός προϊόντων διάβρωσης κάτω και από τις δύο επιφάνειες του δοκιμίου, δίχως ωστόσο να υπάρχει οποιαδήποτε αλλοίωση των εξωτερικών επιφανειών, γεγονός που επιβεβαιώνεται και με μακροσκοπική παρατήρηση του εν λόγω δοκιμίου. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το βάθος προσβολής της διάβρωσης στις δύο επιφάνειες διαφέρει. Στην κάτω επιφάνεια, όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 31(α), φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη

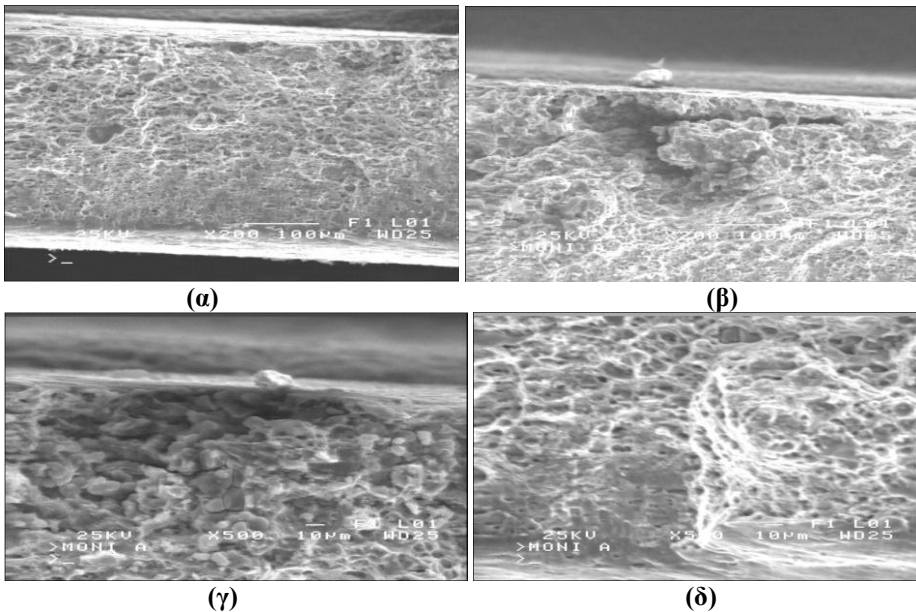
διείσδυση της διάβρωσης σε σχέση με την άνω επιφάνεια. Συγκεκριμένα για την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου η ζώνη από τα προϊόντα διάβρωσης παρατηρείται να μην είναι ομοιομορφή κατά το πλάτος της διατομής του δοκιμίου και το βάθος προσβολής φτάνει έως και τα 80 μm . Στην άνω, όπου επίσης παρατηρείται ομοιομορφία των προϊόντων διάβρωσης κατά το πλάτος του δοκιμίου, το βάθος προσβολής δεν φαίνεται να ξεπερνάει τα 50 μm . Το Σχήμα 31(β) αποτελεί λεπτομέρεια της περιοχής διάβρωσης στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Παρουσιάζεται το μέγεθος διείσδυσης της διαβρωτικής προσβολής κάτω από την εν λόγω επιφάνεια.



Σχήμα 31: Τυπικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης προ-διαβρωμένου (σε δύο επιφάνειες) δοκιμίου εφελκυσμού 2024-T3, $t = 0.4 \text{ mm}$ για 0.66 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα.

Στο Σχήμα 32 παρουσιάζονται τυπικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης ενός προ-διαβρωμένου δοκιμίου για 4 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα και για μία επιφάνεια διάβρωσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 32(α), η άνω επιφάνεια του δοκιμίου ήταν ελεύθερη σε διάβρωση. Στο εσωτερικό της διατομής του δοκιμίου εντοπίζονται τόσο περιοχές με έντονες πλαστικές παραμορφώσεις όσο και περιοχές τοπικής ψευδο-ψαθυρής θραύσης. Στο Σχήμα 32(β) εμφανίζεται σε μεγέθυνση,

λεπτομέρεια της περιοχής διάβρωσης. Στο Σχήμα (γ) παρουσιάζεται με μεγέθυνση x500 φορές η περιοχή κάτω από τη διαβρωμένη επιφάνεια όπου εντοπίζονται μικρορηγματώσεις στη μήτρα του αλουμινίου. Το Σχήμα 32(δ) παρουσιάζει τη μη-επηρεασμένη από τα προϊόντα διάβρωσης περιοχή της διατομής, όπου η μορφολογία αστοχίας παρουσιάζει έντονες πλαστικές παραμορφώσεις που κατά τόπους διακόπτεται από περιοχές ψευδο-ψαθυρής θραύσης (*quasi-cleavage*).

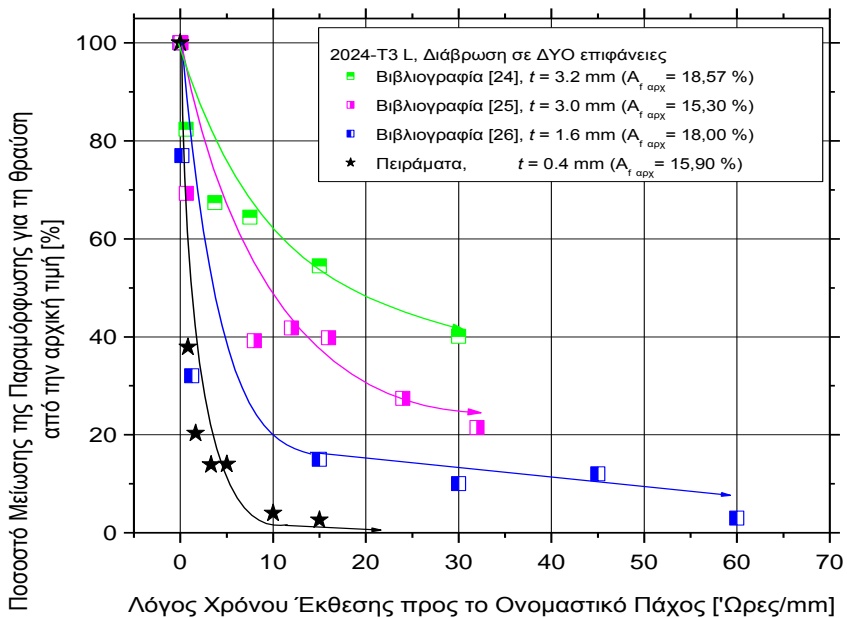


Σχήμα 32: Τυπικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης προ-διαβρωμένου (σε μία επιφάνεια) δοκιμίου εφελκυσμού 2024-T3, $t = 0.4 \text{ mm}$ για 4 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα.

3.6 Εξάρτηση της διάβρωσης από το πάχος του δοκιμίου

Κατά τη μελέτη της εξάρτησης της διάβρωσης από το ονομαστικό πάχος των δοκιμίων εφελκυσμού, αξιοποιήθηκαν τόσο τα πειραματικά αποτελέσματα στα δοκίμια εφελκυσμού ονομαστικού πάχους 0.4 mm όσο και τα δεδομένα της βιβλιογραφίας για υλικό 2024-T3 και ονομαστικά πάχη δοκιμίων 3.2 mm [24], 3 mm [25] και 1.6 mm [26], αντίστοιχα. Όλα τα δοκίμια διαβρώθηκαν και από τις δύο επιφάνειες τους και κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της αποτίμησης των πειραμάτων στα δοκίμια εφελκυσμού του κράματος 2024-T3 για ονομαστικό πάχος 0.4 mm, παρουσιάζουν δραματική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων (ολκιμότητα, παραμόρφωση θραύσης, πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης) και μέτρια υποβάθμιση των ιδιοτήτων αντοχής (όριο διαρροής, εφελκυστική αντοχή). Για το λόγο αυτό στο Σχήμα 33 παρουσιάζονται οι τιμές της παραμόρφωσης θραύσης και οι αντίστοιχες προσεγγιστικές καμπύλες, για διαφορετικά ονομαστικά πάχη δοκιμίων, σε συνάρτηση με το λόγο του χρόνου έκθεσης προς το αντίστοιχο ονομαστικό πάχος. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο λόγος του χρόνου έκθεσης προς το ονομαστικό πάχος και όχι ως προς τον όγκο του δοκιμίου, καθώς τα δυο μεγέθη είναι ανάλογα στην συγκεκριμένη περίπτωση (ίδιες τιμές πλάτους και μήκους στην διατομή αναφοράς του δοκιμίου εφελκυσμού). Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 33 για τα δοκίμια ονομαστικού πάχους 3.2 mm παρατηρείται μείωση της παραμόρφωσης θραύσης επί της αρχικής τιμής περίπου κατά 60 % μετά από έκθεση 96 ωρών στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοΐωσης. Η ίδια περίπου μείωση, συγκεκριμένα κατά 58.2 %

παρατηρείται για χρόνο έκθεσης 36 ωρών στο διαβρωτικό διάλυμα. Η αποτίμηση των δοκιμών εφελκυσμού σε δοκίμια ονομαστικού πάχους 0.4 mm, δίδει μείωση κατά 62.1 % για έκθεση 20 λεπτών (0.33 ώρες) στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοιώσης. Για τα δοκίμια ονομαστικού πάχους 1.6 mm παρουσιάζεται μείωση της παραμόρφωσης θραύσης κατά 85 % από την αρχική τιμή της για έκθεση 24 ωρών στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοιώσης, ενώ για τα δοκίμια ονομαστικού πάχους 0.4 mm παρουσιάζεται μείωση της παραμόρφωσης θραύσης κατά 86 % από την αρχική τιμή της για έκθεση 2 ωρών στο διάλυμα αποφλοιώσης.



Σχήμα 33 : Προσεγγιστικές καμπύλες ποσοστιαίας απομείωσης της παραμόρφωσης θραύσης σε συνάρτηση με το λόγο του χρόνου έκθεσης προς το ονομαστικό πάχος, για δοκίμια υλικού 2024-T3 με διαφορετικά ονομαστικά πάχη.

Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για τα δοκίμια ονομαστικού πάχους 0.4 mm παρουσιάζεται σταθεροποίηση της ποσοστιαίας απομείωσης των

τιμών της παραμόρφωσης θραύσης μετά από 4 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα ενώ τα δοκίμια ονομαστικού πάχους 1.6 mm παρουσιάζουν σταθεροποίηση μετά από 6 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα. Αντίστοιχα τα δοκίμια ονομαστικού πάχους 3 mm φαίνεται να παρουσιάζουν εξομάλυνση της ποσοστιαίας μείωσης των τιμών της παραμόρφωσης θραύσης μετά από 96 ώρες έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα, ενώ τα δοκίμια ονομαστικού πάχους 3.2 mm φαίνεται να τείνουν προς σταθεροποίηση για χρόνο έκθεσης μεγαλύτερο των 96 ωρών.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Δεν παρατηρήθηκε μακροσκοπικά ο σχηματισμός επιφανειακής τρηματικής διάβρωσης (*pitting corrosion*) στα δοκίμια 2024-T3 πάχους 0.4 mm και για χρόνους έκθεσης έως και 6 ώρες στο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοίωσης.
- Για αυτούς τους χρόνους έκθεσης, παρατηρήθηκε μέτρια υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων αντοχής (όριο διαρροής R_p και εφελκυστική αντοχή R_m) του κράματος.
- Αντίθετα, παρατηρήθηκε δραματική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων (ολκιμότητα, παραμόρφωση θραύσης A_f και πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης W) για τους ίδιους χρόνους έκθεσης, ακόμα και για πάρα πολύ μικρούς χρόνους (π.χ. 0.66 ώρες).
- Μεγαλύτερη υποβάθμιση όλων των εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων παρατηρήθηκε για προ-διαβρωμένα δοκίμια που κόπηκαν κατά την εγκάρσια διεύθυνση (LT) σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης (L) και για τους ίδιους χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.
- Όπως ήταν αναμενόμενο, μεγαλύτερη υποβάθμιση όλων των εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων παρατηρήθηκε για τα δοκίμια που διαβρώθηκαν και από τις δύο επιφάνειες τους («BOTH») σε σύγκριση με αυτά που διαβρώθηκαν μόνο από τη μία επιφάνεια τους («ONE») για κάθε διεύθυνση.

- Με την αύξηση του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον, η ηλεκτρονική μικροσκοπία ανέδειξε την σταδιακή αλλαγή του μηχανισμού αστοχίας από όλκιμη σε ημι-ψαθυρή και τελικώς σε πλήρως ψαθυρή θραύση.
- Δεν παρατηρήθηκαν επιφανειακές εγκοπές (*pits*) στα δοκίμια λόγω της διάβρωσης και επομένως η μετρούμενη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού προέρχεται μόνο από την επίδραση των υπο-επιφανειακών προϊόντων διάβρωσης και της τοπικής ψαθυροποίησης λόγω διάχυσης υδρογόνου.
- Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα μείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων, και ειδικότερα της ολκιμότητας, είναι σε άμεση συνάρτηση με το ονομαστικό πάχος του δοκιμίου προς διάβρωση.

5. ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

- ❖ Υπολογισμός ταχύτητας μείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων για διαφορετικά πάχη ελασμάτων από κράμα 2024-T3.
- ❖ Επίδραση της διάβρωσης στην δυσθραυστότητα πολύ λεπτών ελασμάτων από το ίδιο κράμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996
- [2] M.Chun- Yung Niu. *Airframe structural Design*. Hong Kong Commilit Press LTD, 2nd edition, 2002
- [3] S.A.Meguid *Engineering fracture Mechanics*. Elsevier Science Publishers, Essex, England, 1989
- [4] N. Dowling. *Mechanical Behavior of Materials*. Prentice Hall, New Jersey, USA, 2nd edition, 1993
- [5] Anon. Investigation on Damage Tolerance behaviour of Aluminium Alloys (IDA). Mid-Term Technical report of the project No GRD1-2001-40120, Bremen, Germany, September 2003
- [6] ASTM G15-06, Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing, Annual Book of ASTM Standards, 2006.
- [7] Θ. Κερμανίδης, Σ. Παντελάκης. *Εισαγωγή στην Επιστήμη των Υλικών II*, Εκτυπωτικό Κέντρο Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 1997.
- [8] Δ.Ι Παντελής, *Διάβρωση και Προστασία Ναυπηγικών Κατασκευών (Σημειώσεις)*, Αθήνα, 2003.
- [9] W.B. Callister. *Materials Science and Technology An introduction*, seventh edition, Wiley, 2007
- [10] H. Kamoutsis. *Corrosion Induced Hydrogen Embrittlement in High Strength Al Alloys*. PhD thesis, University of Thessaly, Volos, Greece, April 2004
- [11] Anon. Aloha flight 243 – Air disaster. <http://www.aloha.net/~icarus>, 1997.

- [12] Anon. Aloha flight 243 <http://en.wikipedia.org/wiki/Aloha-Airlines-flight-243>, December 2007.
- [13] David E.J. Talbot, D.R. Talbot., *Corrosion Science and Technology*, Second Edition, CRC Press, 2007.
- [14] Inman, M.E., Kelly, R.G., Willard, S.A. and Piascik R.S. In: Proceedings of the FAA-NASA Symposium on the Continued Airworthiness of Aircraft Structures, Virginia, USA, 1997, pp.129.
- [15] E. Μιχαλάς. *Συντήρηση Αεροσκαφών*, Εκδόσεις Άλφα, Αθήνα, 1990.
- [16] D.O. Sprowls, J.D. Walsh, M.B. Shumaker. *Localized Corrosion—Cause of Metal Failure*, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 516, 1972, pp.38–65
- [17] ASTM G34-90, “Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2xxx and 7xxx Series Aluminum Alloys”, (EXCO Test), Annual Book of ASTM Standards, Metals –Test Methods and Analytical Procedures, Section 3, Vol. 03.02, Wear and Erosion; Metal Corrosion, 1995
- [18] ASTM G1 - 03 “Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens”, Annual Book of ASTM Standards, Metals –Test Methods and Analytical Procedures, Vol. 03.02, Corrosion standards and Wear Standards, 2003
- [19] Anon. *Εκτίμηση της Απομένουσας Αντοχής και Διάρκειας Ζωής Διαβρωμένων Κατασκευών*. Πρόγραμμα ΕΠΕΤ II/30, Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα, 1997.
- [20] Sp. Pantelakis, P. Daglaras and Ch. Apostolopoulos. *Tensile and energy density properties Of 2024, 6013, 8090 and 2091 aircraft aluminum alloy after corrosion exposure*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 33:117-134, 2000
- [21] G. Bray, R. Bucci, E. Colvin, and M. Kulak. *Effect of prior corrosion on the S/N fatigue performance of aluminum sheet alloys 2024-T3 and 2524-T3*. In W. Van Der Sluys, R. Piascik, and R. Zawierucha, editors, Effect of the Environment on the Initiation of Crack Growth, page 89. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1298, 1997

- [22] Αλ. Κερμανίδης. *Επίδραση της διάβρωσης στη δομική ακεραιότητα ελαφρών χατασχευών από κράμα αλουμινίου 2024*- Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα, 2003.
- [23] Π. Πετρογιάννης. *Ψαθυροποίηση υδρογόνου λόγω διάβρωσης και προστασία με χρήση τοπικής επικάλυψης με καθαρό αλουμίνιο*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα, Ιανουάριος 2005.
- [24] N.D. Alexopoulos, P. Papanikos. *Experimental and Theoretical studies of corrosion-induced mechanical properties degradation of aircraft 2024 aluminum alloy*, Materials Science and Engineering A, A498: 248–257, 2008.
- [25] P. Petroyiannis, Αl. Kermanidis, E. Kamoutsi, Sp. Pantelakis, V. Bontozoglou, and G. Haide-menopoulos. *Evidence on the Corrosion Induced Hydrogen Embrittlement of the 2024 Aluminum Alloy*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials, 28(6):565-574, 2005.
- [26] P.V. Petroyiannis, Αl.Tli. Kermanidis, P. Papanikos, and Sp.G. Pantelakis. *Corrosion-induced hydrogen embrittlement of 2024 and 6013 aluminum alloys*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 41:173-183, 2004.
- [27] E. Charitidou, G. Papapolymerou, G. Haidemenopoulos, N. Hasiotis, and V. Bontozoglou. *Characterixation of trapped hydrogen in exfoliation corroded aluminum alloy 2024*, Scripta Materialia, 41:1327-1332, 1999.
- [28] J. R. Davis, editor. *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, Metals Park, Ohio, USA, 1993.
- [29] DIN 50125 *Testing of metallic materials-Tensile test pieces*, Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard) / 01-Jan-2004.
- [30] BRITE/EURAM No 1053, *Structural maintenance of aging aircraft (SMAAC)*, CEC Brussels, Final Report, CEC Brussels, 1999.

[31] Ε. Χίνης. *Σημειώσεις Μετρήσεων Τεχνικών Μεγεθών* (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.), 2005.

[32] Ν.Δ. Αλεξόπουλος. *Σημειώσεις Αντοχής Υλικών*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Χίος, 2009.

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

BOTH	Δύο επιφάνειες διάβρωσης στο δοκίμιο εφελκυσμού
EXCO	Επιταχυνόμενο διαβρωτικό διάλυμα αποφλοιώσης σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G34
L	Διεύθυνση έλασης του κράματος αλουμινίου
LT	Διεύθυνση, κάθετη στη διεύθυνση έλασης του κράματος αλουμινίου
ONE	Μία επιφάνεια διάβρωσης στο δοκίμιο εφελκυσμού
REF	Δοκίμιο εφελκυσμού αναφοράς (αδιάβρωτο)

