



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ)

ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ
ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ
ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων: Καθηγητής ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ)

ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ
ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ
ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Τριμελής Επιτροπή:

Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, Καθηγητής (επιβλέπων)

Καθηγητής Σ. Μαυράκος

Καθηγητής Δ. Παντελής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κύριο Νικόλαο Τσούβαλη για την ευκαιρία που μου έδωσε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές του. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους κυρίους Θανάση Μαρκουλή και Χάρι Ξάνθη του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για τη αμέριστη βοήθειά τους στην προετοιμασία και διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών. Τέλος ευχαριστώ και αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία στην οικογένειά μου που με βοήθησε να την ολοκληρώσω με την υπομονή και την υποστήριξή της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	1
1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	6
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	15
2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	16
2.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	19
2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	28
3.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	28
3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	29
3.3.1 Προκαταρκτικοί υπολογισμοί.....	29
3.3.2 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις.....	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ.....	38
4.2 ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	39
4.3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	44
4.4 ΜΕΤΩΠΟ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	46
4.5 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	54
5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	55
5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η τεχνολογία ενίσχυσης και επισκευής με επιθέματα σύνθετων υλικών κυριαρχεί τα τελευταία χρόνια τόσο σε κατασκευές αεροσκαφών και γέφυρες, όσο και σε ναυπηγικές εφαρμογές. Η έκρηξη της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες (Fibre Reinforced Plastics-FRP) και των κολλητικών ουσιών υψηλής αντοχής (Epoxy Resins), έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας νέας επιστήμης ανθεκτικών επισκευών για τις μεταλλικές και όχι μόνο κατασκευές και έχει καθιερωθεί ως η αποτελεσματικότερη προσωρινή επισκευή τους, η οποία μπορεί όχι μόνο να αποκαταστήσει πλήρως τη βλάβη τους, αλλά και σε πολλές περιπτώσεις να επεκτείνει τον αρχικό χρόνο ζωής τους.

Στις ναυπηγικές κατασκευές, η συνεχόμενη καταπόνηση σε μεγάλα μεταβαλλόμενα φορτία είναι πολύ συνηθισμένη και οδηγεί σε δημιουργία και διάδοση ρωγμών κοπώσεως, τοπικές παραμορφώσεις και άλλου τύπου αστοχίες, οι οποίες παρουσιάζονται κυρίως στην γάστρα και στην υπερκατασκευή του πλοίου, αλλά και σε διάφορα άλλα μέρη της μεταλλικής κατασκευής του. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην πολύ ισχυρή εναλλασσόμενη (δυναμική) φόρτιση της κατασκευής από τους κυματισμούς (Hogging-Sagging), σε συνδυασμό με τα έντονα διαβρωτικά χαρακτηριστικά του θαλάσσιου περιβάλλοντος αλλά και τα διάφορα ατυχήματα κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής ζωής της.

Όταν εντοπιστεί σε μια κατασκευή μια τέτοια αστοχία απαιτείται καταρχήν ο περιορισμός της εξάπλωσής της. Δυστυχώς οι παραδοσιακές μέθοδοι επισκευής, όπως η δημιουργία οπής στην άκρη της ρωγμής ή η επανασυγκόλληση/ αναγόμωσή της δεν έχουν εξασφαλισμένη επιτυχία. Η προσθήκη και συγκόλληση από πάνω επιθέματος ιδίου μετάλλου έχει επίσης αποδειχθεί ότι δεν έχει παρά μόνο προσωρινά αποτελέσματα, ενώ επιπλέον για τις αλουμιένιες κατασκευές, οι συγκολλήσεις μειώνουν την υφιστάμενη αντοχή της μεταλλικής κατασκευής. Η μόνη προσωρινή επισκευή που μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη για τις ρωγμές κοπώσεως είναι η αντικατάσταση τμήματος του μετάλλου που περιλαμβάνει τις ρωγμές με νέο. Αν και αυτό θεωρητικά μηδενίζει τους κύκλους φόρτισης, δεν απαλείφει τελικά την προδιάθεση της κατασκευής σε κόπωση στην εν λόγω περιοχή, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η επανασχεδίαση ή μετασκευή της κάποια στιγμή.

Η οριστική αποκατάσταση των εν λόγω αστοχιών συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μπορεί τελικά να έχει αποτέλεσμα την μείωση της επιχειρησιακής διαθεσιμότητας του πλοίου σε περίπτωση απαίτησης έκτακτου δεξαμενισμού, με συνεπακόλουθες σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις. Συνεπώς είναι αναγκαία μια πιο αποτελεσματική μέθοδος προσωρινής επισκευής, ώστε το πλοίο να συνεχίσει κανονικά τη λειτουργία του μέχρι την επόμενη προγραμματισμένη επισκευή του.



Σχήμα 1.1: Προσωρινή αποκατάσταση διαρροής σε δίκτυο θαλάσσης με επίπλαση με το χέρι (HLU) σύνθετου επιθέματος με ίνες άνθρακα (πηγή: www.marinelink.com).

Μια τέτοια εναλλακτική μέθοδος επισκευής και αποτροπής της επέκτασης των ρωγμών είναι η ενίσχυση με επιθέματα από σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες άνθρακα (CFRP) (Σχήμα 1.1.). Αυτά τα σύνθετα υλικά υπόσχονται ελκυστικότερες μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες και προσδίδουν ορισμένα πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά στην περιοχή τοποθέτησης που ενδιαφέρουν καίρια τη ναυπηγική επιστήμη, όπως:

- Εξαιρετική αντίσταση στις περιβαλλοντικές συνθήκες και στη διάβρωση.
- Βελτιωμένη συμπεριφορά σε κραδασμούς.
- Δυνατότητα δημιουργίας περίπλοκων κατασκευών με εργαλεία χαμηλού κόστους.
- Σχετικά μικρή και ελέγξιμη θερμική διαστολή.
- Άριστη αντοχή σε κόπωση και περιοδικά φορτία (π.χ. λόγω κυματισμών)
- Χαμηλή πυκνότητα του σύνθετου υλικού που οδηγεί σε υψηλές τιμές ειδικής αντοχής και ειδικού μέτρου ελαστικότητας, με συνέπεια τη δυνατότητα σχεδίασης κατασκευών υψηλής ακαμψίας και αντοχής με σημαντικά χαμηλότερο βάρος.
- Προσανατολισμό των ινών του σύνθετου υλικού στις διευθύνσεις των κυρίως τάσεων, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αποδοτικότητα της κατασκευής.
- Εύκολη επιδιόρθωση βλαβών σε κατασκευές από σύνθετα υλικά.

Η επισκευή των αστοχιών με χρήση σύνθετων επιθεμάτων από ίνες άνθρακα έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε επισκευές πλοίων κατά το παρελθόν [Grabovac-2002, 2003, 2009] και προσφέρει πέραν των ελκυστικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των ίδιων των σύνθετων υλικών που παρουσιάσαμε παραπάνω και διάφορα επιπλέον πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων επισκευής, τα κυριότερα από τα οποία είναι τα παρακάτω:

- Δεν απαιτείται θερμική κατεργασία του επιθέματος σε υψηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους αποκοπής και συγκόλλησης ελασμάτων, αποφεύγοντας το άδειασμα δεξαμενών καυσίμου και την υποχρεωτικής διαδικασίας της αδρανοποίησης αερίων (gas free), μειώνοντας σημαντικά το τελικό κόστος της επισκευής.

- Αποφεύγεται η δημιουργία νέων σημείων συγκέντρωσης τάσεων, λόγω της απουσίας θερμικών τάσεων, όπως στις συγκολλήσεις και οπών, όπως στα κοχλιωτά μεταλλικά επιθέματα, καθιστώντας την κατασκευή ανθεκτικότερη σε κόπωση.
- Δεν απαιτείται προσβασιμότητα και στις δύο πλευρές του προς επισκευή ελάσματος καθόσον μπορούν να γίνουν είτε μονόπλευρα είτε αμφίπλευρα, σε αντίθεση με την εφαρμογή κοχλιωτών μεταλλικών επιθεμάτων.

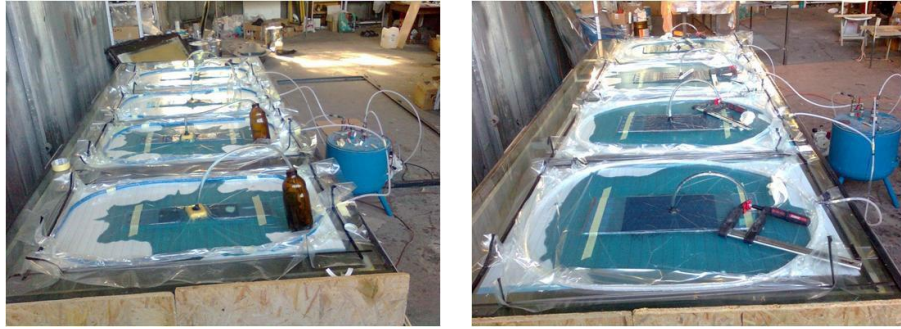
Τα σύνθετα επιθέματα που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη είναι ενισχυμένα με ίνες άνθρακα εμβαπτισμένες σε εποξειδική ρητίνη. Για τον εμβαπτισμό των ινών χρησιμοποιούνται συνήθως δύο μέθοδοι, η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (Hand Lay-Up ή HLU) και η μέθοδος έκχυσης ρητίνης με δημιουργία κενού (Vacuum Resin Infusion ή VI). Στην περίπτωση επίστρωσης με το χέρι (HLU) όπου είναι η μια περίπτωση που θα εξεταστεί στην παρούσα μελέτη, κάθε στρώση της ίνας τοποθετείται και εμβαπτίζεται πριν την τοποθέτηση της επόμενης στρώσης, σε αντίθεση με την περίπτωση έκχυσης ρητίνης σε κενό (VI), όπου ο εμβαπτισμός ξεκινάει αφού τοποθετηθεί το σύνολο των στρώσεων των ινών. Η άλλη περίπτωση που θα εξεταστεί είναι οι προεμβαπτισμένες στρώσεις ινών (Pre-impregnated ή Pre-Preg), οι οποίες είναι ίνες προεμποτισμένες με ρητίνη και σκληρυντή, οπότε δεν απαιτείται επιπλέον προσθήκη υλικών κατά την τοποθέτηση, πλην της εφαρμογής συνδυασμένης πίεσης και θερμότητας στο επίθεμα.

Η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (HLU) αποτελεί την πιο απλή και ευέλικτη μέθοδο εμβαπτισμού των ινών. Η ρητίνη αναμεμιγμένη με καταλύτη και επιταχυντή εφαρμόζεται στις στρώσεις του σύνθετου υλικού αρχικά με τη βοήθεια ενός πινέλου και στη συνέχεια για την επίτευξη ικανοποιητικής διαβροχής των ινών εφαρμόζεται πίεση με τη βοήθεια ενός ειδικού ρολού (Σχήμα 1.2)



Σχήμα 1.2: Διαδικασία επίστρωσης με το χέρι (HLU) σύνθετου επιθέματος σε πειραματικά δοκίμια. (πηγή: Co-Patch D5.1)

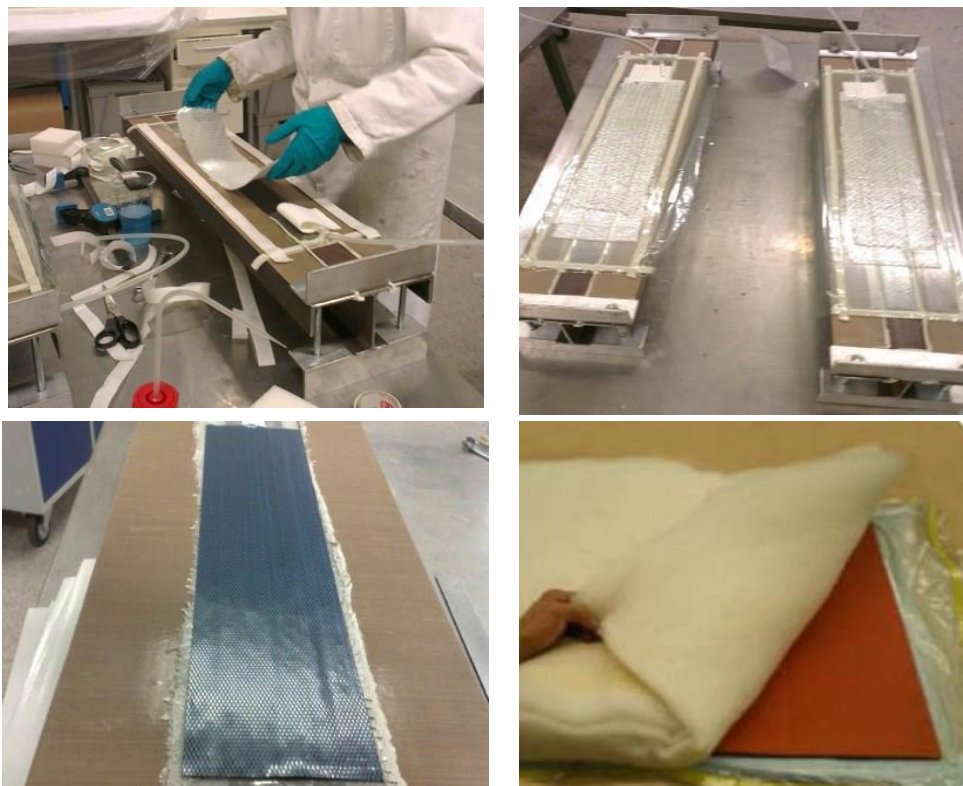
Η μέθοδος έκχυσης ρητίνης με δημιουργία κενού (VI) περιλαμβάνει τον εγκλεισμό του συνόλου των τοποθετημένων στρώσεων ινών σε ένα αεροστεγές ελαστικό κέλυφος, όπου με τη βοήθεια αντλιών δημιουργούνται συνθήκες κενού. Το κέλυφος διαθέτει πολλαπλά σημεία έκχυσης της ρητίνης ή/και κάποιο πλέγμα που να διαχέει τη ρητίνη ομοιόμορφα στις ίνες. Η ρητίνη ρέει λόγω της διαφοράς της πίεσης μεταξύ της ατμόσφαιρας και του κενού στο εσωτερικό του κελύφους, εμβαπτίζοντας αποτελεσματικά τις στρώσεις των ινών (Σχήμα 1.3). Εφόσον η γεωμετρία του υποστρώματος το απαιτεί, μπορεί να εφαρμοστεί μικρή ποσότητα κόλλας μεταξύ των υφασμάτων ώστε να συγκρατηθούν οι ίνες στην ενδεδειγμένη τους θέση.



Σχήμα 1.3: Διαδικασία έκχυσης ρητίνης σε σύνθετο επίθεμα με δημιουργία κενού (VI). (πηγή: Co-Patch D5.1)

Η μέθοδος των προεμβαπτισμένων στρώσεων ινών (Pre-Pregs) αποτελεί την πιο εξειδικευμένη μέθοδο και απαιτεί για την εφαρμογή της την άσκηση πίεσης και την ύπαρξη θερμότητας. Η πίεση εφαρμόζεται συνήθως με τη δημιουργία κενού σε ένα αεροστεγές ελαστικό κέλυφος με τη βοήθεια αντλιών, όπως στη διαδικασία VI, χωρίς όμως την έγχυση ρητίνης αφού είναι ήδη εμποτισμένη στο επίθεμα, αλλά μόνο αναρρόφηση της περίσσειας της. Η θερμότητα επιτυγχάνεται συνήθως με ειδικό φούρνο (κλίβανο). Μπορεί να επιτευχθεί υπό συνθήκες και με θερμαντική κουβέρτα ή θερμαντικές λάμπες, όμως απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην διατήρηση της απαιτούμενης θερμοκρασίας (Σχήμα 1.4).

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μίας από τις τρεις μεθόδους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 1.1.



Σχήμα 1.4: Διαδικασία εφαρμογής προεμβαπτισμένων στρώσεων ινών (Pre-Preg) σύνθετου επιθέματος σε πειραματικά δοκίμια. (πηγή: Co-Patch D5.1)

Πίνακας 1.1: Σύγκριση πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων των μεθόδων κατασκευής επιθεμάτων.

Επίστρωση με το χέρι (HLU)	Έκχυσης ρητίνης με τη δημιουργία κενού (VI)	Προεμβατισμένες ίνες (Pre-Pregs)
<i>Πλεονεκτήματα</i>	<i>Πλεονεκτήματα</i>	<i>Πλεονεκτήματα</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Δεν απαιτείται εξειδίκευση προσωπικού • Δεν απαιτείται χρήση ειδικού εξοπλισμού • Μπορεί να εφαρμοστεί σε επιφάνειες όπου η εφαρμογή διάταξης κενού και στεγανοποίησης δεν είναι πρακτικά εφικτή, πχ. εκεί που περνούν καλώδια μέσω οπής στο κατάστρωμα. • Μπορεί να εφαρμοστεί και σε κατακόρυφες επιφάνειες καθώς τα στρώματα του επιθέματος συγκρατούνται μεταξύ τους. • Το κόστος των υλικών και των αναλωσίμων είναι χαμηλό. 	<ul style="list-style-type: none"> • Καλύτερης ποιότητας/ μηχανικών ιδιοτήτων από την μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (HLU). • Χαμηλές εκπομπές αναθυμιάσεων. • Κατάλληλη για επιθέματα μεγάλου μεγέθους. 	<ul style="list-style-type: none"> • Καμία πιθανότητα δημιουργίας στεγνών περιοχών-προεμποτισμένες ίνες με ρητίνη. • Εφαρμογή και σε κατακόρυφες επιφάνειες. Τα στρώματα συγκρατούνται τόσο μεταξύ τους όσο και με την επιφάνεια. • Διάφοροι τύποι δεν απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες πολυμερισμού, πολυμερίζονται και σε θερμ. περιβάλλοντος. • Δεν απαιτείται ανάμιξη της ρητίνης από το προσωπικό. • Δεν απαιτείται εμποτισμός των ινών από τον προσωπικό. • Χαμηλές εκπομπές αναθυμιάσεων.
<i>Μειονεκτήματα</i>	<i>Μειονεκτήματα</i>	<i>Μειονεκτήματα</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Ελαφρώς χαμηλότερης ποιότητας/ μηχανικών ιδιοτήτων από άλλες μεθόδους. • Η ανάμιξη της ρητίνης γίνεται απαραίτητα από τον χρήστη – αυξημένη πιθανότητα σφάλματος. • Υψηλές εκπομπές αναθυμιάσεων. 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξειδίκευση προσωπικού. • Μη ασφαλής εφαρμογή σε περιβάλλον με έντονη υγρασία ή σκόνη, λόγω δυσκολίας επίτευξης στεγανότητας. • Ανάμιξη της ρητίνης από χρήστη – αυξημένη πιθανότητα σφάλματος. • Ο εμποτισμός των ινών γίνεται από τον χρήστη –πιθανότητα δημιουργίας στεγνών περιοχών • Απαιτείται η χρήση κόλλας κατά την τοποθέτηση των ινών σε κατακόρυφη επιφάνεια-αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος. • Υψηλό κόστος αναλωσίμων 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξειδίκευση/ προσωπικού. • Μη ασφαλής εφαρμογή σε περιβάλλον με έντονη υγρασία ή σκόνη, λόγω δυσκολίας επίτευξης στεγανότητας. • Δύσκολη μεταφορά και αποθήκευση (-18 °C) - μειωμένη διάρκεια ζωής εκτός καταψύκτη (6 ημέρες). • Υψηλό κόστος υλικών-αναλωσίμων. • Υψηλότερες θερμοκρασίες πολυμερισμού.

Η τεχνολογία των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά αποτελεί έναν ταχύτατα αναπτυσσόμενο κλάδο. Τα τελευταία έτη μεγάλος αριθμός πειραματικών δοκιμών έχουν πραγματοποιηθεί για τη μελέτη και βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς των επιθεμάτων για

την επισκευή ναυπηγικών κατασκευών, τόσο χαλύβδινων όσο και αλουμινένιων. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις εφαρμογές των σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική και παρουσιάζονται κάποιες από τις σημαντικότερες μελέτες και δημοσιεύσεις.

1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

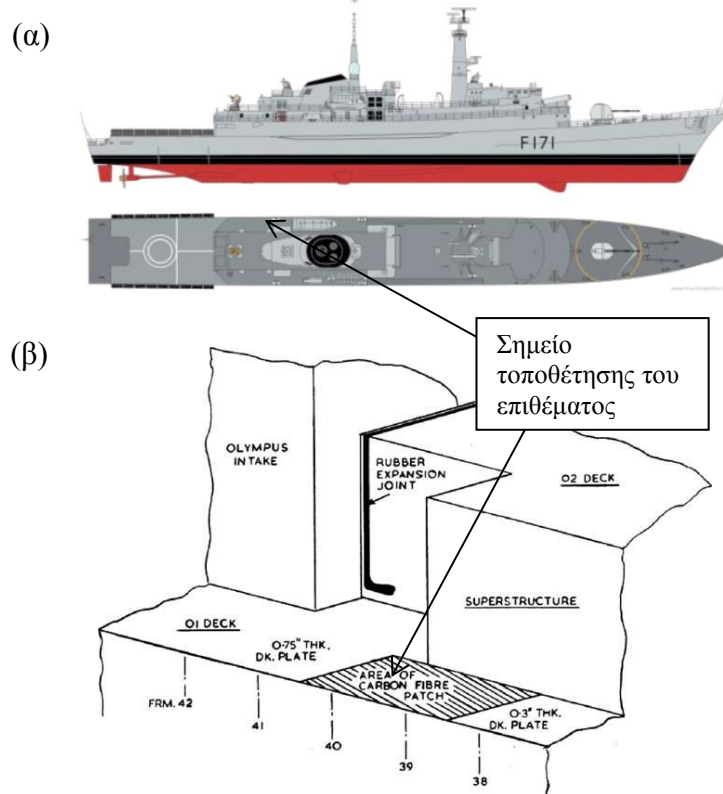
Η αντιμετώπιση των προβλημάτων της κόπωσης απασχολεί εδώ και δεκαετίες την αεροπορική βιομηχανία και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα στην επισκευή των αεροπορικών κατασκευών. Η χρήση των σύνθετων επιθεμάτων τόσο για ενίσχυση των ρωγματώσεων που παρουσιάζονται στην άτρακτο των αεροσκαφών από την κόπωση που υπόκεινται κατά την διάρκεια της πτήσης τους όσο και για παράταση του χρόνου υπηρεσίας ενός γηρασμένου αεροσκάφους, αποδείχθηκε μετά από πολλές μελέτες και επισκευές σε αεροσκάφη της πολεμικής αεροπορίας της Αυστραλίας και των ΗΠΑ ιδιαίτερα αποτελεσματική [Baker-2002] και έχει επικρατήσει σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους επισκευής.

Οι πειραματικές δοκιμές που έγιναν σε αλουμίνιο 2024 T3 από το οποίο κατασκευάζονται οι άτρακτοι και τα πτερύγια των αεροσκαφών ενισχυμένο με σύνθετο επίθεμα Boron/epoxy [Sabelkin-2006], έδειξαν ότι το επίθεμα αύξησε την διάρκεια ζωής κατά 5 φορές σε πάνελ με δοκούς ενίσχυσης και 10 φορές σε μη ενισχυμένα πάνελ αλουμινίου. Σε μια άλλη μελέτη του αεροπορικού ινστιτούτου τεχνολογίας [Sabelkin-2007] έγιναν πειραματικές δοκιμές σε πάνελ αλουμινίου 7075 T6 επισκευασμένο από την μία πλευρά με σύνθετο επίθεμα και αποδείχτηκε η αύξηση της αντοχής σε εναπομένουσες τάσεις και σε κόπωση. Σε πρόσφατη μελέτη [Benachour-2012] εξετάστηκε η επίδραση του σύνθετου επιθέματος Graphite/epoxy στην κόπωση και στην ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής δοκιμίων αλουμινίου 2024 T351 και 7075 T74 και αποδείχτηκαν τα οφέλη από την δράση του επιθέματος στη ζωή της ρωγματωμένης επιφάνειας.

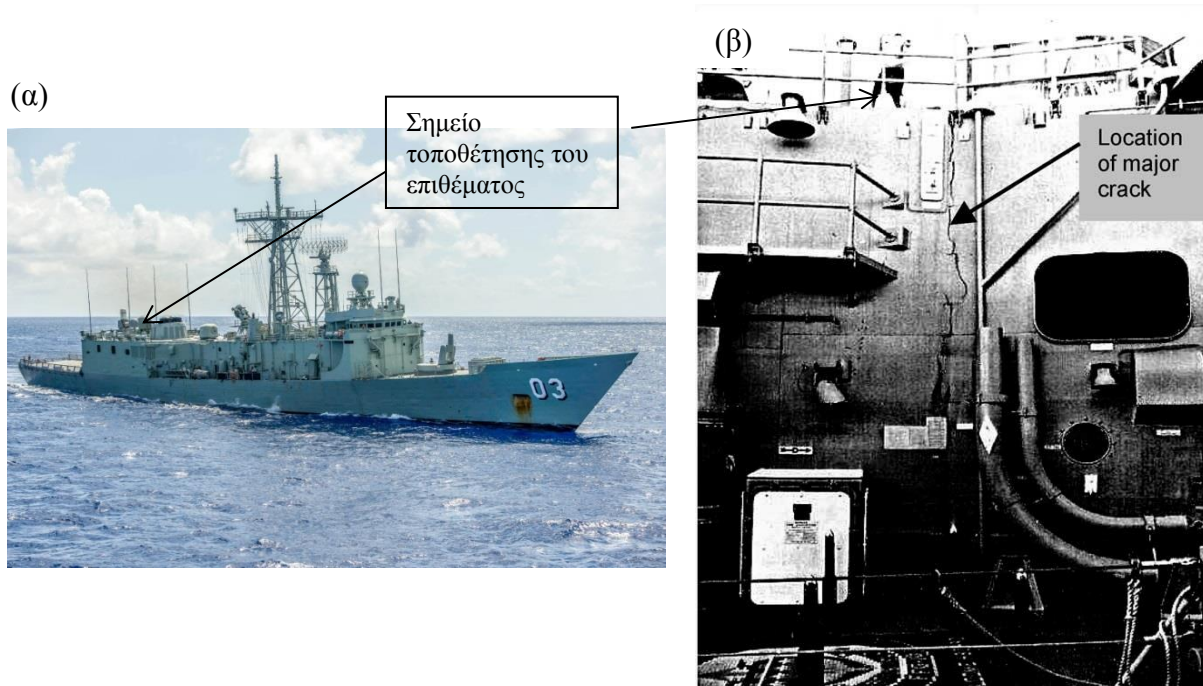
Η χρήση της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων έχει επεκταθεί τα τελευταία χρόνια και στις ναυπηγικές κατασκευές. Οι πρώτες πρακτικές μελέτες στη ναυπηγική βιομηχανία αφορούσαν την επισκευή ρωγμών κοπώσεως στις αλουμινένιες υπερκατασκευές πολεμικών πλοίων. Αρχές δεκαετίας '80 σε φρεγάτα Type 21 (Σχήμα 1.5) της Μ. Βρετανίας (RN) σε συνεργασία με την εταιρεία QinetiQ, τοποθετήθηκε δοκιμαστικά επίθεμα από ίνες άνθρακα με εποξική ρητίνη σε ρωγή μήκους 500 mm, καθώς οι κλασικές επισκευαστικές μέθοδοι (συγκόλληση, χρήση μεταλλικών επιθεμάτων) δεν απέδωσαν ή δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή τους λόγω γεωμετρίας. Για όλη την υπόλοιπη διάρκεια ζωής του πλοίου (10 έτη) δεν διαπιστώθηκε επανεμφάνιση της ρωγμής [Turton-2005].

Στα μέσα της δεκαετίας του '80 εμφανίστηκαν ρωγμές στις αλουμινένιες υπερκατασκευές των φρεγατών κλάσης FFG-7 Oliver Hazard Perry (Σχήμα 16) της Αυστραλίας (R.A.N). Οι προσπάθειες επισκευής των ρωγμών με κλασικές μεθόδους επισκευής (συγκόλληση, τοποθέτηση ενισχυτικών μεταλλικών επιθεμάτων) ήταν ανεπιτυχείς και σε συνεργασία με τον έμπειρο σε αεροπορικές επισκευές Dr A. Baker του Κέντρου Αμυντικών Επιστημών και Τεχνολογίας (DSTO) της Αυστραλίας, τοποθετήθηκαν στην φρεγάτα Sydney δύο σύνθετα

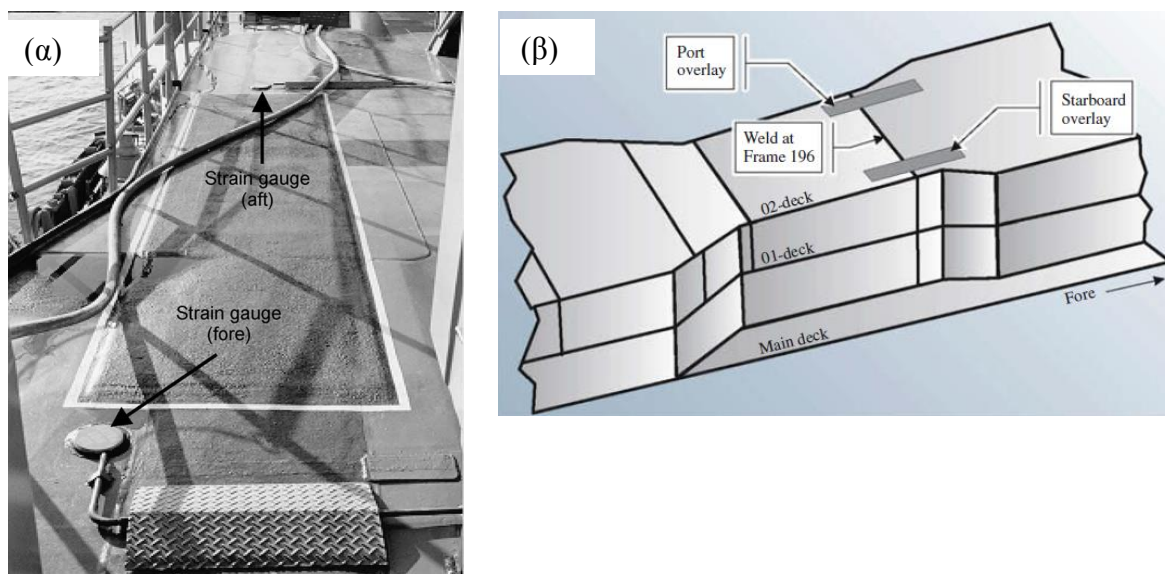
επιθέματα με ίνες άνθρακα (Σχήμα 1.7). Ύστερα από 15 χρόνια σε ενεργό δράση δεν έγινε επανεμφάνιση των ρωγμών στις φρεγάτες [Grabovac-2003, 2009].



Σχήμα 1.5: (α) Φρεγάτα HMS Active Type 21 του RN και (β) θέση της ρωγμής στην υπερκατασκευή και τοποθέτησης σύνθετου επιθέματος.

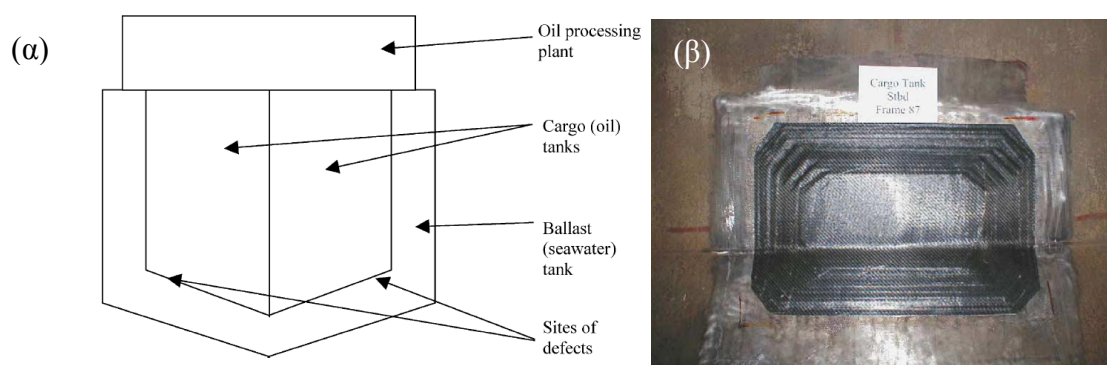


Σχήμα 1.6: (α) Η φρεγάτα 'Sydney' του R.A.N τύπου FFG-7 και (β) θέση τοποθέτησης σύνθετου επιθέματος για αποκατάσταση της ρωγμής στην υπερκατασκευή.



Σχήμα 1.7: (α) Τοποθεσία των σύνθετων ενισχυτικών στο δεύτερο κατάστρωμα των υπερκατασκευών και (β) επίθεμα τοποθετημένο στο διάδρομο υπερκατασκευής.

Η επιτυχία των επισκευών από την χρήση σύνθετων επιθεμάτων στα πολεμικά πλοία είχε ως αποτέλεσμα την επέκταση αυτής της μεθόδου επισκευής και στα εμπορικά πλοία. Το 2002 σε δεξαμενόπλοιο τύπου FPSO επισκευάστηκαν με προεμποτισμένα σύνθετα επιθέματα από ίνες άνθρακα (Pre-Pregs) τρεις ρωγμές κόπωσης μήκους 60 mm σε χαλύβδινο διαχωριστικό τοίχωμα μεταξύ δεξαμενής φόρτου πετρελαίου και δεξαμενής θαλασσέριματος (Σχήμα 1.8). Η μέθοδος επισκευής με σύνθετα υλικά επιλέχτηκε έναντι της συμβατικής μεθόδου της συγκόλλησης γιατί δεν αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες (έως 60 °C μόνο) και επομένως δε απαιτήθηκε να αδειάσουν και να καθαριστούν όλες οι γειτνιάζουσες δεξαμενές (GAS FREE- διάταξη ασφαλείας για εκτέλεση θερμών εργασιών), πλην της ίδιας της δεξαμενής που επισκευάστηκε, με προφανή αποτελέσματα στην επιχειρησιακή διαθεσιμότητα του δεξαμενόπλοιο [Turton-2005].



Σχήμα 1.8: (α) Εγκάρσια τομή πλοίου FPSO και τοποθεσία ρωγμών στις δεξαμενές και (β) σύνθετο επίθεμα Pre-Preg διαστάσεων 750×250 mm τοποθετημένο σε δεξαμενή φορτίου πλοίου FPSO για την επισκευή ρωγμής.

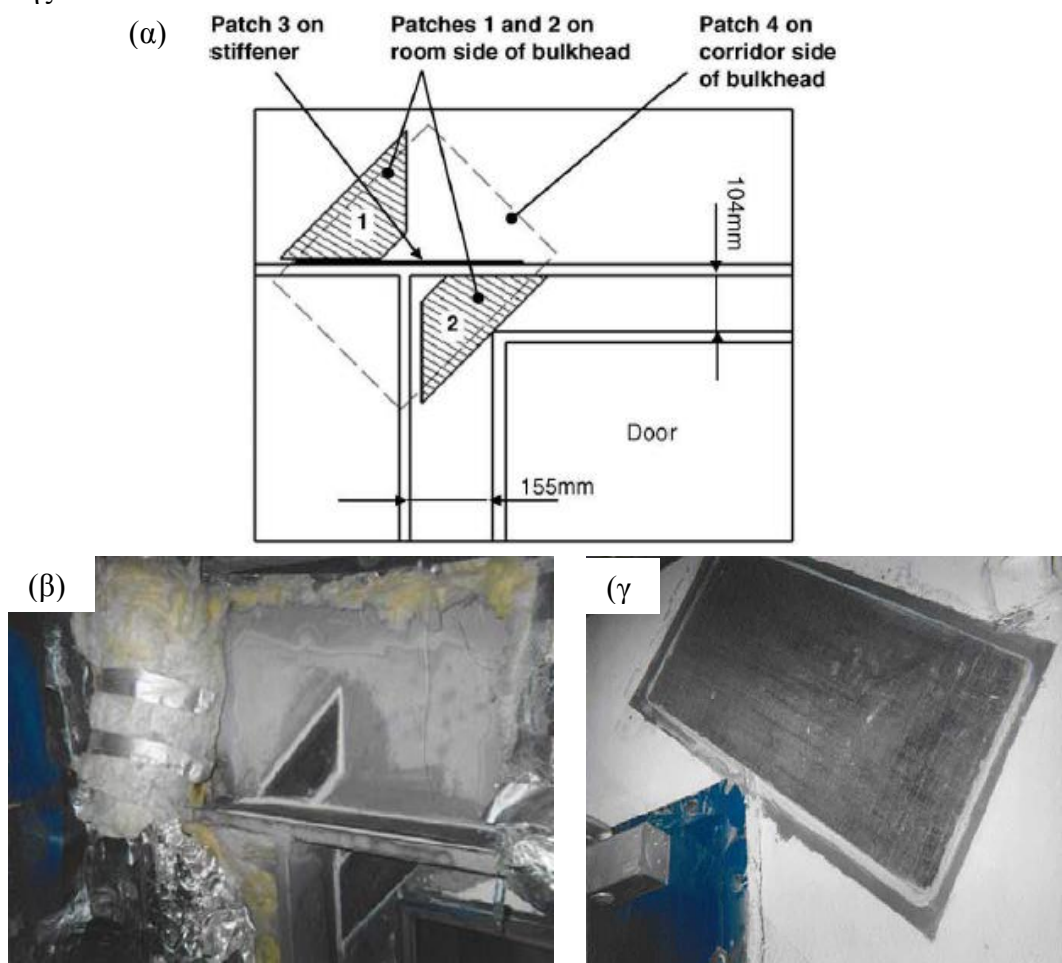
Τα πλεονεκτήματα της χρήσης σύνθετων υλικών σε επισκευές δεξαμενόπλοιων χωρίς να απαιτείται η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εξετάζονται επίσης και σε μελέτη του Νορβηγικού νηογνώμονα (DNV) [McGeorge-2009]. Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη η χρήση σύνθετων επιθεμάτων για τον περιορισμό της διάδοσης ρωγμών από κόπωση μπορεί να γενικευτεί σε όλα τα πλοία που μεταφέρουν και αποθηκεύουν προϊόντα πετρελαίου (FOUs, FPSO, FSO), περιορίζοντας παράλληλα τη εκτέλεση των θερμών εργασιών (συγκολλήσεων) οι οποίες επιβάλλουν διακοπή εργασιών σε τμήματα του πλοίου και πιθανόν άδειασμα για καθαρισμό γειτονικών δεξαμενών. Κατά τη διάρκεια της μελέτης τοποθετήθηκαν σύνθετα επιθέματα σε ρωγμές κόπωσης που εμφανίστηκαν σε πλοίο τύπου FSO (Σχήμα 1.9) με αποτέλεσμα την παύση της διάδοσης της ρωγμής. Οι επισκευές έγιναν σε φρακτές εσωτερικών διαμερισμάτων της υπερκατασκευής και όχι σε κρίσιμα (critical) κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου (Σχήμα 1.10), καθώς δεν υπάρχουν ακόμα αρκετά στοιχεία ούτε πρακτικές εφαρμογές που να αποκλείουν την αστοχία τέτοιων επισκευών.



Σχήμα 1.9: Ειδικού τύπου πλοία αποθήκευσης και διάθεσης πετρελαίου Floating Storage and Offloading (FOS).

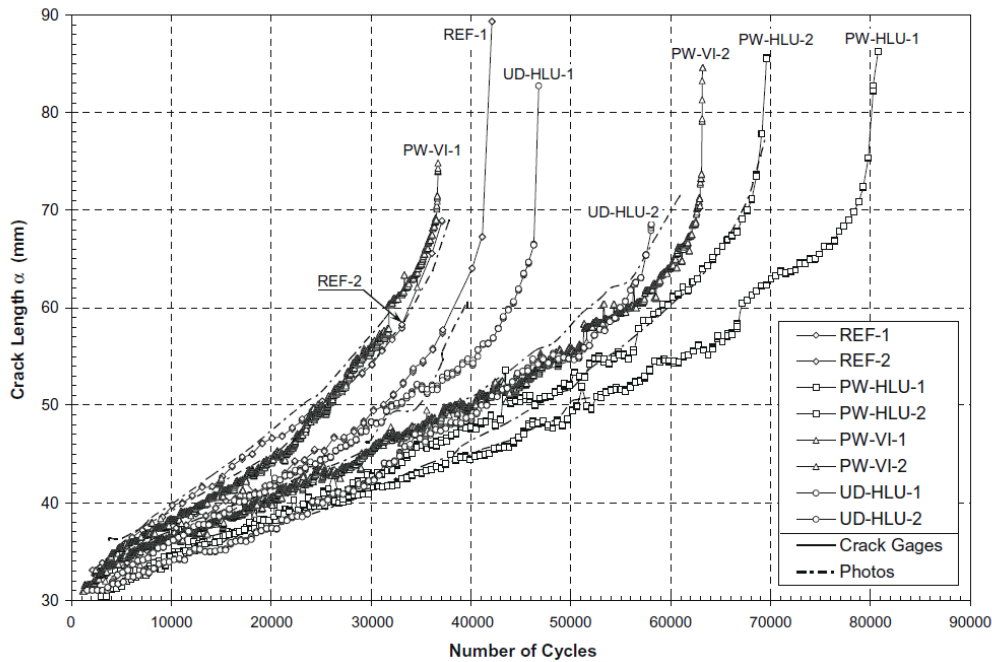
Για την περαιτέρω διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της επισκευής ρωγμών κόπωσης με σύνθετα υλικά, παράλληλα με τις πρακτικές εφαρμογές σε πλοία που είδαμε ανωτέρω, έχουν πραγματοποιηθεί από την διεθνή ερευνητική κοινότητα πληθώρα πειραματικών δοκιμών με σύνθετα επιθέματα όπου εξετάζονται διάφοροι παράγοντες όπως το προς επισκευή μέταλλο, τα υλικά των σύνθετων επιθεμάτων, η γεωμετρία κ.α., ενώ γίνεται και μοντελοποίηση των δοκιμών με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων, με σκοπό την ανάπτυξη

μιας αξιόπιστης μεθόδου υπολογισμού και πρόβλεψης της αποτελεσματικότητας της επισκευής.



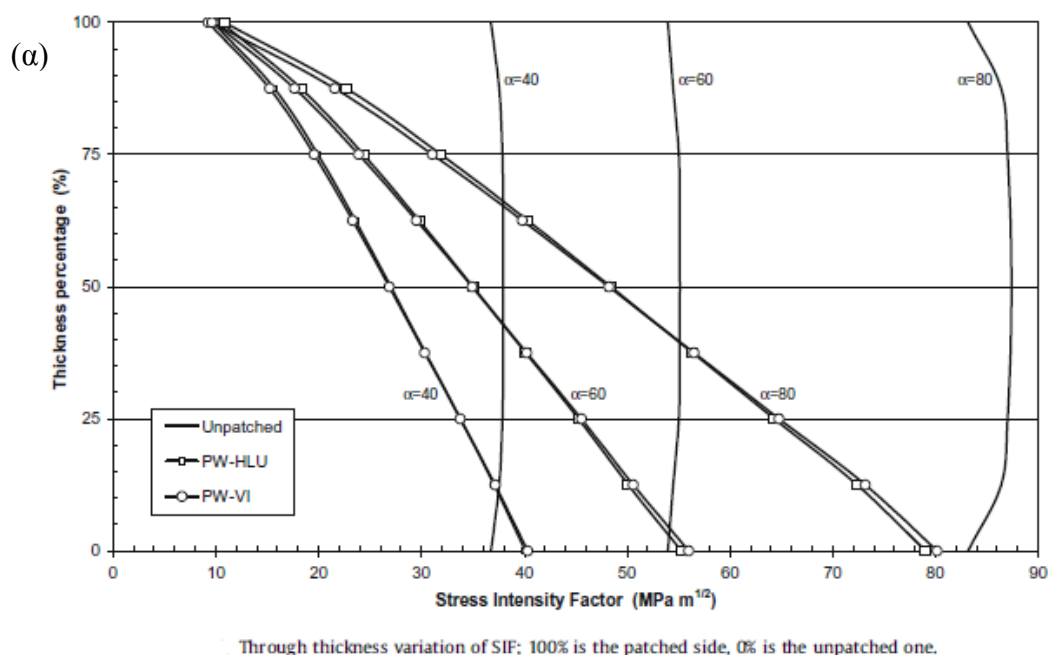
Σχήμα 1.10: (α) Σχηματική απεικόνιση των θέσεων εφαρμογής των επιθεμάτων για την αποκατάσταση της ρωγμής κόπωσης σε πλοίο τύπου FSO, (β) Επιθέματα 1-3 στην φρακτή από την πλευρά του διαμερίσματος, (γ) Επίθεμα 4 στην φρακτή από την πλευρά του διαδρόμου.

Σε μια άλλη μελέτη στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II [Tsouvalis-2009], πραγματοποιήθηκαν πειράματα κόπωσης σε κεντρικά ρωγματώμενα δοκίμια από Grade A ναυπηγικό χάλυβα, μονόπλευρα ενισχυμένα με διάφορες μεθόδους κατασκευής σύνθετου επιθέματος carbon-epoxy (PW/HLU, PW/VI και UD/HLU). Τα δοκίμια είχαν 10 mm πάχος, 662 mm μήκος και 200 mm πλάτος, η αρχική ρωγμή είχε μήκος 60 mm και το σύνθετο επίθεμα είχε ολικό μήκος 300 mm, πλάτος 180 mm και πάχος από 4 έως 11 mm, ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής του. Στα άκρα των δοκιμίων επιβλήθηκε ομοιόμορφη τάση ίση με ± 200 MPa με συχνότητα 2 Hz, ώστε να προσομοιάζει στα δυναμικά φορτία που αναπτύσσονται σε ένα πλοίο. Τα ενισχυμένα δοκίμια αύξησαν τη διάρκεια ζωής τους σε σχέση με τα μη ενισχυμένα κατά ένα παράγοντα της τάξης του 2 (Σχήμα 1.11).

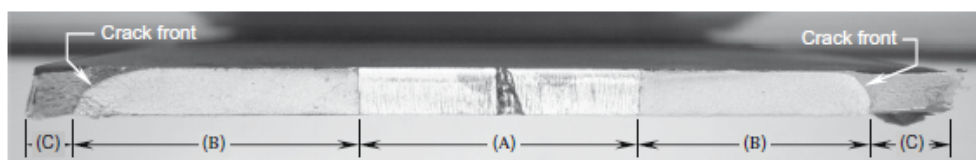


Σχήμα 1.11: Διάρκεια ζωής σε κόπωση για τα ενισχυμένα και μη δοκίμια.

Στην ίδια εργασία αλλά και σε άλλες μελέτες, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην μοντελοποίηση της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής ενισχυμένων δοκιμίων με σύνθετα επιθέματα με χρήση των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το μέτωπο της ρωγμής προσομοιώθηκε για λόγους απλότητας με ευθεία γραμμή και τα αποτελέσματα είχαν πολύ μικρές αποκλίσεις από τα πειραματικά. Στο Σχήμα 1.12 (α) παρουσιάζεται η μεταβολή του Συντελεστή Έντασης Τάσης (ΣΕΤ) στο μέτωπο της ρωγμής για διάφορα μήκη αρχικής ρωγμής, όπου φαίνεται ότι στην πλευρά του επιθέματος παραμένει σταθερός ανεξάρτητα από το μήκος της ρωγμής, ενώ στην μη ενισχυμένη πλευρά αυξάνεται με το μήκος της ρωγμής παίρνοντας τιμές 3, 4 και 5 φορές μεγαλύτερες. Αυτή η μη ομοιόμορφη κατανομή του ΣΕΤ στο μέτωπο της ρωγμής φαίνεται στην τομή του ενισχυμένου δοκιμίου μετά την θραύση (Σχήμα 1.12 (β)), όπου διακρίνονται τρεις περιοχές, της αρχικής εγκοπής (Α), της διάδοσης της ρωγμής (Β) και της περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης (C).



(β)



Cross-section of specimen PW-HLU-2 after its final failure: (A) initial laser cut notch, (B) crack propagation area, (C) plastic failure area.

Σχήμα 1.12: (α) Μεταβολή του ΣΕΤ για ενισχυμένα και μη δοκίμια με αρχικό μήκος ρωγμής 40, 60 και 80 mm, (β) Μέτωπο ρωγμής από κόπωση μονόπλευρα ενισχυμένου ελάσματος.

Σε ανάλογα συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των σύνθετων επιθεμάτων καταλήγουν και άλλες έρευνες του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Σε παρόμοια χαλύβδινα δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν με μονόπλευρο σύνθετο επίθεμα από ίνες άνθρακα διενεργήθηκαν δοκιμές κόπωσης με την ίδια συχνότητα αλλά μικρότερη ομοιόμορφη τάση στα άκρα τους, ίση με ± 100 MPa [Μυρισιώτης-2006]. Η διάρκεια ζωής των ενισχυμένων δοκιμίων αυξήθηκε έως και δύο φορές σε σχέση με εκείνη των μη ενισχυμένων δοκιμίων αναφοράς, παρά την εξαιρετικά χαμηλή τιμή του λόγου ακαμψίας. Σε πειράματα κόπωσης ναυπηγικού χάλυβα 4 mm πάχους, 600 mm μήκους και 50 mm πλάτους [Κουτσούρης-2010], η αρχική εγκοπή είχε μήκος 10 mm και εφαρμόστηκε μονόπλευρο επίθεμα από CFRP (carbon/epoxy) ολικού μήκους 300 mm, πλάτους 50 mm και πάχους 4.5 mm. Εξετάστηκαν δύο τρόποι κατασκευής επιθεμάτων (PW/HLU και PW/VB), ενώ παράλληλα μελετήθηκε η επίδραση της διάβρωσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, τοποθετώντας τα δοκίμια σε θάλαμο αλατονέφωσης. Στα άκρα των δοκιμίων επιβλήθηκε ομοιόμορφη τάση ίση με 150 MPa με λόγο τάσεων $R=0.1$ και συχνότητα ίση με 2 Hz. Τα ενισχυμένα δοκίμια αύξησαν τη διάρκεια ζωής τους σε σχέση με τα μη ενισχυμένα κατά ένα

συντελεστή της τάξης του 3, ενώ ο θάλαμος αλατονέφωσης είχε μικρή επίδραση (27%) για τις πρώτες 20 ημέρες, στα δοκίμια HLU μόνο.

Σε παρόμοια πειράματα κόπωσης από την διεθνή ερευνητική κοινότητα σε κεντρικά ρωγατωμένα δοκίμια αλουμινίου πάχους 2.29 mm, πλάτους 50 mm και μήκους αρχικής ρωγμής 10 mm, εξετάστηκε η επίδραση του πάχους του σύνθετου επιθέματος στη διάρκεια ζωής των δοκιμίων [Hosseini-2006]. Στα άκρα των δοκιμίων αναπτύχθηκε μέγιστη ομοιόμορφη τάση ίση με 118 MPa με λόγο τάσεων ίσο με $R=0.05$ και συχνότητα ίση με 10 Hz. Κατασκευάστηκαν δοκίμια με μονόπλευρα επιθέματα glass/epoxy, boron/epoxy και graphite/epoxy με τέσσερις, οκτώ και δεκαέξι στρώσεις και η αύξηση του χρόνου ζωής σε σχέση με τα ανεπισκεύαστα ήταν 65%, 85% και 236% αντίστοιχα. Τα ίδια πειράματα επαναλήφθηκαν για ελάσματα πάχους 6.35 mm, εμφανίζοντας μικρότερα ποσοστά αυξήσεων που έφτασαν μέχρι το 35%. Σε μια άλλη μελέτη τα πειράματα κόπωσης σε μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια αλουμινίου έδειξαν ότι η διάρκεια ζωής των δοκιμίων αυξήθηκε μεταξύ 2.4 με 5 φορές σε σχέση με τα μη ενισχυμένα δοκίμια [Chung-2003].

Το 2013 μια κοινοπραξία 15 οργανισμών από οκτώ Ευρωπαϊκές χώρες με συντονισμό από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, κήρυξε την έναρξη εργασιών ενός τριετούς ερευνητικού έργου σχετικού με την χρήση ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά (ανθρακονήματα με εποξειδική ή βινυλεστερική ρητίνη) για την επισκευή ναυπηγικών κατασκευών ή κατασκευών πολιτικού μηχανικού από χάλυβα [Composite Patch Repair for Marine and Civil Engineering Infrastructure Applications, Co-Patch]. Στα πλαίσια αυτού του προγράμματος εκτελέστηκαν πληθώρα πειραματικών μετρήσεων και εκπονήθηκαν κατευθυντήριες οδηγίες για το σχεδιασμό, τη μέθοδο κατασκευής του σύνθετου υλικού, του κολλητικού μέσου, την προετοιμασία της επιφάνειας και την εφαρμογή τέτοιων επιθεμάτων σύνθετων υλικών.

Από τα ανωτέρω είναι κατανοητό ότι η αποτελεσματικότητα της χρήσης σύνθετων επιθεμάτων είναι πλέον μια αποδεδειγμένη πειραματικά μέθοδος τόσο στην αεροδιαστημική για την επισκευή των αλουμινένιων τμημάτων των αεροσκαφών όσο και στη ναυπηγική βιομηχανία για την επισκευή χαλύβδινων κυρίως ελασμάτων, όμως το ποσοστό της αύξησης του χρόνου ζωής του επισκευασμένου μετάλλου σε κάθε περίπτωση διαφέρει καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως από τα υλικά, τη γεωμετρία του μετάλλου και του σύνθετου επιθέματος, τον τρόπο κατασκευής του επιθέματος, τη φόρτιση, το μήκος της αρχικής ρωγμής, κ.α.

Επισημαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση η τοποθέτηση σύνθετου επιθέματος δεν σταματά εντελώς την ανάπτυξη της ρωγμής στην μεταλλική επιφάνεια εφαρμογής, αλλά απλά την καθυστερεί.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η τεχνολογία των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο στην παραδοσιακή μέθοδο επισκευών ρωγατώσεων, έντονα αναπτυσσόμενη τα τελευταία έτη. Τα πλεονεκτήματα των σύνθετων επιθεμάτων αρχίζουν να τα καθιερώνουν πέραν από την αεροναυπηγική πλέον και στην ναυπηγική. Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τη

διενέργεια πειραμάτων κόπωσης, αναδεικνύει τις ιδιότητες εκείνες που προσδίδουν την καταλληλότητα και αποτελεσματικότητα των σύνθετων επιθεμάτων με ίνες άνθρακα στις επισκευές ναυπηγικών κατασκευών, προτείνοντας τρόπους περαιτέρω έρευνας και βελτίωσης της αποτελεσματικότητας τους.

Σκοπός λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη μέσω πειραματικών δοκιμών της συμπεριφοράς σε κόπωση ρωγματομένης πλάκας αλουμινίου ενισχυμένης με σύνθετο επίθεμα και η επίδραση σε αυτήν της μεθόδου κατασκευής του επιθέματος, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την προετοιμασία, κατασκευή και εφαρμογή των επιθεμάτων και την επίδραση τους στην συμπεριφορά σε κόπωση του αλουμινίου.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας, περιγράφοντας συνοπτικά τι περιλαμβάνει και για ποιό λόγο έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία των σύνθετων επιθεμάτων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με εφαρμογές των σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική και στην αεροναυπηγική και περίληψη σημαντικών δημοσιεύσεων με παρεμφερές θέμα μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια γενική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και παρουσιάζεται η γεωμετρία των δοκιμών, τα υλικά κατασκευής των επιθεμάτων και οι ιδιότητές τους. Στη συνέχεια ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή της μεθόδου κατασκευής τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί η περιγραφή του τρόπου εκτέλεσης των δοκιμών κόπωσης, η προετοιμασία των δοκιμών για την μέτρηση και οι παράμετροι των πειραματικών δοκιμών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τη βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της ενίσχυσης με σύνθετο επίθεμα στη διάρκεια ζωής των δοκιμών.

Το πέμπτο κεφάλαιο και τελευταίο κεφάλαιο δίνεται ένας επίλογος και μια αποτίμηση του έργου της εργασίας, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές δοκιμές και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντικές εργασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η χρήση της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων έχει, όπως αναφέρθηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ευρεία εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία, η οποία χρησιμοποιεί ως υλικό κατασκευής το αλουμίνιο. Οι λιγότες αλλά επιτυχημένες και αποτελεσματικές πειραματικές εφαρμογές σε ναυπηγικές κατασκευές από χάλυβα τα τελευταία έτη, καθιστούν αναγκαία την καθιέρωσή τους και στη ναυπηγική. Οι δοκιμές που θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν με βασικό σκοπό τη μεταφορά της τεχνογνωσίας των επισκευών από την αεροπορική βιομηχανία σε ναυπηγικές κατασκευές αλουμινίου. Οι βασικές διαφοροποιήσεις που υπαγορεύουν την πρόσθετη μελέτη του θέματος για τις ναυπηγικές κατασκευές, είναι κατ' αρχήν το διαφορετικό υλικό βάσης (αλουμίνιο) και εν συνεχεία ο διαφορετικός τρόπος κατασκευής του επιθέματος. Η χρήση προεμβατισμένων επιθεμάτων (Pre-Pregs) μπορεί να είναι ευρέως διαδεδομένη σε αεροπορικές κατασκευές αλουμινίου, οι λιγότες όμως ναυπηγικές δοκιμές αφορούν κυρίως σε επισκευή χαλύβδινων κατασκευών με επιθέματα Hand-Lay Up (HLU). Οι πειραματικές δοκιμές λοιπόν που θα εκτελεστούν αποσκοπούν στο να διερευνηθεί κατά πόσο η χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά οδηγεί στην αποδοτική ενίσχυση ενός τμήματος της κατασκευής του πλοίου από αλουμίνιο και να καθοριστεί και αξιολογηθεί το ποσοστό της ενίσχυσης διαφορετικών μεθόδων κατασκευής του επιθέματος.

Το αλουμίνιο που επιλέχτηκε είναι το AL 1561, κράμα Al-Mg υψηλής αντοχής που συναντάται σε ορισμένες ναυπηγικές κατασκευές ειδικού σκοπού. Τα επιθέματα που επιλέχτηκαν αποτελούνται από ίνες άνθρακα με εποξειδική ρητίνη. Στο πείραμα εξετάστηκαν 2 διαφορετικές μέθοδοι κατασκευής του επιθέματος: η μέθοδος κατασκευής Hand Lay-Up (HLU) και η Pre-Preg (PP). Για κάθε έναν από αυτούς τους παράγοντες κατασκευάστηκαν 2 δοκίμια (για την αξιολόγηση της επαναληψιμότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων), στα οποία έγινε προετοιμασία της επιφάνειας του μετάλλου πριν την τοποθέτηση του επιθέματος με αμμοβολή. Επίσης έγινε και ένα ζευγάρι πειραματικών δοκιμών σε 2 δοκίμια χωρίς επίθεμα (δοκίμια αναφοράς). Συνολικά κατασκευάστηκαν 6 δοκίμια στα οποία ελέγχθηκε στην παρούσα μελέτη η μηχανική τους αντοχή σε κόπωση. Παράλληλες δοκιμές σε ίδια δοκίμια σε στατικό όμως φορτίο εκτελέστηκαν την ίδια περίοδο στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ στην «πειραματική μελέτη της στατικής συμπεριφοράς σε εφελκυσμό ρωγματομένων αλουμινένιων πλακών ενισχυμένων με επιθέματα από σύνθετα υλικά» (Παπαδόπουλος-2015).

Η ονοματολογία των δοκιμών που επιλέχτηκε και σύμφωνα με την οποία θα γίνεται αναφορά σε αυτά εφεξής, είναι αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Το πρώτο γράμμα της ονομασίας των δοκιμών (D) δηλώνει ότι καταπονήθηκαν σε πειράματα κόπωσης (δυναμικής

καταπόνησης-Dynamic) και το δεύτερο την μέθοδο κατασκευής του επιθέματος: Reference (R) για τα δοκίμια αναφοράς χωρίς επίθεμα και Hand Lay-Up (H) ή Pre-Preg (P) για τα δοκίμια με επίθεμα αντίστοιχα. Για τους τρεις κωδικούς που προέκυψαν (DR, DH, DP) έγινε ξεχωριστή αρίθμηση. Το κάθε δοκίμιο ακολουθείται στην αρίθμηση από το όμοιό του.

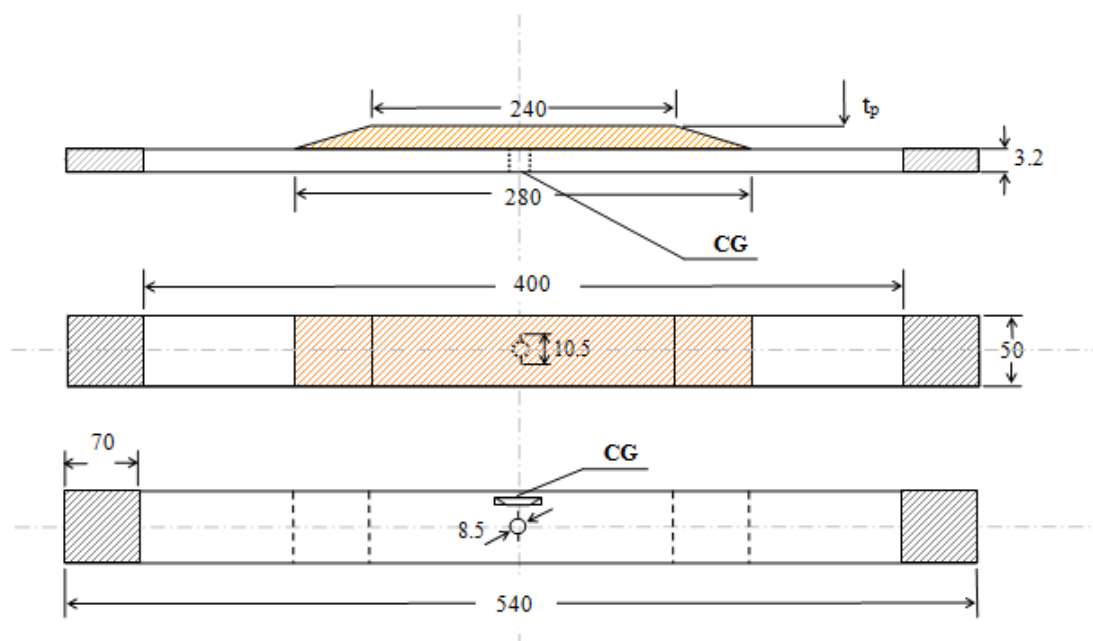
Το πρώτο ζευγάρι είναι τα δοκίμια DR-1 και DR-2. Είναι τα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν έχουν επίθεμα. Με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (HLU) κατασκευάστηκαν 2 ζευγάρια όμοιων δοκιμών τα DH-1 και DH-2. Με τη μέθοδο προεμβαπτισμένου επιθέματος Pre- Preg (PP) κατασκευάστηκαν επίσης δύο δοκίμια τα DP-1 και DP-2.

Πίνακας 2.1: Ονοματολογία δοκιμών.

Δοκίμιο	Επίθεμα	Μέθοδος Εφαρμογής	Είδος Φόρτισης	Προετοιμασία Επιφάνειας
DR-1	Όχι	-	Κόπωση	-
DR-2	Όχι	-	Κόπωση	-
DH-1	Ναι	Hand Lay-Up	Κόπωση	Αμμοβολή
DH-2	Ναι	Hand Lay-Up	Κόπωση	Αμμοβολή
DP-1	Ναι	Pre-Preg	Κόπωση	Αμμοβολή
DP-2	Ναι	Pre-Preg	Κόπωση	Αμμοβολή

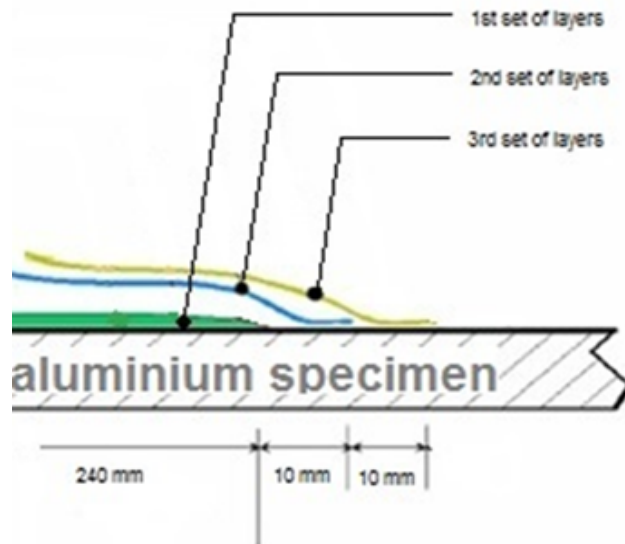
2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η γεωμετρία των δοκιμών είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



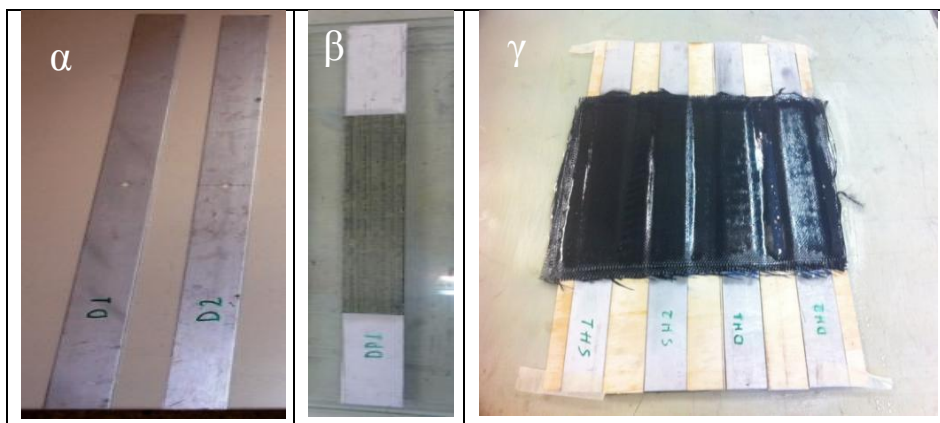
Σχήμα 2.1: Γεωμετρία δοκιμών.

Τα δοκίμια είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα με ονομαστικά μεγέθη ως εξής: ελεύθερο μήκος $L_s=540$ mm, πλάτος $W_s=50$ mm, πάχος $t_s=3.2$ mm. Για να κατασκευάσουμε την κεντρική διαμπερή εγκοπή στο μήκος $2a=10.5$ mm που επιλέχθηκε για να έχουμε ρεαλιστικό χρόνο δοκιμών όπως θα αναλύσουμε στο κεφάλαιο 3, δημιουργήσαμε κεντρική οπή διαμέτρου 8.5 mm και 2 εγκοπές κατά τη διεύθυνση του πλάτους μήκους 1 mm η καθεμία, οι οποίες θα οδηγήσουν τη διάδοση της ρωγμής προς αυτή τη διεύθυνση. Η διαδικασία κατασκευής των οπών και εγκοπών περιγράφεται αναλυτικά στο εδάφιο 2.4. Το επίθεμα αποτελείται από τρεις ομάδες στρώσεων πλάτους $W_p=W_s=50$ mm, ενεργού μήκους $L_p=240$ mm και συνολικού πάχους t_p ώστε να επικαλύπτουν η μία την άλλη με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Το πάχος t_p του σύνθετου επιθέματος και ο αριθμός των στρώσεων στις δυο μεθόδους κατασκευής διαφέρουν και ο τρόπος υπολογισμού τους παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο εδάφιο 2.3.



Σχήμα 2.2: Τοποθέτηση του σύνθετου επιθέματος σε 3 ομάδες στρώσεων με επικάλυψη (taper).

Το πραγματικό μήκος κάθε δοκιμίου είναι 540 mm, όμως κατά την τοποθέτηση του στην υδραυλική μηχανή MTS χρειάζονται 70 mm από κάθε άκρη του δοκιμίου τα οποία μπαίνουν στις αρπάγες της μηχανής (γκρι γραμμοσκιασμένο τμήμα στο Σχήμα 2.1). Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται τα δοκίμια αναφοράς χωρίς επίθεμα και δοκίμια με σύνθετο επίθεμα κατασκευασμένα με τη μέθοδο PP και HLU που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές δοκιμές.



Σχήμα 2.3: Δοκίμια αλουμινίου αναφοράς (χωρίς επίθεμα) (α) και δοκίμια με σύνθετο επίθεμα κατασκευασμένα με τη μέθοδο PP (β) και HLU (γ).

Σε όλα τα δοκίμια έγινε μέτρηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής με τη χρήση ειδικών αισθητήρων τύπου επιμηκυνσιομέτρου, τα crack gages. Η θέση του crack gage διέφερε από δοκίμιο σε δοκίμιο και αναλύεται στο εδάφιο 3.3.2. Οι ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων φαίνονται στον Πίνακα 2.2, ενώ της αρχικής ρωγμής στον Πίνακα 2.3. Το μήκος L_s σε όλες τις περιπτώσεις παραμένει 540 mm.

Πίνακας 2.2: Ακριβείς διαστάσεις δοκιμίων.

Δοκίμιο	Πάχος αλουμινίου t_s (mm)	Πάχος επιθέματος t_p (mm)	Τελικό πάχος Δοκιμίου t (mm)	Πλάτος $W_S=W_P$ (mm)
DR-1	3.29	-	3.29	50.07
DR-2	3.15	-	3.15	49.87
DH-1	3.15	2.00	5.15	50.32
DH-2	3.17	1.94	5.11	50.15
DP-1	3.29	2.27	5.57	50.01
DP-2	3.07	2.25	5.33	51.16

Πίνακας 2.3: Ακριβείς διαστάσεις αρχικής ρωγμής δοκιμίων.

Δοκίμιο	Αρχικό μήκος οπής (mm)	Αρχικό μήκος ρωγμής $2a$ (mm)
DR-1	8.36	10.50
DR-2	8.38	10.67
DH-1	8.54	10.72
DH-2	8.31	10.31
DP-1	8.36	10.81
DP-2	8.43	10.90

2.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Το αλουμίνιο που επιλέχθηκε για τις πειραματικές δοκιμές όπως αναφέρθηκε είναι το AL 1561, κράμα Al-Mg υψηλής αντοχής για ναυπηγικές κατασκευές, κατάλληλο για θερμοκρασίες από (-) 196⁰C έως 70⁰C και ιδιαίτερα ανθεκτικό σε συνθήκες διάβρωσης. Τα δοκίμια κόπηκαν όλα από την ίδια πλάκα (panel) μετάλλου. Για τον ακριβή προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του αλουμινίου, στα πλαίσια της παράλληλης μελέτης των στατικών δοκιμών καταπονήθηκαν σε εφελκυσμό τα 2 δοκίμια αναφοράς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στη μελέτη στατικής συμπεριφοράς [Παπαδόπουλος-2015] και φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Πειραματικά αποτελέσματα προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων αλουμινίου AL 1561.

Μέτρο Ελαστικότητας E_s (GPa)	Όριο διαρροής (MPa)
81.74	233
79.02	234

Από τον μέσο όρο των δύο προκύπτει για το Al 1561: $E=80.38$ GPa και $\sigma_0=233.5$ MPa.

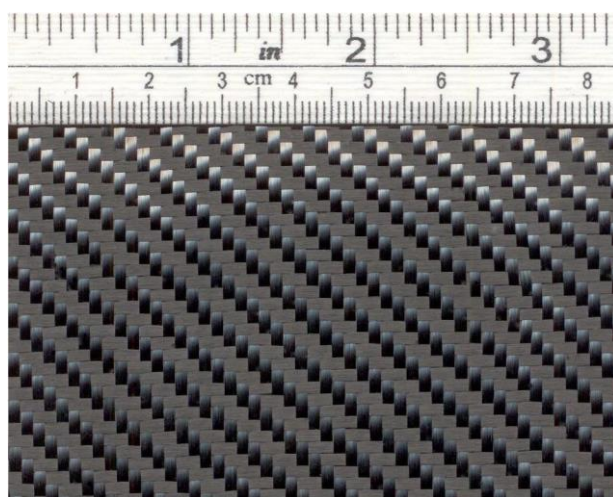
Ο τύπος του ανθρακοϋφάσματος που επιλέχθηκε για την κατασκευή των επιθεμάτων με την μέθοδο HLU είχε προσανατολισμό ινών 0⁰/90⁰, πλέξη Plain Weave (PW) και επιφανειακό βάρος 200 gr/m², της εταιρείας R&GFaserverbundwerkstoffe (Σχήμα 2.4). Η ρητίνη είναι η εποξειδική ρητίνη R9330 της εταιρείας FIBERMAX, η οποία είναι πολύ λεπτόρρευστη (ιξώδες στους 20⁰C = 6±2 mPa.s) και ο σκληρυντής με τον οποίο προσμείχθηκε είναι ο H9054 (γρήγορος, με Pot life σε 500 g μίξης στους 20⁰ C =81 min και με ιξώδες στους 20⁰C = 9±3 mPa.s) της εταιρείας FIBERMAX με αναλογία πρόσμιξης 22 προς 100 κατά βάρος. Ο συνδυασμός του ανθρακοϋφάσματος και της ρητίνης (με τον σκληρυντή) χρησιμοποιήθηκε σε αναλογία 50/50 κατά βάρος.



Σχήμα 2.4: Ανθρακοϋφασμα με πλέξη Plain Weave.

Ο πλήρης χαρακτηρισμός των σύνθετων υλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν τα επιθέματα HLU με πλέξη PW ήταν ήδη γνωστός από παλαιότερες δοκιμές όπου χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια υλικά και οι ίδιες μέθοδοι κατασκευής. Τα αποτελέσματα περιγράφονται αναλυτικά σε τεχνική έκθεση του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας [Μυρσιώτης-2006].

Για τα προεμποτισμένα με ρητίνη επιθέματα Pre-Preg ο τύπος του ανθρακούφασματος που χρησιμοποιήθηκε είχε προσανατολισμό ινών $0^{\circ}/90^{\circ}$, πλέξη Plain Weave (PW) και επιφανειακό βάρος 205 gr/m^2 , της εταιρείας FIBERMAX με εμπορικό κωδικό C210Ppp (Σχήμα 2.5). Οι μηχανικές ιδιότητες, ο πειραματικός τρόπος υπολογισμού τους και ο πλήρης χαρακτηρισμός του υλικού περιγράφονται αναλυτικά στην πρόσφατη αντίστοιχη μελέτη στατικής συμπεριφοράς σε εφελκυσμό αλουμινένιων πλακών ενισχυμένων με σύνθετα επιθέματα. [Παπαδόπουλος-2015].



Σχήμα 2.5: Προεμποτισμένο με ρητίνη ανθρακούφασμα Pre-Preg.

Οι μηχανικές ιδιότητες των επιθεμάτων HLU και PP που προκύπτουν φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.5 όπου σ_u είναι η αντοχή του σύνθετου υλικού, E_p είναι το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό, W_f είναι η περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες άνθρακα και t_{ply} είναι το μέσο πάχος μιας στρώσης υλικού.

Πίνακας 2.5: Ιδιότητες σύνθετων υλικών επιθεμάτων.

Υλικό Επιθέματος	σ_u (MPa)	Μέτρο		
		Ελαστικότητας E_p (MPa)	W_f (%)	t_{ply} (mm)
HLU/ PW	658.9	46300	56.0	0.30
PP/ PW	636.7	52516	80.6	0.22

Ο αριθμός των στρώσεων του επιθέματος άρα και το πάχος του, t_p , καθορίστηκαν επιλέγοντας αρχικά μια τιμή για το λόγο ακαμψίας επιθέματος-πλάκας SR, ο οποίος δίνεται από τη Σχέση 3.1:

$$SR = \frac{E_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s} \quad (2.1)$$

Από αυτή τη σχέση προκύπτει:

$$t_p = SR \cdot \frac{E_s \cdot t_s}{E_p} \quad (2.2)$$

Ο αριθμός των στρώσεων υπολογίζεται:

$$\text{Αριθμός στρώσεων} = t_p / t_{ply} \quad (2.3)$$

όπου:

$E_s = 69$ GPa, το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου Al 6061 (Al-Mg), πλησιέστερης στο Al 1561 σειράς

t_s είναι το πάχος του αλουμινίου

E_p είναι το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου επιθέματος

t_p είναι το πάχος του σύνθετου επιθέματος

t_{ply} είναι το πάχος της στρώσης του σύνθετου επιθέματος

Το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου για τους υπολογισμούς επιλέχθηκε να είναι αυτό του αλουμινίου της σειράς Al 6061 (Al-Mg), ως το πιο κοντινό κράμα στο Al 1561 και όχι αυτό που υπολογίστηκε πειραματικά λόγω του ότι οι δοκιμές αυτές έγιναν με δοκίμια με σπή και άρα υποθέτουμε ότι το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου είναι ελαφρώς μικρότερο. Επιπλέον εάν βασιζόμασταν στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας του Al 1561 που υπολογίστηκε πειραματικά (80.38 GPa), θα οδηγούμασταν σε μεγαλύτερα πάχη επιθεμάτων και έτσι επίσης αποφασίστηκε να το αποφύγουμε. Το επιθυμητό θα ήταν να μπορούσαμε να επιτύχουμε SR=1 όπως και προτείνεται στη βιβλιογραφία [Turton, T.J.-2005]. Όμως και σε αυτή την περίπτωση θα οδηγούμασταν σε πολύ μεγάλο πάχος επιθέματος σύμφωνα με τη Σχέση 2.2, άρα και αριθμού στρώσεων (Σχέση 2.3), πράγμα το οποίο είναι μη πρακτικό όταν αναφερόμαστε σε πραγματικές συνθήκες, αλλά ενέχει και κινδύνους για την ποιότητα της κατασκευής. Αν για παράδειγμα παίρναμε SR=1 για τη μέθοδο HLU θα καταλήγαμε σε πάχος επιθέματος 14.90 mm και αριθμό στρώσεων 15, ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος για αυτή τη μέθοδο κατασκευής. Για την μέθοδο PP αντίστοιχα με το ίδιο SR θα καταλήγαμε σε πάχος επιθέματος 17.69 mm και αριθμό στρώσεων 17 που είναι επίσης μεγάλος. Επιλέχτηκε τελικά λόγος ακαμψίας SR=0.5, από τον οποίο προκύπτει

πάχος επιθέματος $t_p=2.40$ mm για την μέθοδο HLU και 1.98 mm για την μέθοδο PP, από το οποίο διαιρώντας με το αντίστοιχο t_{ply} (Πίνακας 2.5), προκύπτει ο αριθμός των στρώσεων του επιθέματος, ο οποίος είναι 8 στρώσεις για τη μέθοδο HLU και 9 στρώσεις για τη μέθοδο PP. Στον Πίνακα 2.6 φαίνονται συγκεντρωτικά οι υπολογισθείσες τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των επιθεμάτων.

Πίνακας 2.6: Γεωμετρία και μέτρο ελαστικότητας των επιθεμάτων που ελήφθησαν υπόψη για την κατασκευή των επιθεμάτων.

Επίθεμα	Μέτρο Ελαστικότητας E_p (GPa)	Πάχος του Επιθέματος t_p (mm)	Πάχος της στρώσης t_{ply} (mm)	Αριθμός Στρώσεων	Τελική τιμή SR
HLU/ PW	46.3	2.40	0.30	8	0.50
PP/ PW	52.5	1.98	0.22	9	0.47

Σύμφωνα με την μελέτη [D.5.1 Best practice design and application procedures του προγράμματος Co-Patch], ο βέλτιστος τρόπος υπολογισμού του ενεργού μήκους του επιθέματος είναι περίπου 80 φορές το πάχος του αλουμινίου. Έτσι το ενεργό μήκος αποφασίστηκε να είναι 240 mm όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Επίσης ορίζεται το μέγεθος επικάλυψης της κάθε ομάδας στρώσεων από την επόμενη έτσι ώστε η γωνία που να σχηματίζεται στις άκρες να είναι περίπου $3-5^\circ$ και συνεπώς το μήκος επικάλυψης σε κάθε πλευρά πρέπει να είναι 10 mm. Το πλάτος του επιθέματος αποφασίστηκε να είναι ίσο με το πλάτος του δοκιμίου. Η τμηματική διαστρωμάτωση και η επικάλυψη κάθε ομάδας στρώσεων από την επόμενη είναι σημαντική για την αποφυγή αποκόλλησης του επιθέματος στα άκρα του.

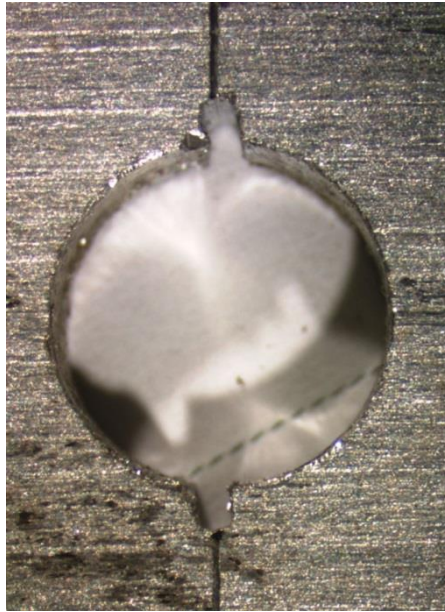
Για τις δύο μεθόδους κατασκευής οι ομάδες αυτές των στρώσεων, ο αριθμός στρώσεων, οι διαστάσεις τους και η σειρά με την οποία επιστρώθηκαν επάνω στο αλουμινένιο δοκίμιο για την κατασκευή του επιθέματος έχουν ως εξής:

- Μέθοδος HLU
 - 1^η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 240 mm
 - 2^η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 260 mm
 - 3^η Ομάδα – 2 στρώσεις μήκους 280 mm
- Μέθοδος PP
 - 1^η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 240 mm
 - 2^η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 260 mm
 - 3^η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 280 mm

Επομένως κάθε επόμενη ομάδα στρώσεων επικαλύπτει την προηγούμενη.

2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια αλουμινίου αρχικά κόπηκαν στις επιθυμητές διαστάσεις με ψαλίδι κοπής λόγω μη διαθεσιμότητας άλλου μέσου κοπής, πχ. υδροκοπής (waterjet). Κατόπιν χαραχτηκαν και ανοίχτηκαν σε όλα τα δοκίμια οι οπές χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό τρυπάνι χειρός και τέλος οι εγκοπές με μηχανική σέγα χειρός (Σχήμα 2.4).

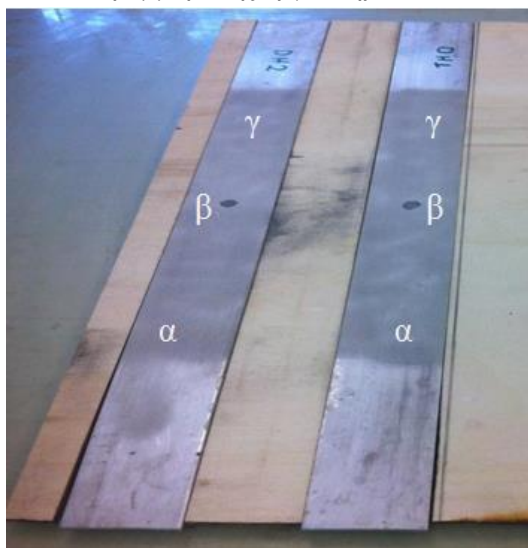


Σχήμα 2.4: Οπή με τις εγκοπές στο στερεοσκόπιο του εργαστηρίου.

Στη συνέχεια έγινε αμμοβολή στην επιφάνεια των δοκιμίων όπου θα τοποθετούνταν το συνθετικό επίθεμα με τον εξοπλισμό του εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας και ειδική σκόνη οξειδίου αλουμινίου μεσαίου μεγέθους κόκκων (60-80) ή 250-180 microns (Σχήμα 2.5). Η αμμοβολή έγινε ώστε να δημιουργηθεί τραχύτητα στην επιφάνεια με σκοπό την καλύτερη συνάφεια μεταξύ κόλλας και μετάλλου. Εν συνεχεία μετρήθηκε η μέση τραχύτητα της επιφάνειας Ra των δοκιμίων, με ειδικό φορητό εξοπλισμό του εργαστηρίου της εταιρείας TIME, τύπου TR100 Surface Roughness Tester. Όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν με τη σειρά στον πάγκο εργασίας με την αμμοβολημένη επιφάνεια προς τα πάνω. Εν συνεχεία ελήφθησαν μετρήσεις κοντά στο αριστερό άκρο της αμμοβολημένης επιφάνειας, στο κέντρο αυτής και στο δεξιό άκρο της, με τις θέσεις ως καθορίζονται με α,β,γ αντίστοιχα στο Σχήμα 2.6. Οι μετρήσεις έγιναν παράλληλα με τον διαμήκη άξονα και η τραχύτητα μετρήθηκε με μήκος αποκοπής 0.8 mm, ενώ στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε μm .



Σχήμα 2.5: Συσκευή αμμοβολής εργαστηρίου σύνθετων υλικών.



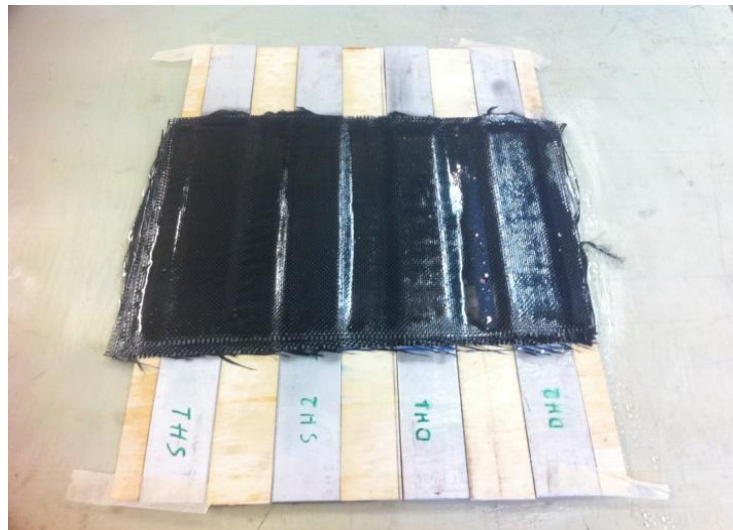
Σχήμα 2.6: Δοκίμια μετά την αμμοβολή και τη δημιουργία οπής και εγκοπών και σημεία μέτρησης τραχύτητας (α, β, γ).

Πίνακας 2.8: Μετρήσεις τραχύτητας αμμοβολημένης επιφάνειας δοκιμίων (με τη μέθοδο Ra).

Δοκίμιο	Σημείο α (μm)	Σημείο β (μm)	Σημείο γ (μm)	Μ.Ο (μm)	Μέγιστη απόκλιση από Μ.Ο.	Διαφο ρά (%)	Διακύμ ανση (%)
DH-1	3.37	3.82	3.57	3.59	6.51 %	10 %	5 %
DH-2	3.23	3.01	3.44	3.23	6.61 %		4.6 %
DP-1	4.62	5.35	2.95	4.30	24.23 %	-8.3 %	151.4 %
DP-2	5.07	4.76	4.16	4.66	8.72 %		21.4 %

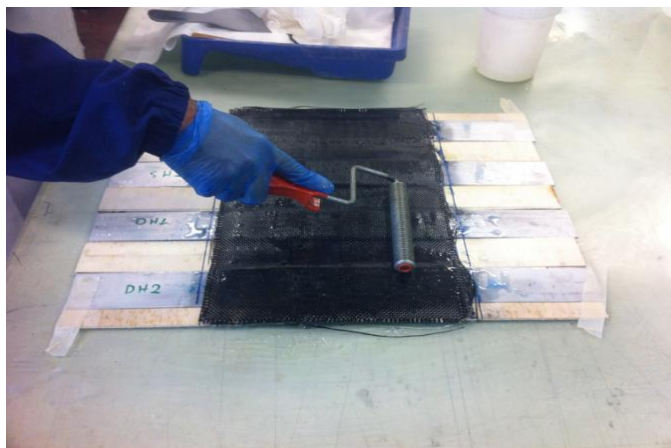
Το επόμενο στάδιο ήταν η τοποθέτηση του επιθέματος πάνω στο μέταλλο σύμφωνα με την προβλεπόμενη μέθοδο για κάθε τύπο επιθέματος. Όπως αναφέραμε εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι, η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (Hand Lay-Up) και η μέθοδος προεπιποτισμένου επιθέματος (Pre-Preg).

Για τα επιθέματα Hand Lay-Up (HLU) σε περίπτωση που τοποθετούσαμε το επίθεμα σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά θα υπήρχε ο κίνδυνος να δημιουργηθεί καμπυλότητα κατά το εγκάρσιο και να μην επιτύχουμε το ίδιο πάχος επιθέματος κατά τη διεύθυνση του πλάτους. Για το λόγο αυτό αλλά και για πρακτικούς λόγους (εξοικονόμηση χρόνου) και ομοιομορφία των επιθεμάτων, η τοποθέτηση του επιθέματος έγινε σε ομαδοποιημένα δοκίμια (το ένα δίπλα απ' το άλλο). Ο διαχωρισμός όμως των δοκιμίων μετά τη στερεοποίηση του επιθέματος θα ήταν επισφαλής εάν αυτά βρίσκονταν το ένα δίπλα στο άλλο, γιατί θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί τροχός κοπής και επειδή δεν θα υπήρχε διάκενο μεταξύ τους ο τροχός αναγκαστικά θα έβρισκε το μέταλλο. Η λύση βρέθηκε με την τοποθέτηση μεταξύ τους αλλά και στις άκρες του πρώτου και τελευταίου στη σειρά δοκιμίων, λεπτών λωρίδων κόντρα πλακέ ίσου μήκους και πάχους με το μέταλλο και πλάτος 20 mm (Σχήμα 2.7). Με τον τρόπο αυτόν ήταν δυνατός ο διαχωρισμός των δοκιμίων μετά τη στερεοποίηση του επιθέματος με τη χρήση του τροχού κοπής, καθώς ο τροχός δεν έβρισκε μέταλλο. Με αυτόν τον τρόπο επίσης αποφεύχθηκε η δημιουργία καμπυλότητας στο επίθεμα κατά το εγκάρσιο, αφού δεν υπήρχαν ελεύθερα άκρα που θα διέρρεε η υγρή ρητίνη (εκεί οφείλεται και η τοποθέτηση κόντρα πλακέ στα άκρα του πρώτου και τελευταίου δοκιμίου).



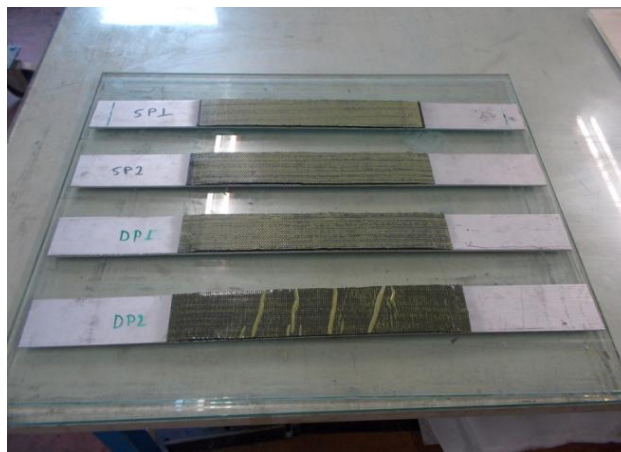
Σχήμα 2.7: Δοκίμια με τη μέθοδο Hand Lay-Up κατά ομάδες.

Στη μέθοδο HLU, αφού τοποθετήθηκαν τα αλουμινένια δοκίμια σε ομάδες των 4 μαζί με τα δοκίμια της μελέτης των στατικών δοκιμών, επικαλύφθηκαν με μια στρώση ρητίνης η οποία λειτουργεί σαν κόλλα μεταξύ σύνθετου και μετάλλου. Στη συνέχεια απλώθηκε μία στρώση υφάσματος η οποία διαβρέχτηκε από τη ρητίνη με τη βοήθεια ειδικού ρολού. Με τη χρήση πινέλου απλώθηκε νέα στρώση ρητίνης και η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι να τοποθετηθούν όλες οι στρώσεις του υφάσματος. Τα δοκίμια αφέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 48 τουλάχιστον ώρες ώστε να πολυμεριστεί πλήρως η ρητίνη (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Επίστρωση των δοκιμίων με τη μέθοδο Hand Lay-Up.

Στη μέθοδο PP η επίστρωση έγινε όπως ακριβώς στη μέθοδο HLU χωρίς όμως την προσθήκη ρητίνης καθόσον είναι ήδη προεμποτισμένη (Σχήμα 2.9). Τα δοκίμια μετά την επίστρωση των επιθεμάτων τοποθετήθηκαν σε πυρίμαχο γυαλί και καλύφθηκαν κατά σειρά με ύφασμα αποκόλλησης, με διάτρητη μεμβράνη, με ύφασμα αναπνοής και τέλος με πλαστικό φιλμ κενού.

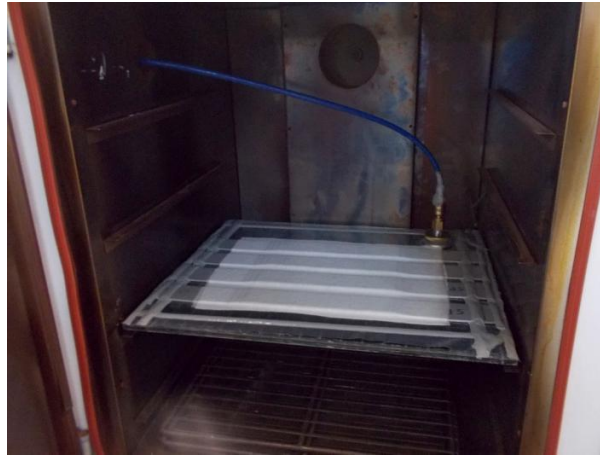


Σχήμα 2.9: Δοκίμια με τη μέθοδο Pre-Preg.

Το πολύστρωτο δεν αφέθηκε να πολυμεριστεί στο περιβάλλον αλλά καλύφθηκε αεροστεγώς και με τη χρήση αντλίας κενού αναρροφήθηκε ο αέρας και δημιουργήθηκε υποπίεση 0.6-0.7 bar ώστε να αυξηθεί η εξωτερική πίεση. Εν συνεχεία τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στον αυτοματοποιημένο κλίβανο του εργαστηρίου Thermawatt TG210 για 1 ώρα σε θερμοκρασία 120 °C με ρυθμό ανύψωσης 5 °C ανά 60 s, μέχρι τον πλήρη πολυμερισμό της ρητίνης σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή του Pre-Preg (Σχήμα 2.10).

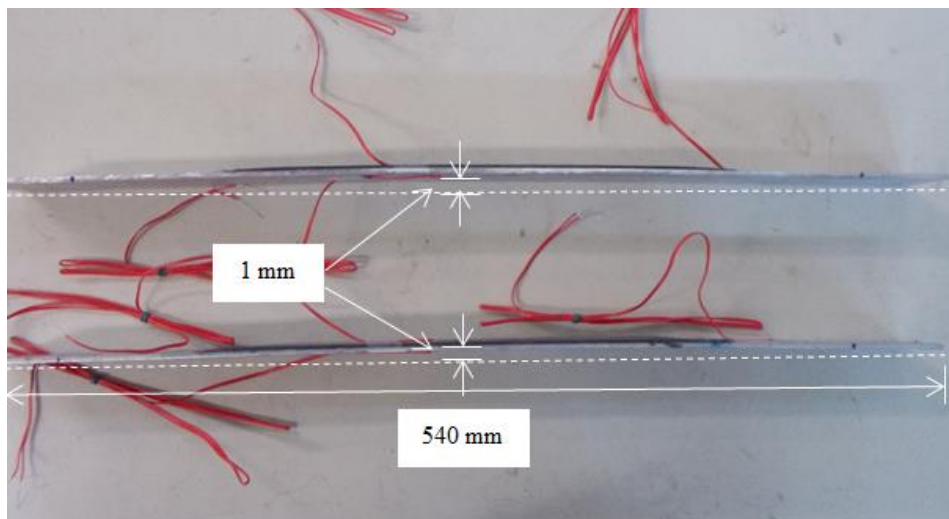
Και στις δυο μεθόδους κατασκευής, η πλευρά των δοκιμίων που δεν επιστρώθηκε και η επιφάνεια εργασίας επικαλύφθηκαν με ειδικό αποκολλητικό κερί ώστε να είναι εύκολος ο διαχωρισμός τους μετά τον πολυμερισμό της ρητίνης. Με το αποκολλητικό κερί και με την

τοποθέτηση ταινίας στεγανοποίησης (tacky tape) μέσα στις οπές των δοκιμίων τα μέταλλα προστατεύτηκαν από την περίσσεια ρητίνης.



Σχήμα 2.10: Δοκίμια με μέθοδο Pre-Preg στον φούρνο για πολυμερισμό της ρητίνης.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας και τον διαχωρισμό των δοκιμίων με επίθεμα Pre-Preg διαπιστώθηκε η ύπαρξη καμπυλότητας περίπου 1 mm στο μέσο των δοκιμίων, με τα κοίλα προς την πλευρά στη οποία δεν υπήρχε επίθεμα (Σχήμα 2.11). Η καμπυλότητα αυτή δημιουργήθηκε κατά την υποβολή των δοκιμίων στην θερμοκρασία των 120 °C στον κλίβανο και οφείλεται στους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ του αλουμινίου και του σύνθετου επιθέματος, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλών καμπτικών τάσεων με την υποβολή σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές.



Σχήμα 2.11: Διαπιστωθείσα καμπυλότητα σε όμοια δοκίμια με επίθεμα Pre-Preg από τις παράλληλες δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό.

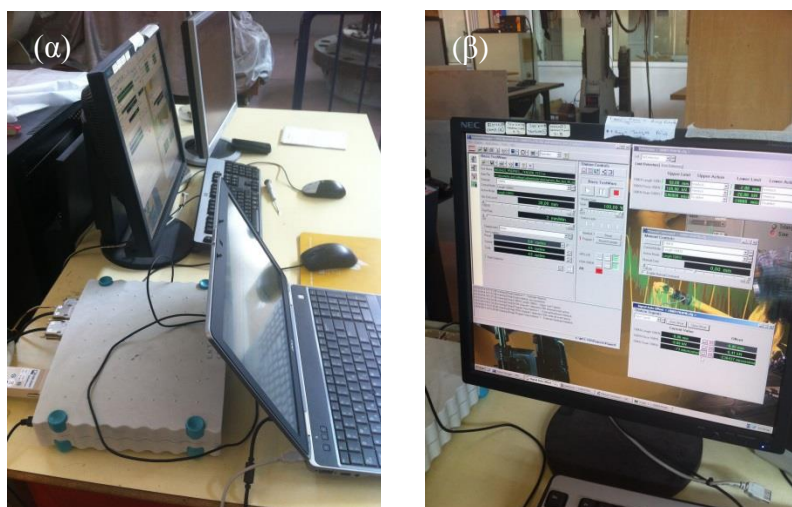
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Ο ειδικός σκοπός των πειραματικών δοκιμών που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσης μελέτης και του προβλήματος που διατυπώθηκε στο κεφάλαιο 2 είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς και της αποτελεσματικότητας σε κόπωση ρωγματωμένης αλουμινένιας πλάκας ενισχυμένης με σύνθετο επίθεμα με παραμέτρους την ύπαρξη του επιθέματος και την κατασκευαστική του μέθοδο.

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας με χρήση της υδραυλικής μηχανής MTS που είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002 [ISO 5893-2002]. Η λειτουργία της μηχανής εκτελείται αυτοματοποιημένα μέσω ψηφιακών ελεγκτών, ενώ μέσω λογισμικού πραγματοποιείται η ρύθμιση, η καταγραφή και η παρακολούθηση των μετρήσεων (Σχήμα 3.1).

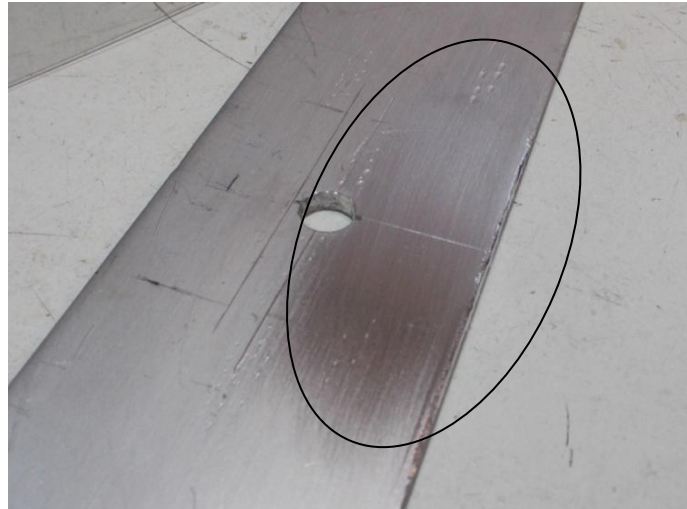


Σχήμα 3.1: (α) Εξοπλισμός και (β) λογισμικό παρακολούθησης και ελέγχου της υδρ. μηχανής MTS.

3.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Οι ακριβείς διαστάσεις των δοκιμών μετρήθηκαν με τη χρήση παχυμέτρου, ενώ οι μετρήσεις των οπών και αρχικών εγκοπών έγιναν στο στερεοσκόπιο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 2.2 και 2.3. Στα δοκίμια πριν την τοποθέτησή τους στην υδραυλική μηχανή ήταν απαραίτητο να γίνει λείανση της επιφάνειας στις θέσεις που θα τοποθετούνταν τα crack gages. Η λείανση έγινε με γυαλόχαρτο με αριθμό 340 από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) (Σχήμα 3.2). Μετά την λείανση της επιφάνειας ακολούθησε ο καθαρισμός της με ασετόν και τέλος κολλήθηκαν τα crack gages (Σχήμα 3.3).

Η κόλλα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η CC-33A κυανοακρυλική κόλλα στιγμής της KYOWA, κατάλληλη για crack cage και για να στεγνώσει απαιτήθηκαν 4 ώρες.



Σχήμα 3.2: Επιφάνεια μετά τη λείανση.



Σχήμα 3.3: Τοποθέτηση crackgagε μετά την λείανση της επιφάνειας.

3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.3.1 Προκαταρκτικοί υπολογισμοί

Αρχικά έγινε ένας προκαταρκτικός υπολογισμός για την επιλογή της επιβαλλόμενης τάσης στα άκρα των δοκιμίων και του αρχικού μήκους ρωγμής ώστε να οδηγηθούμε σε ρεαλιστικούς χρόνους διεξαγωγής των δοκιμών. Οι υπολογισμοί έγιναν για τιμές μέγιστης τάσης 30, 50, 80, 100, 120 MPa με $R=0.1$, για αρχικό μήκος ρωγμής $2a_0$ ίσο με 8, 10, 12, 15, 20, 25 mm και για τους συνδυασμούς αυτών. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να προβλεφθούν θεωρητικά οι κύκλοι αστοχίας των δοκιμίων χωρίς επίθεμα και στη συνέχεια των ενισχυμένων με σύνθετο επίθεμα δοκιμίων θεωρώντας μία αύξηση του χρόνου ζωής

τους με συντελεστή όχι μεγαλύτερο του 4, ώστε να γίνει ο προγραμματισμός των πειραμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία των δοκιμίων (Σχήμα 2.1) και το όριο διαρροής του αλουμινίου σ_0 , υπολογίστηκε αρχικά το κρίσιμο μήκος ρωγμής για αστοχία λόγω διαρροής για τα δοκίμια χωρίς επίθεμα $a_{cr \text{ διαρροής}}$ χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} \cdot 2b \cdot t &= \sigma_0 \cdot (2b - 2a_{cr \text{ διαρροής}}) \cdot t \Rightarrow \\ \Rightarrow a_{cr \text{ διαρροής}} &= b \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0}\right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

όπου:

2b είναι το πλάτος του ελάσματος

t είναι το πάχος του ελάσματος

σ_0 είναι το όριο διαρροής ίσο με 180 MPa από τη βιβλιογραφία για το Al 6061

Οι υπολογισμοί έγιναν για τιμές μέγιστης τάσης $\sigma_{\max}=30, 50, 80, 100$ και 120 MPa. Για τις ίδιες τιμές υπολογίστηκε και το κρίσιμο μήκος ρωγμής για ψαθυρή θραύση $a_{cr \text{ ψαθυρή}}$ χρησιμοποιώντας τη σχέση του συντελεστή έντασης τάσης για πλάκα πεπερασμένου πλάτους με κεντρική διαμερή ρωγή [Παπάζογλου-1995]:

$$K_I = \sigma_{\max} \cdot \sqrt{2b \cdot \tan \frac{\pi \cdot a_{cr \text{ ψαθυρή}}}{2b}} \quad (3.2)$$

Η τιμή του συντελεστή έντασης τάσης θεωρήθηκε ίση με $K_I=43 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ ύστερα από βιβλιογραφική επισκόπηση επιλέγοντας ως εγγύτερο στα χαρακτηριστικά του Al 1561 το Al 6061, ως αναφέραμε στο εδάφιο 2.3. Σε αυτό το σημείο υπολογίστηκε και η τιμή της κρίσιμης τάσης λυγισμού των δοκιμίων και βρέθηκε ίση με $\sigma_{cr \text{ λυγισμού}}= 10.08 \text{ MPa}$ από τη σχέση για αμφίπακτη δοκό [Τσουβάλης-1998]:

$$\sigma_{cr \text{ λυγισμού}} = \frac{4\pi^2 \cdot E_s \cdot I}{L^2 \cdot A} \quad (3.3)$$

όπου:

E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου

I είναι η ροπή αδράνειας της διατομής

L είναι το μήκος του δοκιμίου

A είναι η επιφάνεια της διατομής

Στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν θεωρητικά επιθυμητή η τιμή του λόγου τάσεων $R= -1$, που αντιστοιχεί σε μια τυπική εναλλασσόμενη φόρτιση της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου λόγω hogging και sagging, αλλά πρακτικά δεν ήταν εφαρμόσιμη. Καθώς η κρίσιμη τάση λυγισμού είναι πολύ μικρότερη των μέγιστων τάσεων που εξετάζονταν (30, 50, 80, 100

ή 120 MPa), ο λόγος των τάσεων που επιλέχθηκε τελικά ήταν $R=0.1$. Αποφεύχθηκε έτσι η επιβολή θλιπτικού φορτίου κατά την εναλλασσόμενη φόρτιση το οποίο θα οδηγούσε σε λυγισμό των δοκιμίων. Το εύρος της τάσης και του συντελεστή έντασης τάσης υπολογίστηκαν για τις διάφορες περιπτώσεις με τις εξισώσεις 3.4 και 3.5, αντίστοιχα:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (3.4)$$

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot \sqrt{2b \cdot \tan \frac{\pi \cdot a}{2b}} \quad (3.5)$$

όπου:

$\Delta\sigma$ είναι το εύρος της τάσης

ΔK είναι το εύρος του συντελεστή έντασης τάσης

$2b$ είναι το πλάτος του δοκιμίου

Από τη σχέση του Paris (Σχέση 3.6) που δίνει θεωρητικά την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής σε εναλλασσόμενο φορτίο υπολογίστηκαν οι κύκλοι που χρειάζονταν από το αρχικό μήκος ρωγμής a_0 μέχρι το κρίσιμο μήκος διαρροής a_{cr} διαρροής. Από παρόμοια πειράματα της βιβλιογραφίας θεωρήθηκε ότι η ρωγμή ξεκινάει να διαδίδεται μετά τους πρώτους 30000 κύκλους της φόρτισης:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (3.6)$$

όπου:

da/dN είναι η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής, σε mm/cycle

ΔK είναι το εύρος του συντελεστή έντασης τάσης, σε $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ και

C και m είναι σταθερές του υλικού καθοριζόμενες εμπειρικά

Οι τιμές των σταθερών C και m ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία για το αλουμίνιο AL 6061 σε όμοια φόρτιση και είναι ίσες με: $C=3.8 \cdot 10^{-8}$ και $m=3.18$ για da/dN σε mm/cycle και ΔK σε $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω υπολογισμών, για μέγιστη τάση $\sigma_{\max}=30, 50, 80, 100$ και 120 MPa με συχνότητα εναλλασσόμενης φόρτισης 2 Hz και λόγο $R=0.1$ καθώς και οι κύκλοι ως την αστοχία των δοκιμίων με τον απαιτούμενο χρόνο φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα προκαταρκτικών υπολογισμών για δοκίμια χωρίς επίθεμα.

σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	$\Delta\sigma$	a_{cr} διαρροής (mm)	a_{cr} ψαθυρή (mm)	a_0 (mm)	da (mm)	# N Αστοχίας	Χρόνος Δοκιμών (Hrs)
30	3	27	20.85	24.63	4	16.85	2622600	364.25
					10	10.85	691840	96.09
					12.5	8.35	384720	53.43
50	5	45	18.05	23.95	4	14.05	527570	73.27
					10	8.05	129870	18.04
					12.5	5.55	67082	9.32
100	10	90	11.11	20.81	4	7.11	53314	7.40
					5	6.11	38806	5.39
					7.5	3.61	16447	2.28
120	12	108	8.33	19.10	4	4.33	24766	3.44
					5	3.33	16136	2.24
					6	2.33	9798.8	1.36
80	8	72	13.89	22.28	5	8.89	88500	12.29

Τελικά επιλέχτηκε ο συνδυασμός της μέγιστης τάσης στα άκρα του δοκιμίου $\sigma_{\max}=80$ MPa με αρχικό μήκος ρωγμής $2a_0=10$ mm ($a_0=5$ mm), ο οποίος κατέληγε σε ένα λογικό αριθμό κύκλων αστοχίας για τα δοκίμια χωρίς επίθεμα. Επιλέγοντας την επιβολή φόρτισης με συχνότητα 2 Hz, οι 88500 κύκλοι που υπολογίστηκαν μεταφράζονται σε περίπου 12 ώρες μέχρι την αστοχία των δοκιμίων χωρίς επίθεμα. Θεωρώντας μία αύξηση του χρόνου ζωής των δοκιμίων με επίθεμα της τάξης του 4, οδηγούμαστε σε φορτίσεις μέχρι την αστοχία διάρκειας το πολύ 40 ωρών. Οι χρόνοι αυτοί ήταν ιδανικοί για τον προγραμματισμό των δοκιμών σε αντίθεση με τους υπόλοιπους συνδυασμούς που οδηγούσαν σε πολύ μεγάλους ή πολύ μικρούς χρόνους δοκιμών.

3.3.2 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις

Οι πειραματικές δοκιμές όπως αναφέρθηκε πραγματοποιήθηκαν με χρήση της μηχανής MTS. Οι αρπάγες της μηχανής για την συγκράτηση των δοκιμίων είναι υδραυλικές. Σε κάθε δοκίμιο επιβάλλεται εναλλασσόμενη τάση ημιτονοειδούς μορφής που επιλέχτηκε με μέγιστη τιμή $\sigma_{\max}=80$ MPa και λόγο τάσεων $R=0.1$, ήτοι κυμαινόμενη μεταξύ των τιμών +80 και +8 MPa ($\Delta\sigma=72$ MPa). Η ομοιόμορφη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο από την υδραυλική μηχανή μακριά από το επίθεμα για την ανάπτυξη της τάσης σε αυτές τις τιμές, αντιστοιχεί σε +10 και +1 KN και διαφέρει ελάχιστα, ανάλογα με τις ακριβείς διαστάσεις της ενεργού επιφάνειας του δοκιμίου. Η απόκλιση που παρουσιάζουν οι τιμές της επιβαλλόμενης τάσης σε κάθε δοκίμιο λόγω των διαφορών στο πλάτος και το πάχος τους δεν ξεπερνάει το 1%, πλην του δοκιμίου DP-1 που εκ παραδρομής ανέρχεται σε 5% (Πίνακας 3.2). Η φόρτιση επιβάλλεται αρχικά με συχνότητα ίση με 2 Hz. Η τιμή αυτή επελέγη ως συμβιβασμός μεταξύ των πολύ χαμηλών τιμών της συχνότητας που συναντώνται στην πράξη λόγω της κίνησης του πλοίου σε κυματισμούς (περίπου 0.1 Hz) και μιας τιμής που θα είχε ως αποτέλεσμα

ρεαλιστικούς χρόνους διεξαγωγής των δοκιμών. Η δοκιμή τελειώνει όταν αστοχεί το δοκίμιο. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται ένα δοκίμιο τοποθετημένο στην υδραυλική μηχανή MTS κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής κόπωσης.

Πίνακας 3.2: Επιβαλλόμενη ομοιόμορφη τάση στα άκρα των δοκιμίων.

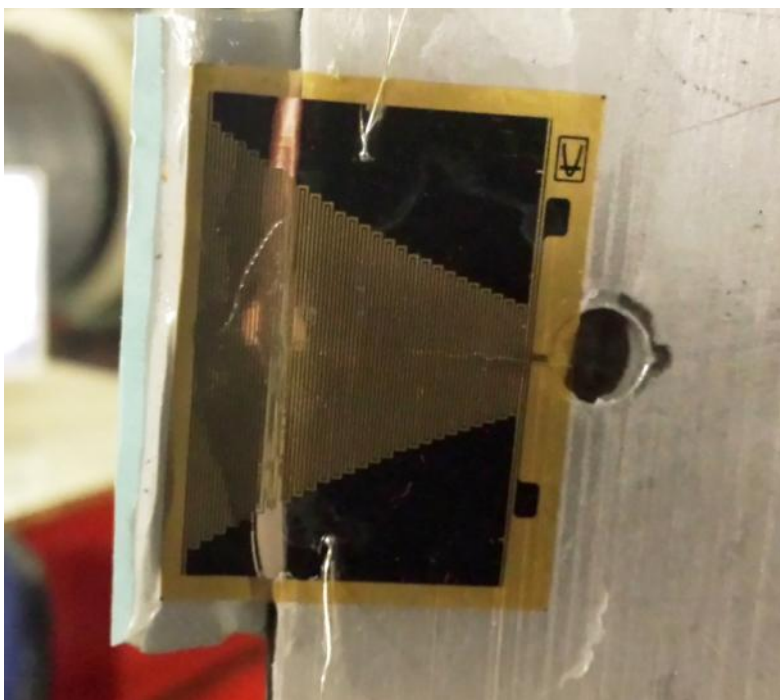
Δοκίμιο	Πάχος t_s (mm)	Πλάτος $W_s=W_p$ (mm)	Αρχικό Μήκος Ρωγμής $2a$ (mm)	Ομοιόμορφη Επιβαλ. τάση ($\Delta\sigma=72$) (MPa)		Διαφορά επιβαλ. τάσης από σ_{max} (%)
				σ_{max}	σ_{min}	
DR-1	3.29	50.07	10.50	80	8.0	0 %
DR-2	3.15	49.87	10.67	80	8.0	0 %
DH-1	3.15	50.32	10.72	79	7.9	-1 %
DH-2	3.17	50.15	10.31	80	8.0	0 %
DP-1	3.29	50.01	10.81	76	7.6	-5 %
DP-2	3.07	51.16	10.90	79	7.9	-1 %



Σχήμα 3.4: Δοκίμιο αναφοράς τοποθετημένο στην υδραυλική μηχανή MTS.

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν λαμβάνονταν μετρήσεις για τον αριθμό των εναλλαγών του φορτίου μέχρι την αστοχία συναρτήσει του χρόνου. Για την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων της ίδιας της υδραυλικής μηχανής δοκιμών.

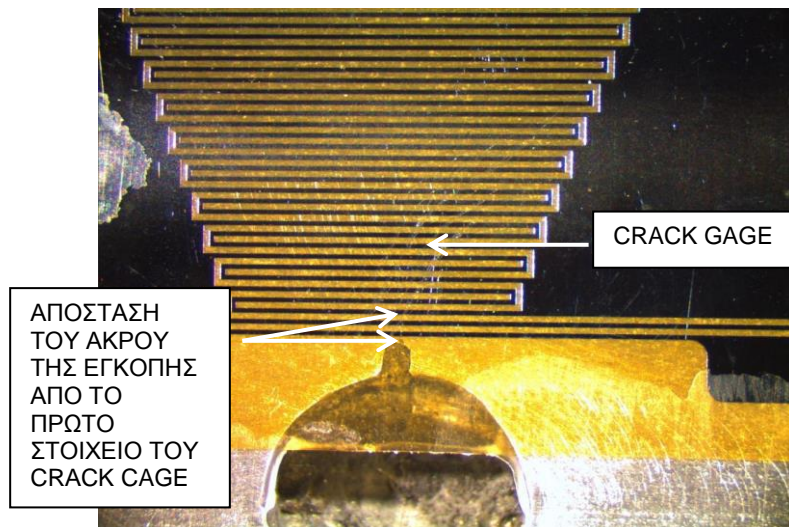
Σε κάθε δοκίμιο έγινε επιπλέον μέτρηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής με τη χρήση ειδικών αισθητήρων τύπου επιμηκυνσιομέτρου, τα crack gages. Η τοποθέτηση των crack gages και η προετοιμασία της επιφάνειας των μεταλλικών δοκιμίων περιγράφηκε αναλυτικά στην προηγούμενη παράγραφο 3.2. Ο τύπος των crack gages που χρησιμοποιήθηκε είναι το KV-25B της KYOWA με ωφέλιμο μήκος μέτρησης ίσο με 25.2 mm και ισαπόσταση μεταξύ των στοιχείων του πλέγματός του 1mm. Με τη διάδοση της ρωγμής στο μέταλλο τα στοιχεία του πλέγματος του crack gage θραύονται διαδοχικά το ένα μετά το άλλο (Σχήμα 3.5). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της συνολικής αντίστασης του αισθητήρα και συνεπώς και της τιμής της τάσης στα άκρα του gage. Αυτή η μεταβολή της τάσης καταγράφεται συναρτήσει του χρόνου από ένα εξωτερικό σύστημα, το Spider-8 της εταιρείας HBM.



Σχήμα 3.5: Διάδοση της ρωγμής στο δοκίμιο και θραύση των στοιχείων πλέγματος του crack gage. .

Οι μετρήσεις δεν ήταν συνεχείς αλλά γίνονταν αρχικά κάθε 20 sec (40 cycles για συχνότητα φόρτισης 2 Hz και 100 cycles για 5 Hz) για να περιοριστεί ο όγκος των μετρήσεων, διατηρώντας παράλληλα αρκετά καλή ακρίβεια. Με κατάλληλη βαθμονόμηση του συστήματος επιτυγχάνεται η μέτρηση της θέσης του άκρου της ρωγμής συναρτήσει του χρόνου και άρα μετράται η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής. Με τον τρόπο αυτόν κατασκευάζεται διάγραμμα μήκους ρωγμής συναρτήσει των κύκλων φόρτισης (a-N). Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η ακριβής αρχική μέτρηση της απόστασης του άκρου της ρωγμής από το crack gage, ώστε να γνωρίζουμε σε τί μήκος ρωγμής αντιστοιχούν

οι διαφορές της τάσης που καταγράφονται (Σχήμα 3.6). Η μέτρηση αυτή έγινε για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά με τη βοήθεια οπτικού στερεοσκοπίου τύπου LEICA MZ6 μέγιστης μεγέθυνσης 64x και κατάλληλου λογισμικού ανάλυσης εικόνας (Σχήμα 3.7).



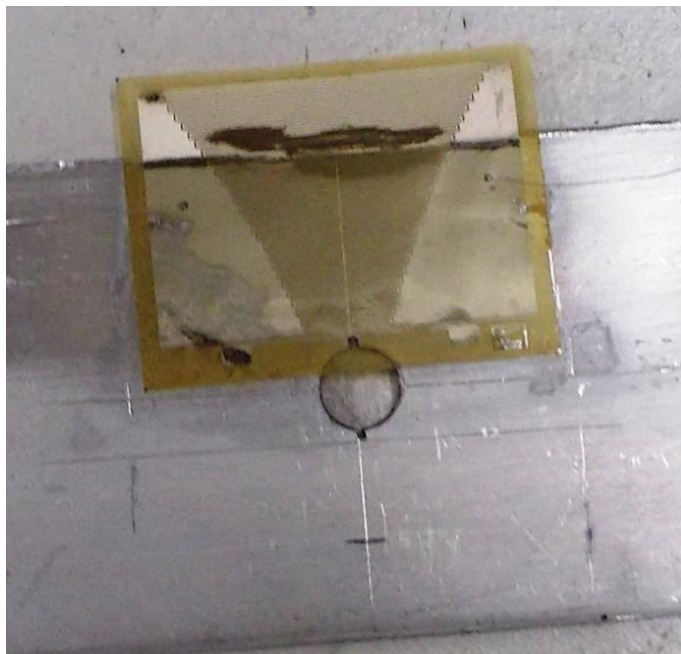
Σχήμα 3.6: Εικόνα από το οπτικό στερεοσκόπιο για τη μέτρηση της απόστασης του άκρου της εγκοπής από το πρώτο στοιχείο του crack gage στο δοκίμιο DP-2.



Σχήμα 3.7: Μέτρηση δοκιμίου με το στερεοσκόπιο LEICA MZ6.

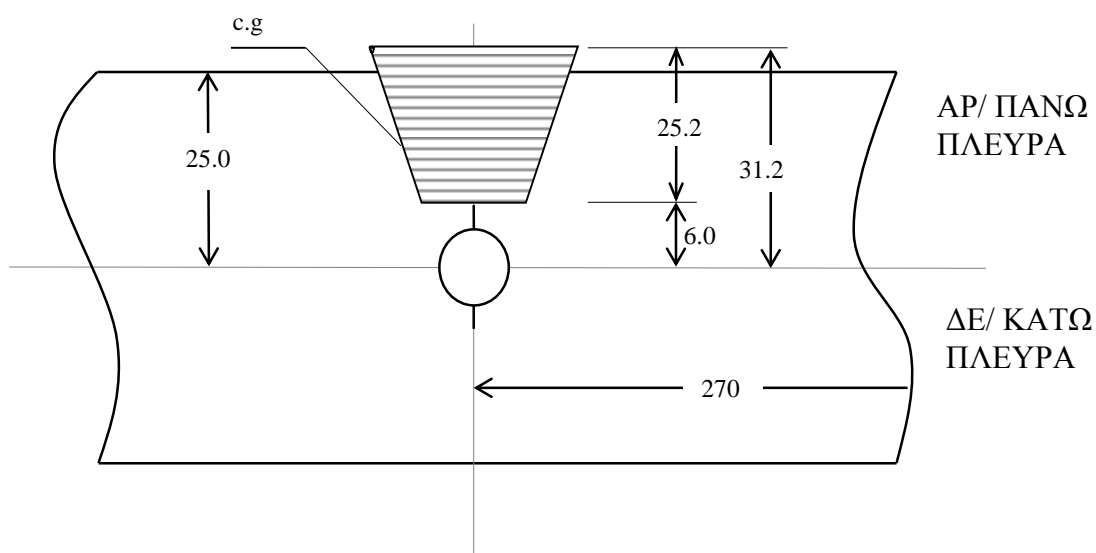
Τα crack gages τοποθετήθηκαν κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής στο ένα άκρο της και σε απόσταση από την αρχική εγκοπή που διέφερε σε κάθε δοκίμιο. Επειδή δεν ήταν εφικτή η τοποθέτηση crack gage και στις δύο πλευρές της διάδοσης της ρωγμής, επικολλήθηκε ένα crack gage μόνο σε κάθε δοκίμιο, στην πλευρά όπου η απόσταση της εγκοπής από την άκρη του δοκιμίου μετρήθηκε με το στερεοσκόπιο ως μικρότερη, οπότε η ρωγμή αναμένεται να διαδοθεί αρχικά από αυτή την πλευρά, έτσι ώστε να ελεγχθεί η

διάδοσή της στο σύνολο των κύκλων φόρτισης του δοκιμίου, από τους πρώτους κύκλους έως την αστοχία (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Τοποθέτηση του crack gage στη μια πλευρά ενός δοκιμίου

Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται η θέση και οι διαστάσεις του CG που χρησιμοποιήθηκε. Όπως φαίνεται το CG κάλυπτε όλο το τμήμα της πλευράς του δοκιμίου που τοποθετήθηκε. Αυτό έγινε για να μετρήσουμε όλο το διάγραμμα διάδοσης της ρωγμής $a-N$ και επομένως να έχουμε καλύτερη άποψη για τη συμπεριφορά του δοκιμίου.



Σχήμα 3.9 : Θέση του crack gage στο δοκίμιο DR-1.

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι μετρήσεις που έγιναν σε κάθε δοκίμιο. Στη μέτρηση του μήκους της ρωγμής με crack gage του δοκιμίου DR-1 σημειώνεται ότι η καταγραφή των δεδομένων από το crack cage διακόπηκε λίγο πριν την αστοχία του δοκιμίου λόγω ακούσιας αυτόματης επανεκκίνησης του Η/Υ καταγραφής του spider-8.

Πίνακας 3.3: Μετρήσεις που έγιναν στα δοκίμια.

Δοκίμιο	Μέτρηση κύκλων αστοχίας	Μέτρηση ρωγμής με c.g.	Πλευρά εφαρμογής c.g.	Απόσταση c.g. από crack tip (mm)
DR-1	Ναι	Ναι *	ΑΡ/ ΠΑΝΩ	0.523
DR-2	Ναι	Ναι	ΔΕ/ΚΑΤΩ	0.667
DH-1	Ναι	Ναι	ΑΡ/ΠΑΝΩ	0.860
DH-2	Ναι	Ναι	ΑΡ/ΠΑΝΩ	0.797
DP-1	Ναι	Ναι	ΔΕ/ΚΑΤΩ	0.512
DP-2	Ναι	Ναι	ΑΡ/ΠΑΝΩ	0.829

(*) Η καταγραφή των δεδομένων από το crack cage στο Spider-8 διακόπηκε πριν την αστοχία του δοκιμίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

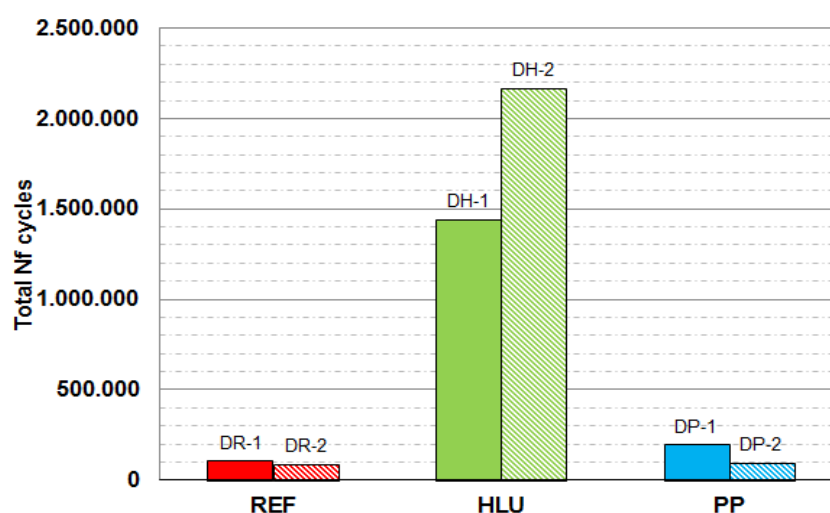
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ

Όλες οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται ο αριθμός των κύκλων από την έναρξη της φόρτισης μέχρι την αστοχία λόγω θραύσης για όλα τα δοκίμια και η διαφορά των κύκλων αστοχίας μεταξύ των όμοιων δοκιμίων (η διαφορά του δεύτερου κατά σειρά δοκιμίου κάθε ζεύγους ως προς το πρώτο). Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1 απεικονίζονται γραφικά για ευκολότερη σύγκριση στο Σχήμα 4.1.

Πίνακας 4.1: Αριθμός κύκλων μέχρι την αστοχία των δοκιμίων και σύγκριση χρόνου ζωής.

Δοκίμιο	# Κύκλων αστοχίας	Διαφορά κύκλων ζεύγους	Διαφορά κύκλων ζεύγους (%)	Αύξηση χρόνου ζωής από μ.ο. δοκιμίων αναφοράς
DR-1	109330	15955	-14.59	-
DR-2	93375			-
DH-1	1449226	724432	49.98	14.29
DH-2	2173658			21.44
DP-1	204582	103536	-50.60	2.01
DP-2	101046			1.00



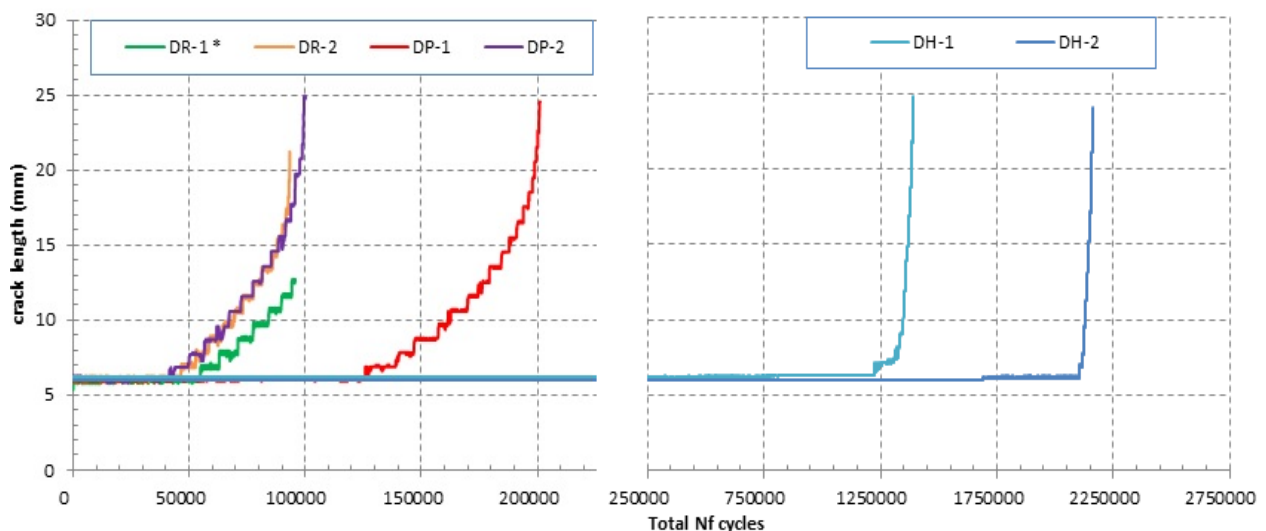
Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση αριθμού κύκλων μέχρι την αστοχία των δοκιμίων.

Από τη μελέτη του Πίνακα 4.1 διαπιστώνουμε ότι η διάρκεια ζωής των ομοίων δοκιμών διαφέρει. Στο ζεύγος των δοκιμών αναφοράς DR-1 και DR-2 η διαφορά αυτή είναι 14.59%, ενώ στα ζεύγη δοκιμών με σύνθετο επίθεμα τόσο με HLU όσο και PP, η διαφορά αυτή αυξάνει σημαντικά και είναι 50% περίπου και στα δύο. Η διαφορετική λοιπόν συμπεριφορά στην αντοχή σε κόπωση των ομοίων δοκιμών, ιδιαίτερα των δοκιμών με σύνθετο επίθεμα, απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση και θα αναλυθεί παρακάτω.

Από τον ανωτέρω πίνακα διαπιστώνουμε επίσης ότι η αντοχή των δοκιμών σε κόπωση διαφέρει σημαντικά όχι μόνο μεταξύ των ομοίων δοκιμών αλλά και για κάθε τρόπο κατασκευής του επιθέματος. Η προσθήκη επιθέματος με HLU αύξησε την ζωή του ελάσματος κατά ένα μέσο συντελεστή 17.87 φορές σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Η αύξηση αυτή είχε μια μεγάλη διακύμανση μεταξύ των ομοίων δοκιμών HLU (14.29 και 21.44 αντίστοιχα), ήταν όμως σε κάθε περίπτωση εντυπωσιακή. Αντίθετα στα δοκίμια με PP αύξηση στους κύκλους μέχρι την θραύση διαπιστώθηκε μόνο στο δοκίμιο DP-1 (κατά 2 φορές), η οποία όμως ήταν αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη των δοκιμών με HLU, ενώ στο δοκίμιο DP-2 δεν διαπιστώθηκε καμία διαφοροποίηση σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς επίθεμα. Σε κάθε περίπτωση τόσο η μεγάλη αύξηση του χρόνου ζωής που διαπιστώθηκε στα δοκίμια με επίθεμα HLU όσο και η ελάχιστη συμμετοχή στην ενίσχυση των ελασμάτων από την τοποθέτηση επιθέματος PP, απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση και θα αναλυθούν ακολούθως.

4.2 ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 σε κάθε δοκίμιο έγινε επιπλέον και μέτρηση με crack cage του μήκους της ρωγμής καθ' όλη την διάρκεια των δοκιμών, από την έναρξη της φόρτισης μέχρι την θραύση του δοκιμίου. Οι καμπύλες που ελήφθησαν σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δοκίμια στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα μήκους ρωγμής-αριθμού κύκλων για όλα τα δοκίμια.

(*) Το δοκίμιο DR-1 λόγω ακούσιας επανεκκίνησης του H/Y spider-8 σταμάτησε την εγγραφή δεδομένων από το CG στους 95735 κύκλους.

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 4.2 η ρωγμή δεν αρχίζει να διαδίδεται αμέσως, αλλά μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό εναλλαγών ο οποίος δεν είναι σταθερός, αλλά διαφέρει σε κάθε δοκίμιο. Στα δοκίμια αναφοράς η διάδοση της ρωγμής παρατηρούμε ότι ξεκινάει στις 46000 εναλλαγές περίπου για το DR-1 και λίγο αργότερα στις 55000 περίπου στο DR-2. Στο δοκίμιο με επίθεμα DP-2 η ρωγμή ξεκινάει νωρίτερα, στις 43.000 περίπου εναλλαγές ενώ για το έτερο δοκίμιο του ζεύγους το DP-1 η ρωγμή ξεκινά αρκετά μετά, στους 125000 κύκλους περίπου. Τέλος για τα δοκίμια με επίθεμα HLU η ρωγμή καθυστερεί πάρα πολύ και αρχίζει να διαδίδεται στους 1.3 εκατ. και 2.1 εκατ. κύκλους αντίστοιχα.

Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι ο συνολικός αριθμός των κύκλων για θραύση κάθε δοκιμίου του Σχήματος 4.1, περιλαμβάνει τους κύκλους για την έναρξη της ρωγμής που είναι για κάθε δοκίμιο διαφορετικοί. Πιο αναλυτικά, στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται το σημείο από το οποίο ξεκίνησε η διάδοση της ρωγμής σε κάθε δοκίμιο και οι αντίστοιχοι κύκλοι, όπως ελήφθησαν από τα crack gages. Σημειώνεται ότι στο δοκίμιο DH-1 όπως διακρίνεται στο Σχήμα 4.2, η ρωγμή παρουσίασε ελάχιστη μεταβολή τους πρώτους 80.000 περίπου κύκλους της διάδοσής της, η οποία δεν ελήφθη υπόψη καθώς άρχισε να διαδίδεται ουσιαστικά από τα 7.37 mm.

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας έναρξης διάδοσης της ρωγμής.

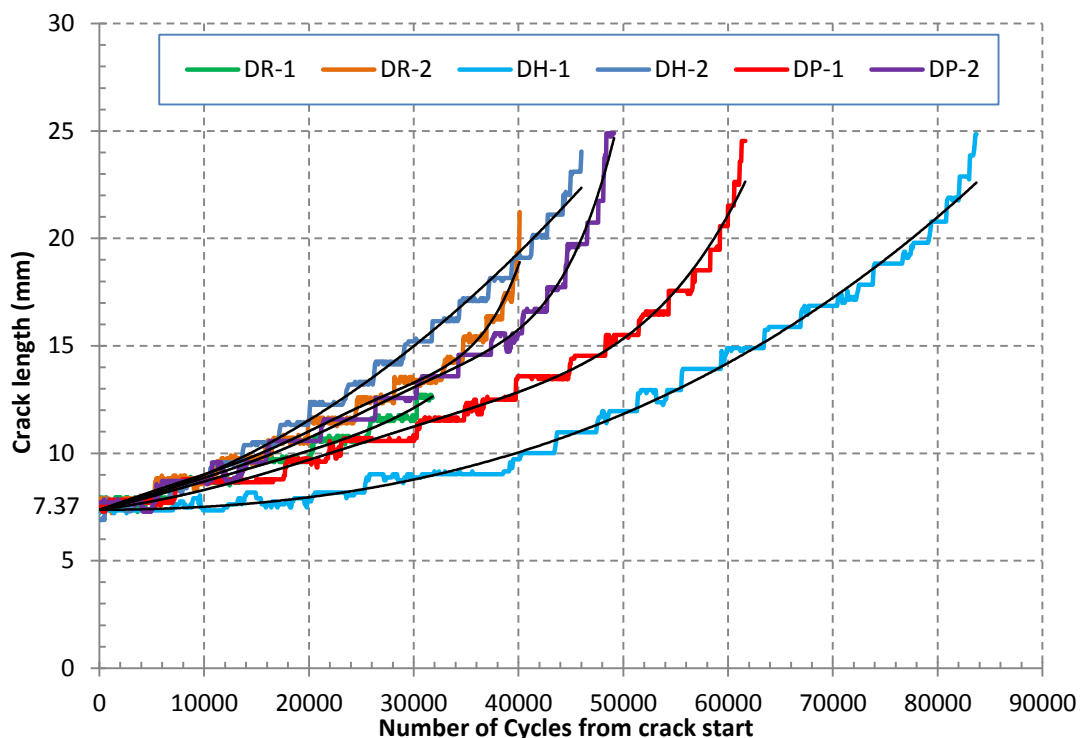
Δοκίμιο	Έναρξη ρωγμής (mm)	# κύκλων έναρξης ρωγμής	Διαφορά κύκλων έναρξης ρωγμής μεταξύ ομοίων δοκιμίων	Αύξηση κύκλων έναρξης ρωγμής από μ.ο. δοκιμίων αναφοράς
DR-1	6.79	54848		-
DR-2	7.10	46486	8362	-
DH-1	7.37	1305427		25.76
DH-2	6.69	2107468	802041	41.59
DP-1	6.44	125901		2.48
DP-2	6.84	43327	82574	0.85

Όπως παρατηρούμε η τοποθέτηση του επιθέματος στα δοκίμια με επίθεμα HLU είχε αποτέλεσμα την μεγάλη καθυστέρηση στην έναρξη της ρωγμής, κατά ένα συντελεστή 25.76 για το δοκίμιο DH-1 και 41.59 για το DH-2 αντίστοιχα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα ενισχυμένα δοκίμια με επίθεμα HLU να καταλήγουν εκ των πραγμάτων σε πολύ μεγαλύτερο αριθμό εναλλαγών μέχρι την αστοχία, ανεξάρτητα από την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής. Αντίθετα στα δοκίμια με επίθεμα Pprep-Preg η τοποθέτηση του επιθέματος είχε θετική επίδραση στην έναρξη της ρωγμής μόνο στο δοκίμιο DP-1 κατά ένα συντελεστή 2.48, ενώ αντίθετως στο άλλο δοκίμιο του ζεύγους το DP-2, η ρωγμή ξεκίνησε την διάδοσή της νωρίτερα από τα δοκίμια αναφοράς.

Καταλήγουμε συνεπώς στο συμπέρασμα ότι η σύγκριση για την εκτίμηση της δράσης του επιθέματος, που είναι και το αντικείμενο της παρούσης μελέτης, είναι προτιμότερο να γίνει από την έναρξη διάδοσης της ρωγμής και όχι από την έναρξη της φόρτισης, αφού

περιλαμβάνει και το χρονικό διάστημα για την έναρξη διάδοσης της ρωγμής, που είναι όπως διαπιστώσαμε μια παράμετρος μεταβλητή και εν πολλοίς άγνωστη.

Για την ευκολότερη εποπτεία και ανάλυση των στοιχείων του Πίνακα 4.3 και του Σχήματος 4.2, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται γραφικά όπως ελήφθησαν από τα crack gages οι καμπύλες των δοκιμίων αναφοράς και αυτές των δοκιμίων με σύνθετο επίθεμα, από τα 7.37 mm της ρωγμής μέχρι την θραύση που ήταν όπως αναφέραμε το μεγαλύτερο μήκος έναρξης διάδοσης της ρωγμής μεταξύ των δοκιμίων, το οποίο μετρήθηκε στο δοκίμιο DH-1. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερα η σύγκριση της επίδρασης του επιθέματος και των λοιπών παραγόντων στην διάδοση της ρωγμής, αφού δεν εξετάζεται το διάστημα που απαιτείται μέχρι την έναρξη της. Στις τιμές που ελήφθησαν από τα crack cage των 25 mm που περιγράφονται στην παράγραφο 3.3.2, έγινε προσέγγιση κάθε καμπύλης με πολυώνυμα βέλτιστου βαθμού (3^{ου} έως 6^{ου} βαθμού αντίστοιχα) και απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3 ως μαύρη λεπτή γραμμή τάσης, ώστε να είναι συνεχής και πιο ολοκληρωμένη η διάδοση της ρωγμής μεταξύ των γραμμών πλέγματος (grid lines) του crack gage, καθόσον το βήμα (step) του crack cage ήταν 1 mm και παρουσίαζε μεγάλο “σκαλοπάτι” στη διάδοση της ρωγμής, το οποίο δεν βοηθούσε στην ακρίβεια της ανάλυσης.

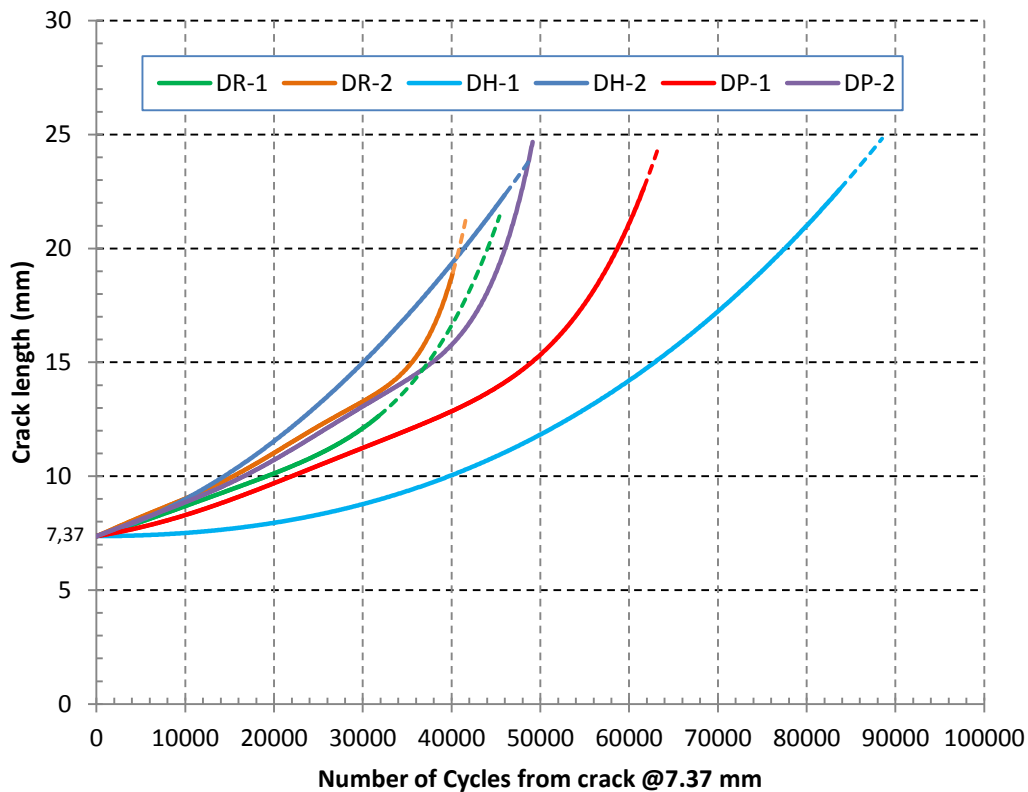


Σχήμα 4.3: Διάδοση της ρωγμής- Μήκος και αριθμός κύκλων από τα 7.37 mm μέχρι την θραύση.

Μια χρήσιμη παρατήρηση στο Σχήμα 4.3 είναι ότι στην καμπύλη $a-N$ του δοκιμίου αναφοράς DR-2 όπου επιτεύχθηκε ολοκληρωμένη μέτρηση, παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής μετά τα 14 mm περίπου. Σύμφωνα με τη εξ.(3.5) της παραγράφου 3.3.1, όσο αυξάνει το μήκος της ρωγμής μεγαλώνει το εύρος του συντελεστή έντασης τάσης ΔK , άρα και η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής σύμφωνα με την εξ.(3.6). Όταν όμως το μήκος ρωγμής φτάσει το κρίσιμο μήκος για αστοχία λόγω διαρροής που

υπολογίστηκε στα 13.89 mm στους 88500 κύκλους περίπου (Πίνακας 3.1), ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής αυξάνει, καθώς η απομένουσα διατομή εισέρχεται όλη στην πλαστικότητα και παύουν να ισχύουν οι προηγούμενες σχέσεις. Αντίστοιχα στα δοκίμια με επίθεμα PP από το Σχήμα 4.3 φαίνεται ότι η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής αυξάνει όταν η ρωγμή φτάσει λίγο περισσότερο, δηλαδή στα 16 με 17 mm. Στα δοκίμια με επίθεμα HLU το σημείο αυτό φαίνεται ότι είναι πολύ αργότερα μετά τα 20 mm. Γενικά διαπιστώνουμε ότι όλα τα ζεύγη των δοκιμίων παρουσιάζουν σχετικά το ίδιο κρίσιμο μήκος για θραύση λόγω διαρροής, διαφέρουν όμως στην ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής.

Στο Σχήμα 4.4 που ακολουθεί απεικονίζονται για σύγκριση μόνο οι ανωτέρω καμπύλες διάδοσης της ρωγμής κάθε δοκιμίου από τα 7.37 mm της ρωγμής και μετά. Καθώς οι εν λόγω πολυωνυμικές προσεγγιστικές καμπύλες τάσης δεν εκτείνονταν μέχρι το σημείο αστοχίας των δοκιμίων, αυτές προεκτείνονται προσεγγιστικά μέχρι το σημείο αστοχίας και απεικονίζονται με διακεκομμένη γραμμή. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται καθαρά πού καταλήγει κάθε καμπύλη μέχρι τη θραύση του δοκιμίου και υπάρχει πληρέστερα εικόνα και καλύτερη σύγκριση της επίδρασης του επιθέματος στην διάδοση της ρωγμής.



Σχήμα 4.4: Πολυωνυμικές γραμμές τάσης μήκους ρωγμής-αριθμού κύκλων από την έναρξη της ρωγμής (7.37 mm) μέχρι την θραύση του δοκιμίου.

Στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά οι κύκλοι διάδοσης της ρωγμής σε κάθε δοκίμιο όπως ελήφθησαν από τα crack gages από το κοινό σημείο των 7.37 mm. Επιπλέον υπολογίστηκε και η αύξηση των εναλλαγών διάδοσης της ρωγμής σε κάθε δοκίμιο με επίθεμα σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.

Πίνακας 4.3: Πίνακας διάδοσης της ρωγμής από τα 7.37* mm μέχρι τη θραύση.

Δοκίμιο	# κύκλων διάδοσης ρωγμής από 7.37* mm μέχρι θραύση	Διαφορά κύκλων διάδοσης ρωγμής (από 7.37* mm μέχρι θραύση)	Αύξηση κύκλων διάδοσης της ρωγμής από μ.ο. δοκιμίων αναφοράς (%)	Αύξηση κύκλων διάδοσης της ρωγμής από μ.ο. δοκιμίων αναφοράς
DR-1	45400		-	-
DR-2	40120	5280	-	-
DH-1	83700		95.74	1.96
DH-2	46000	37700	0.08	1.08
DP-1	61640		44.15	1.44
DP-2	49120	12520	14.87	1.15

(*) 7.37 mm ήταν το μεγαλύτερο μήκος έναρξης διάδοσης της ρωγμής, το οποίο μετρήθηκε στο δοκίμιο DH-1 και επιλέχθηκε ως το κοινό μήκος έναρξης σύγκρισης της διάδοσης της ρωγμής μεταξύ των δοκιμίων.

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 4.4 και στον Πίνακα 4.3, στα δοκίμια αναφοράς ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής έχει μικρή διαφορά, γεγονός που διαπιστώνεται και από την διαφορά των κύκλων διάδοσης της (5280 κύκλοι μόνο). Στα δοκίμια με επίθεμα HLU, στο DH-1 παρατηρούμε η αύξηση των κύκλων διάδοσης της ρωγμής ήταν η μεγαλύτερη των δοκιμίων, κατά 94.74% (ή 1.96 φορές) σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Αντίθετα στο έτερο δοκίμιο του ζεύγους το DH-2 η διάδοση της ρωγμής είχε 37700 κύκλους λιγότερους και γενικά δεν παρατηρήθηκε καμία αύξηση στους κύκλους διάδοσης της σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς επίθεμα (0.08%). Επιπλέον συγκρίνοντας στο Σχήμα 4.4 τις καμπύλες διάδοσης της ρωγμής των δοκιμίων με επίθεμα HLU, παρατηρούμε ότι γενικά έχουν την ίδια μορφή, με διαφορετικές ταχύτητες όμως. Πρέπει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο DH-1 που παρουσίασε την καλύτερη απόδοση στην διάδοση της ρωγμής, ξεκίνησε την διάδοση της ρωγμής 802041 κύκλους νωρίτερα από το DH-2.

Στα δοκίμια με επίθεμα Pre-Preg, στο DP-1 η αύξηση των κύκλων διάδοσης της ρωγμής ήταν 44.15% (1.44 φορές) σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς, ενώ στο έτερο δοκίμιο του ζεύγους το DP-2, η διάδοση της ρωγμής είναι σχεδόν ίδια με τα δοκίμια αναφοράς, δηλαδή η τοποθέτηση του επιθέματος δεν επιβράδυνε καθόλου την διάδοση της ρωγμής. Τα δύο δοκίμια παρουσίασαν επίσης μεγάλη διαφορά μεταξύ των στους κύκλους διάδοσης της ρωγμής (12520 κύκλους). Τέλος οι καμπύλες διάδοσης της ρωγμής των δοκιμίων με επίθεμα PP στο Σχήμα 4.4 παρατηρούμε ότι έχουν επίσης την ίδια μορφή, με διαφορετικές και σε αυτήν την περίπτωση ταχύτητες.

Η βέλτιστη συμπεριφορά στη διάδοση της ρωγμής επιδεικνύεται από το ζεύγος δοκιμίων DH-1 και DP-1, καθώς η τοποθέτηση του επιθέματος επιβράδυνε σημαντικά την διάδοση της ρωγμής του αλουμινένιου ελάσματος αυξάνοντας τους κύκλους διάδοσης κατά 95.74% και 44.15% αντίστοιχα σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Αντίθετα στα έτερα δοκίμια των ζευγών τα DH-2 και DP-2 η διάδοση της ρωγμής παρουσίασε ελάχιστη έως μηδενική επιβράδυνση αφού οι κύκλοι δεν αυξήθηκαν σχεδόν καθόλου (14.87% και 0.08% αντίστοιχα). Τελικά όπως παρατηρούμε, τα δοκίμια με επίθεμα δεν εμφανίζουν μεταξύ τους μία κοινή συμπεριφορά στην διάδοση της ρωγμής, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να

εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Ακολούθως θα γίνει μια αποτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων και θα αναλυθούν οι πιθανοί παράμετροι που μπορούν να δικαιολογήσουν τις αποκλίσεις που διαπιστώθηκαν τόσο μεταξύ των όμοιων δοκιμίων όσο και μεταξύ των διαφορετικών τρόπων κατασκευής του επιθέματος.

4.3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η συνολική αποτίμηση της συμπεριφοράς σε κόπωση των δοκιμίων με επίθεμα καταλήγει σε μερικά ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των ενισχυμένων δοκιμίων δείχνει ότι τη βέλτιστη συμπεριφορά επέδειξαν τα δοκίμια με επίθεμα από HLU, αυξάνοντας το χρόνο ζωής τους κατά ένα συντελεστή της τάξης του 17.87 σε σχέση με τα μη ενισχυμένα δοκίμια, παρά τον πολύ μικρό λόγο ακαμψίας τους. Τα δοκίμια HLU καθυστέρησαν επίσης την έναρξη της ρωγμής κατά 33.67 φορές, όμως δεν παρουσίασαν κοινή συμπεριφορά στην ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής καθώς στο δοκίμιο DH-2 δεν παρατηρήθηκε καμία διαφοροποίηση στην διάδοση της, ενώ στο DH-1 η ρωγμή διαδόθηκε κατά 95.74% περισσότερους κύκλους. Η τοποθέτηση επιθέματος Pre-Preg σε μία μόνο περίπτωση (DP-1) επέδειξε βελτίωση της συμπεριφοράς σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς διπλασιάζοντας τον χρόνο ζωής, αφού καθυστέρησε την έναρξη της ρωγμής κατά 2.48 φορές και επιβράδυνε την διάδοση της ρωγμής αυξάνοντας τις εναλλαγές διάδοσης κατά 44.15%. Αντίθετα στο έτερο δοκίμιο του ζεύγους με επίθεμα (DP-2) τα αποτελέσματα της επίδρασης του επιθέματος ήταν αρνητικά, τόσο στο συνολικό αριθμό κύκλων όσο και στην έναρξη της ρωγμής, ενώ στην διάδοση της ρωγμής οι κύκλοι αυξήθηκαν μόνο κατά 14.87 %.

Η αύξηση της συνολικής διάρκειας ζωής κατά ένα παράγοντα τόσο μεγάλο για τα δοκίμια με επίθεμα HLU (17.87) υπερβαίνει κατά πολύ τα αποτελέσματα άλλων πειραματικών δοκιμών τόσο με αλουμίνιο όσο και με χάλυβα, όπου ο αντίστοιχος συντελεστής βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5, αλλά για πολύ πιο ισχυρά ενισχυμένα δοκίμια με λόγο ακαμψίας $SR=1.0$ [Dalzel-Job-2003]. Η υπεροχή των δοκιμίων με επίθεμα HLU οφείλεται πιθανότατα στην επίτευξη ενός αποτελεσματικότερου δεσμού μεταξύ του επιθέματος και του αλουμινίου. Αντίθετα στα δοκίμια με επίθεμα Pre-Preg η μικρότερη ποσότητα ρητίνης που διαθέτουν εκτιμάται ότι οδήγησε σε ταχύτερη αποκόλληση του επιθέματος, στην οποία οφείλεται ο χαμηλός αριθμός των εναλλαγών που παρουσίασαν.

Επιπλέον η αυξημένη καμπυλότητα που διαπιστώθηκε στα δοκίμια με επίθεμα PP ως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλών παραμενουσών τάσεων μεταξύ του επιθέματος και του μετάλλου, οι οποίες οδήγησαν σε γρηγορότερη αστοχία του δεσμού επιθέματος-ελάσματος [Sun-1998]. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου προτείνονται διάφοροι τρόποι, όπως η επιλογή του τύπου επιθέματος/ ρητίνης ανάλογα με το υπό επισκευή υλικό, η μείωση της θερμοκρασίας ξήρανσης και η απομόνωση της περιοχής του μετάλλου που υποβάλλεται σε υψηλή θερμοκρασία [A.Baker-2002].

Όσον αφορά την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των όμοιων δοκιμίων, τα δοκίμια αναφοράς DR-1 και DR-2 εμφάνισαν μικρή απόκλιση μεταξύ τους, τόσο στον αριθμό των κύκλων θραύσης (15955 κύκλοι) όσο και στην έναρξη της ρωγμής (8362 κύκλοι) αλλά και την διάδοση της (5280 κύκλοι). Αντίθετα τα δοκίμια με επίθεμα HLU παρουσίασαν μεγάλες αποκλίσεις στον συνολικό αριθμό εναλλαγών μέχρι την θραύση (724432 κύκλοι), αλλά και

στην έναρξη της ρωγμής (802041 κύκλοι) και την διάδοσης της (37700 κύκλοι). Ομοίως και τα δοκίμια με επίθεμα Pre-Preg παρουσίασαν μεγάλες αποκλίσεις τόσο στον συνολικό αριθμό εναλλαγών μέχρι την θραύση (103536 κύκλοι), όσο και στην έναρξη της ρωγμής (82574 κύκλοι) και την μέση ταχύτητα διάδοσης της (12520 κύκλοι).

Μία παράμετρος που φαίνεται να ευθύνεται για τις αποκλίσεις αυτές μεταξύ των ομοίων δοκιμίων είναι το μήκος της αρχικής εγκοπής. Καθώς η οπή και οι αρχικές εγκοπές κατασκευάστηκαν με τη χρήση ηλεκτρικού τρυπανιού και μηχανικής σέγας χειρός αντίστοιχα, η ακρίβεια που επιτεύχθηκε δεν ήταν μεγάλη, με αποτέλεσμα το αρχικό μήκος οπής/ εγκοπής να μην είναι ίδιο σε όλα τα δοκίμια. Η χρήση κάποιας άλλης μεθόδου κοπής και δημιουργίας της αρχικής οπής/ εγκοπής όπως τόξο πλάσματος, water jet ή laser θα έδινε μεγαλύτερη ακρίβεια.

Το αρχικό μήκος οπής/ εγκοπής λοιπόν σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3, στα δοκίμια DR-1 και DR-2 διαφέρει κατά 1.60%, στα DH-1 και DH-2 διαφέρει κατά 3.82% και τέλος στα δοκίμια DP-1 και DP-2 η διαφορά είναι μόνο 0.83 %. Το διαφορετικό μήκος αρχικής οπής και εγκοπής μεταξύ των όμοιων δοκιμίων και ιδιαίτερα των δοκιμίων με επίθεμα HLU που ήταν μεγαλύτερη η διαφορά (3.82%), είναι μια παράμετρος που μπορεί να επηρέασε σε κάποιο βαθμό την μεγάλη διαφορά στις εναλλαγές που χρειάστηκε για να αρχίσει να διαδίδεται η ρωγμή (802041). Επιπλέον παρατηρούμε ότι στα δοκίμια DR-2, DH-1 και DP-2 η έναρξη της ρωγμής έγινε σε μικρότερο αριθμό εναλλαγών από τα ζευγάρια τους DR-1, DH-2 και DP-1. Το κοινό στοιχείο αυτών των δοκιμίων είναι ότι το αρχικό μήκος οπής/εγκοπής ήταν μεγαλύτερο σε αυτά τα δοκίμια σε σχέση με τα όμοιά τους. Άρα λοιπόν διαπιστώνουμε ότι το αρχικό μήκος της οπής/ εγκοπής είναι μια παράμετρος που επηρέασε την έναρξη της ρωγμής μεταξύ των ομοίων δοκιμίων και καθόρισε την σειρά θραύσης τους, καθόσον σε όποιο δοκίμιο ξεκινούσε πρώτα η ρωγμή, έσπαγε πρώτο, οδηγώντας τελικά σε όμοια δοκίμια (ιδιαίτερα στα ενισχυμένα με επιθέματα), να καταλήξουν σε πολύ διαφορετικό αριθμό κύκλων μέχρι την θραύση τους. Συνεπώς καταλήξαμε ότι η σύγκριση για την εκτίμηση της δράσης του επιθέματος, που είναι και το αντικείμενο της παρούσης μελέτης, είναι προτιμότερο να επικεντρωθεί από την έναρξη διάδοσης της ρωγμής και όχι από την έναρξη της φόρτισης, αφού η τελευταία περιλαμβάνει και το χρονικό διάστημα για την έναρξη διάδοσης της ρωγμής, που είναι όπως διαπιστώσαμε μια παράμετρος μεταβλητή και εν πολλοίς άγνωστη. Αντίστοιχα, με τη δημιουργία αρχικής ρωγμής (πλέον της εγκοπής) η ρωγμή θα άρχιζε να διαδίδεται αμέσως με την έναρξη των εναλλαγών του φορτίου και έτσι θα είχε εξαλειφθεί αυτή η μη σταθερή περίοδος.

Ένας άλλος παράγοντας που πιθανόν να συνετέλεσε επίσης στην διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ των ομοίων δοκιμίων είναι οι αποκλίσεις στην εναλλασσόμενη τάση φόρτισης. Η επιβαλλόμενη τάση στο δοκίμιο DH-1 (Πίνακας 3.3) ήταν λίγο μικρότερη από την προβλεπόμενη (-1%) και δεν δικαιολογεί από μόνη της την τόσο μεγάλη διαφορά στην αύξηση των εναλλαγών διάδοσης της ρωγμής σε σχέση με το έτερο δοκίμιο του ζεύγους το DH-2 (44.15%), αλλά και στην αντίστοιχη αύξηση σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς (95.74%). Η μεγαλύτερη διαφορά στην επιβαλλόμενη τάση παρατηρείται μεταξύ των δοκιμίων του ζεύγους των δοκιμίων με επίθεμα Pre-Preg τα DP-1 και DP-2 (-4%), η οποία πιθανόν να επηρέασε καθώς στο DP-1 παρατηρήθηκε αύξηση των κύκλων διάδοσης της

ρωγμής μόνο κατά 44.15% έναντι 14.87% στο DP-2. Το πάχος του σύνθετου επιθέματος μεταξύ των όμοιων δοκιμίων, που οδηγεί σε διαφορετικές περιεκτικότητες κατά βάρος σε ίνες άνθρακα και ρητίνης και επομένως σε διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες μπορεί επίσης να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Οι διαφορές όμως είναι 0.06 mm (3%) για τα ζεύγη HLU και 0.02 mm (0.9 %) για τα PP αντίστοιχα, αφενός πολύ μικρές ιδιαίτερα για τα δοκίμια με επίθεμα PP, αφετέρου δεν μπορούν να δικαιολογήσουν από μόνες τους, ειδικά για τα δοκίμια με PP, τόσο μεγάλες αποκλίσεις στην διάδοση της ρωγμής (37700 και 12520 κύκλοι αντίστοιχα), αλλά και τόσο μεγάλες διαφορές εναλλαγών για την έναρξη της ρωγμής (802041 και 82574 κύκλοι αντίστοιχα).

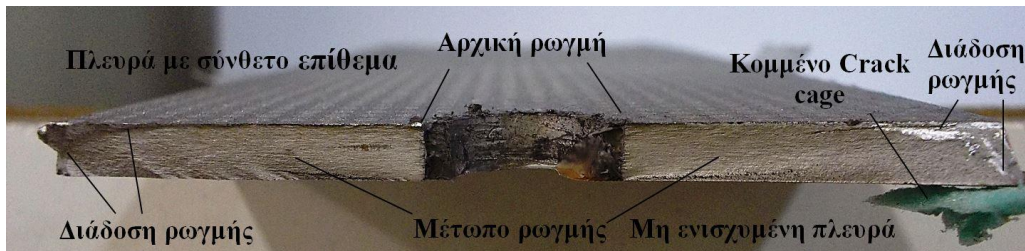
Οι διάφορες κοινές παράμετροι των δοκιμών όπως η προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμίων, η ευθυγράμμιση τους στις αρπάγες της μηχανής δοκιμών, κ.α. εξετάστηκαν και δεν μπορούν επίσης να δικαιολογήσουν τέτοιες αποκλίσεις μεταξύ των όμοιων δοκιμίων, καθώς δεν έχουν την ίδια επίδραση στα ζεύγη που τοποθετήθηκε επίθεμα. Όσον αφορά στην προετοιμασία της επιφάνειας που τοποθετήθηκε το επίθεμα, η διαφορά στην μετρούμενη τραχύτητα μεταξύ όμοιων δοκιμίων HLU (DH-1 και DH-2) και PP (DP-1, DP-2), (Πίνακας 2.8) ήταν μεν 10% και -8.3 % αντίστοιχα, πλην όμως δεν δικαιολογεί την αντίστροφη απόκλιση στους κύκλους έναρξης της ρωγμής. Θα μπορούσε όμως να δικαιολογήσει μόνο την μεγάλη αύξηση των κύκλων διάδοσης της ρωγμής που παρατηρήθηκε στο δοκίμιο DH-1 (95.24%). Η διακύμανση της τραχύτητας της επιφάνειας των δοκιμίων ήταν αρκετά μεγάλη στα δοκίμια με επίθεμα PP μόνο (DP-1, DP-2), με τιμές 151.4 % και 21.4 % αντίστοιχα, η οποία όμως επίσης δεν μπορεί να αιτιολογήσει την αντίστροφη έναρξη και διάδοση της ρωγμής (ξεκίνησε πρώτα στο DP-2 με μικρότερη διάρκεια).

Το σίγουρο είναι ότι σε πειραματικές δοκιμές με τόσες παραμέτρους για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων χρειάζεται σημαντικά μεγαλύτερος αριθμός δοκιμίων και μεγαλύτερος αριθμός δοκιμών για την εξέταση της επίδρασης των ανωτέρω παραμέτρων και για να επιβεβαιωθούν οι αιτίες που οδήγησαν σε τόσο μεγάλες αποκλίσεις τόσο μεταξύ των ομοίων δοκιμίων όσο και μεταξύ των διαφορετικών ειδών επιθέματος.

4.4 ΜΕΤΩΠΟ ΡΩΓΜΗΣ

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται ενδεικτικά το μέτωπο ρωγμής για το δοκίμιο DP-2. Στο σχήμα αυτό είναι εμφανής η μη ομοιόμορφη διάδοση της ρωγμής κατά μήκος του δοκιμίου. Στο κάτω μέρος είναι η μη ενισχυμένη πλευρά, ενώ στο επάνω μέρος η πλευρά με το σύνθετο επίθεμα, στην οποία φαίνεται ότι η ρωγμή διαδίδεται με μικρότερη ταχύτητα. Το κεντρικό τμήμα της διατομής με τη διαφορετική μορφή επιφάνειας αποτελεί την αρχική οπή με τις εγκοπές. Παρατηρούμε λοιπόν ότι σε μονόπλευρα ενισχυμένες με επίθεμα μεταλλικές πλάκες, ο Συντελεστής Έντασης Τάσης (ΣΕΤ) παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση κατά τη διεύθυνση του πάχους του μετάλλου, αρχίζοντας από χαμηλές τιμές στην ενισχυμένη πλευρά του μετάλλου και φτάνοντας σε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές στη μη ενισχυμένη πλευρά. Η τιμή του ΣΕΤ στην ενισχυμένη πλευρά του αλουμινίου παραμένει γενικά σταθερή, ανεξάρτητα από το μήκος ρωγμής. Στην ελεύθερη όμως (μη ενισχυμένη πλευρά) του αλουμινίου η τιμή του ΣΕΤ αυξάνει όσο μεγαλώνει το μήκος της ρωγμής, συγκλίνοντας με τις τιμές του για την μη ενισχυμένη πλάκα. Αποτέλεσμα αυτής της ανομοιόμορφης

διακύμανσης του ΣΕΤ κατά τη διεύθυνση του πάχους, είναι η ταχύτερη διάδοση της ρωγμής στη μη ενισχυμένη πλευρά του αλουμινίου συγκριτικά με την ενισχυμένη πλευρά και η δημιουργία ενός ανομοιόμορφου μετώπου ρωγμής [Tsouvalis-2007].



Σχήμα 4.5: Τομή του δοκιμίου DP-2 (με μονόπλευρο σύνθετο επίθεμα PP) μετά την αστοχία.

Αντιθέτως στο Σχήμα 4.6, στο οποίο φαίνεται η τομή του μη ενισχυμένου με επίθεμα δοκιμίου DR-2, παρατηρείται ότι το μέτωπο της ρωγμής είναι ομοιόμορφο και η ρωγμή διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα και στις δύο πλευρές του αλουμινίου.



Σχήμα 4.6: Τομή του δοκιμίου αναφοράς DR-2 (μη ενισχυμένο) μετά την αστοχία.

Μια άλλη παρατήρηση που διαπιστώσαμε στο εδάφιο 4.3 και εμφανίζεται και στα Σχήματα 4.5 και 4.6, είναι ότι η ελαστική περιοχή είναι μεγαλύτερη στα δοκίμια με επίθεμα από τα δοκίμια αναφοράς. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της παρουσίας του επιθέματος το αλουμίνιο φορτίζεται λιγότερο καθώς ένα μέρος της φόρτισης το παραλαμβάνει το επίθεμα. Όταν όμως η εφαρμοζόμενη κόλληση αστοχήσει και το επίθεμα δεν παραλαμβάνει πλέον φορτίο, τότε έχουμε απότομη αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης και τα δοκίμια εισέρχονται απότομα στην πλαστική περιοχή ακολουθώντας την τυπική απόκριση των δοκιμίων χωρίς επίθεμα.

4.5 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΡΩΓΜΗΣ

Η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής σε εναλλασσόμενη φόρτιση δίνεται θεωρητικά από τη γνωστή σχέση του Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4.1)$$

όπου:

da/dN είναι η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής, σε mm/cycle

ΔK είναι το εύρος του Συντελεστή Έντασης Τάσης (ΣΕΤ), σε $MPa\sqrt{m}$ και

C και m είναι σταθερές του υλικού καθοριζόμενες εμπειρικά.

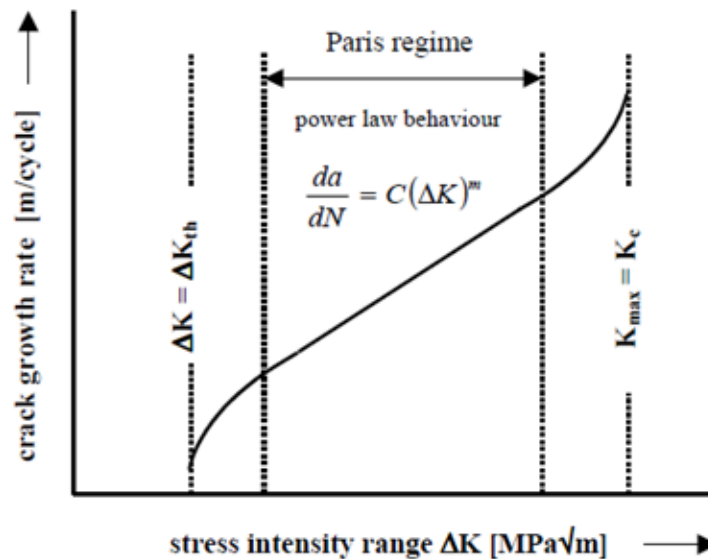
Οι σταθερές του υλικού C και m μπορούν να προσδιοριστούν από τις πειραματικές μετρήσεις του μήκους ρωγμής συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φορτίου. Από τις μετρήσεις αυτές μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής da/dN συναρτήσει του αριθμού εναλλαγών (Σχήμα 4.7). Παράλληλα, μπορεί να υπολογιστεί η θεωρητική τιμή του εύρους του ΣΕΤ (ΔK) για έλασμα πεπερασμένου πλάτους με κεντρική διαμερή ρωγή, από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{2b \cdot \tan\left(\frac{\pi\alpha}{2b}\right)} \quad (4.2)$$

όπου:

$\Delta \sigma$ είναι το εύρος της εφαρμοζόμενης τάσης και

$2b$ είναι το πλάτος του ελάσματος.



Σχήμα 4.7: Η γραμμική σχέση μεταξύ ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής (da/dN) και εύρους Συντελεστή Έντασης Τάσης (ΔK) (Νόμος του Paris).

Στην περίπτωση μας η ονομαστική εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα των δοκιμίων ήταν εναλλασσόμενη από +8 ως +80 MPa (παρουσιάζοντας απόκλιση 4% μόνο για το δοκίμιο DP-1, ήτοι από 7.6 έως 76 MPa), το εύρος όμως της τάσης των δοκιμίων διατηρήθηκε σε κάθε περίπτωση σταθερό και ίσο με:

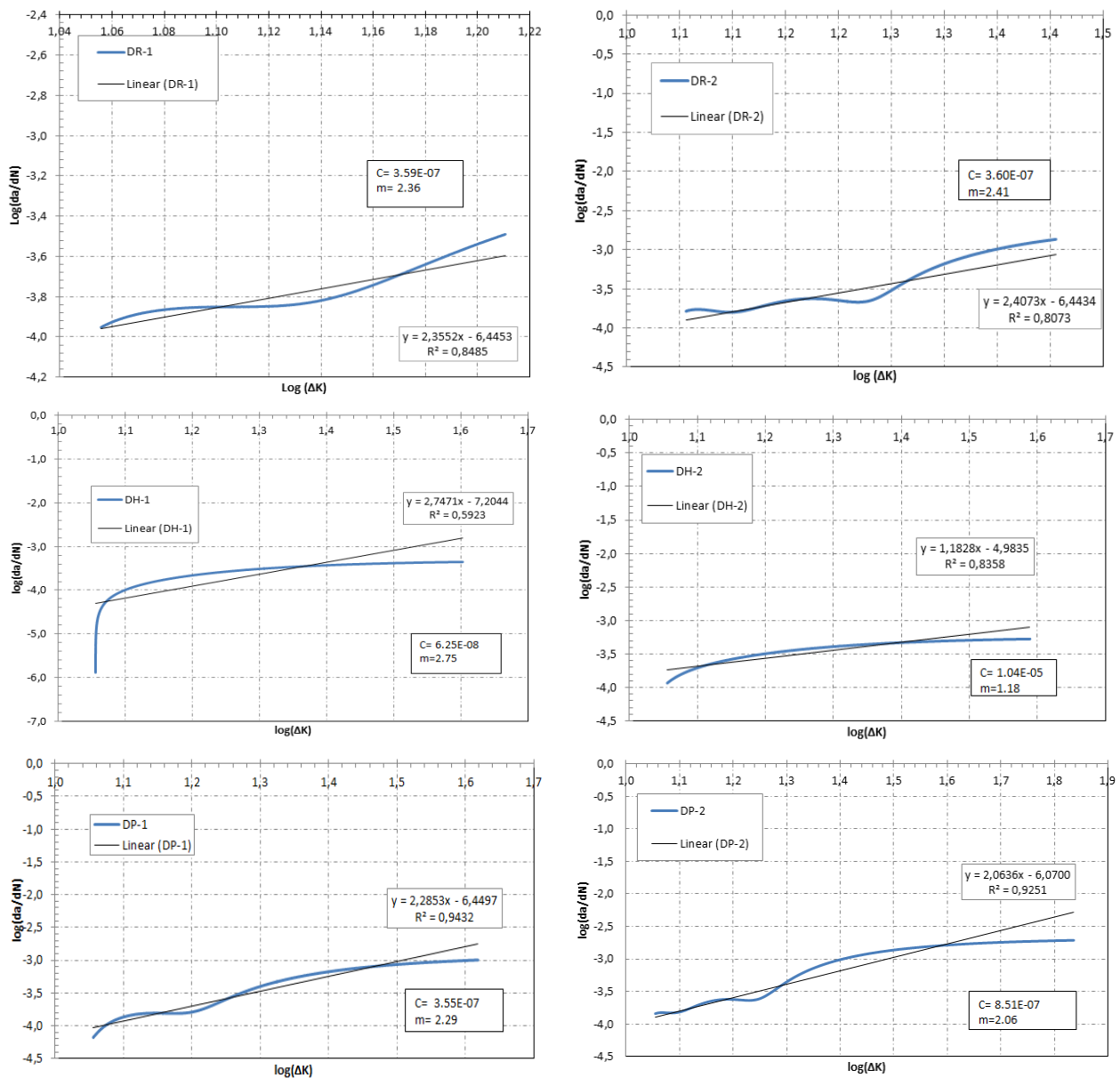
$$\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 72 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

Λογαριθμώντας την εξ.(4.1) παίρνουμε την παρακάτω γραμμική σχέση μεταξύ του $\log(da/dN)$ και του $\log(\Delta K)$:

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m \cdot \log(\Delta K) + \log C \quad (4.4)$$

Στο Σχήμα 4.8 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι καμπύλες $\log(da/dN) - \log(\Delta K)$ για όλα τα δοκίμια αντίστοιχα, με βάση τις πειραματικά μετρούμενες τιμές da/dN και τις αντίστοιχες θεωρητικά υπολογισμένες από την εξ.(4.2) τιμές του ΣΕΤ (ΔK). Η γραμμική προσομοίωση

των καμπυλών αυτών που είναι η εξ.(4.4) οδηγεί στον καθορισμό των σταθερών C και m. Η διαδικασία έδωσε λογικά αποτελέσματα καθώς οι τιμές των σταθερών C και m υπολογίστηκαν περίπου ίδιες στα όμοια δοκίμια, με μικρές αποκλίσεις από τις τιμές της βιβλιογραφίας για παρεμφερείς τύπους αλουμίνιου. Οι τιμές των σταθερών C και m που υπολογίστηκαν εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.3. Όπως διαπιστώνουμε, με εξαίρεση ένα από τα δοκίμια με επίθεμα HLU (το DH-2), οι σταθερές C και m είναι ανεξάρτητες από την ύπαρξη επιθέματος ή όχι. Άρα η μείωση της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής εξαρτάται αποκλειστικά από την μεταβολή του ΣΕΤ λόγω της τοποθέτησης του επιθέματος, με αποτέλεσμα η δράση του επιθέματος να μπορεί να περιορίσει σημαντικά ή και να σταματήσει τον ρυθμό διάδοσης της ρωγμής.



Σχήμα 4.8: Προσδιορισμός των σταθερών C και m σε όλα τα δοκίμια.

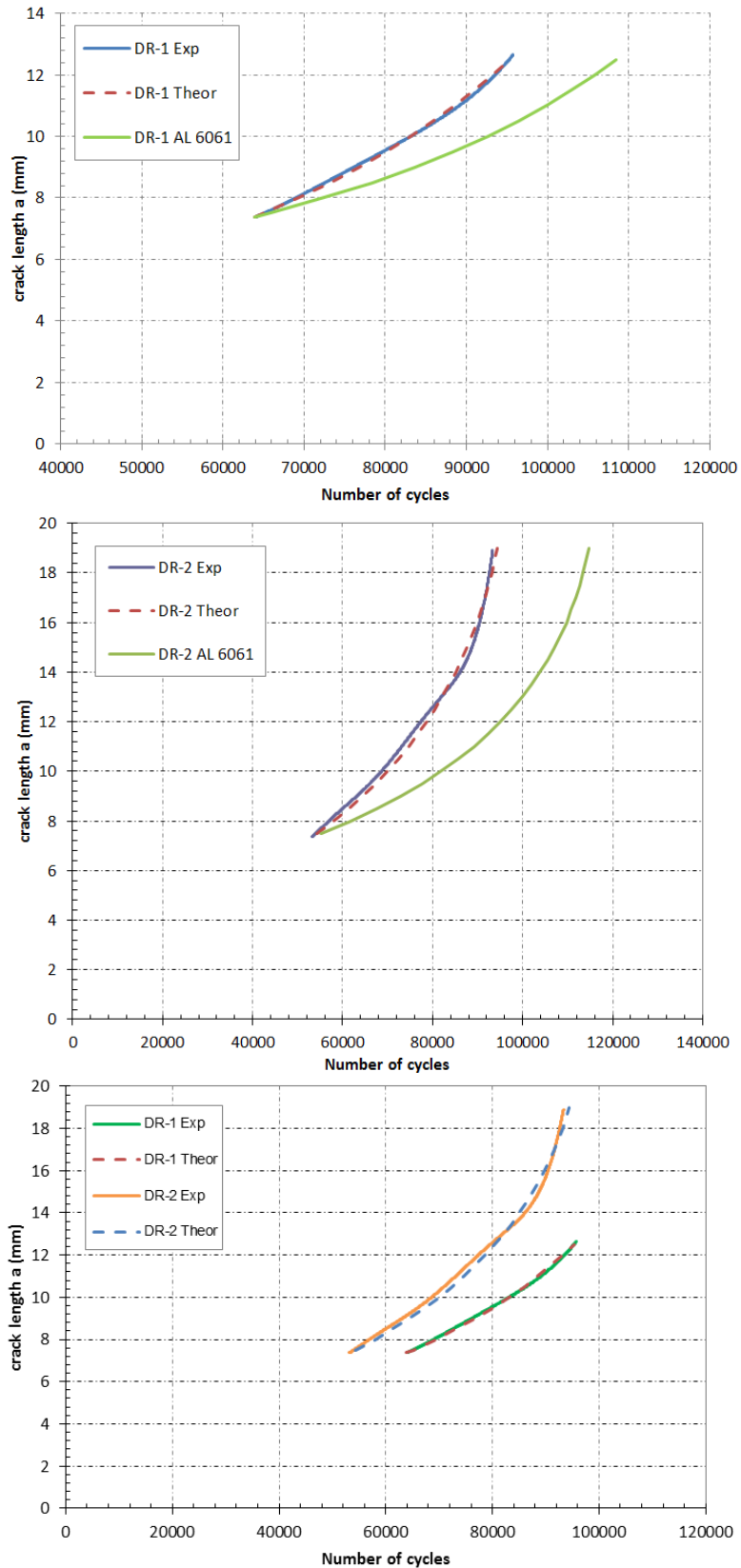
Πίνακας 4.3: Τιμές των συντελεστών C και m της σχέσης του Paris για όλα τα δοκίμια

Δοκίμιο	C	m
AL 6061	3.00E-08	3.18
DR-1	3.59E-07	2.36
DR-2	3.60E-07	2.41
DH-1	6.25E-08	2.75
DH-2	1.04E-05	1.18
DP-1	3.55E-07	2.29
DP-2	8.51E-07	2.06

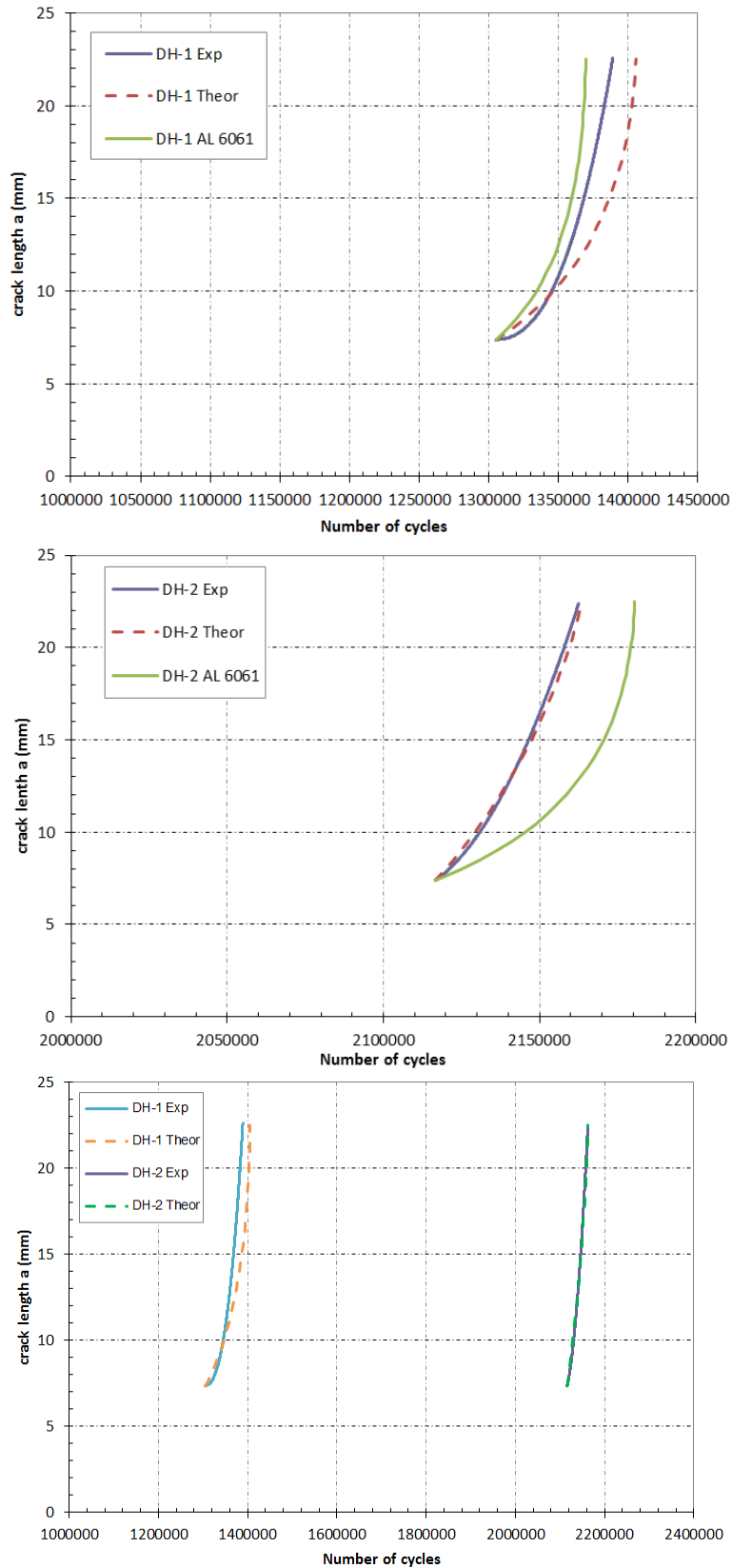
Με βάση τις τιμές των σταθερών C και m του Πίνακα 4.3 που προέκυψαν από την εξ.(4.4), σε συνδυασμό με την εξ.(4.1), υπολογίστηκαν οι θεωρητικές καμπύλες α -N (DR-1, 2 Theor) για τα δοκίμια αναφοράς DR-1 και DR-2 και στο Σχήμα 4.9 συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις (DR-1,2 Exp) και τις θεωρητικές για τις τιμές των σταθερών C και m του AL 6061, ενώ στο τελευταίο διάγραμμα παρουσιάζονται συγκριτικά μεταξύ τους. Το ίδιο υπολογίστηκε και για τα δοκίμια HLU και PP και τα διαγράμματα εμφανίζονται ακολούθως στα Σχήματα 4.10 και 4.11.

Όλες οι θεωρητικές και πειραματικές καμπύλες α -N των δοκιμίων ξεκινάνε από το ίδιο μήκος ρωγμής τα 7.37 mm, στους αντίστοιχους κύκλους για το καθένα. Όπως παρατηρούμε οι θεωρητικές καμπύλες (Theor) που προέκυψαν δεν εμφανίζουν καμία απόκλιση από τις πειραματικές (Exp), ενώ οι καμπύλες του υπό δοκιμή Al 1561 σε κάθε περίπτωση ακολουθούν μεγαλύτερο ρυθμό διάδοσης της ρωγμής από του Al 6061 (με εξαίρεση το δοκίμιο DH-1).

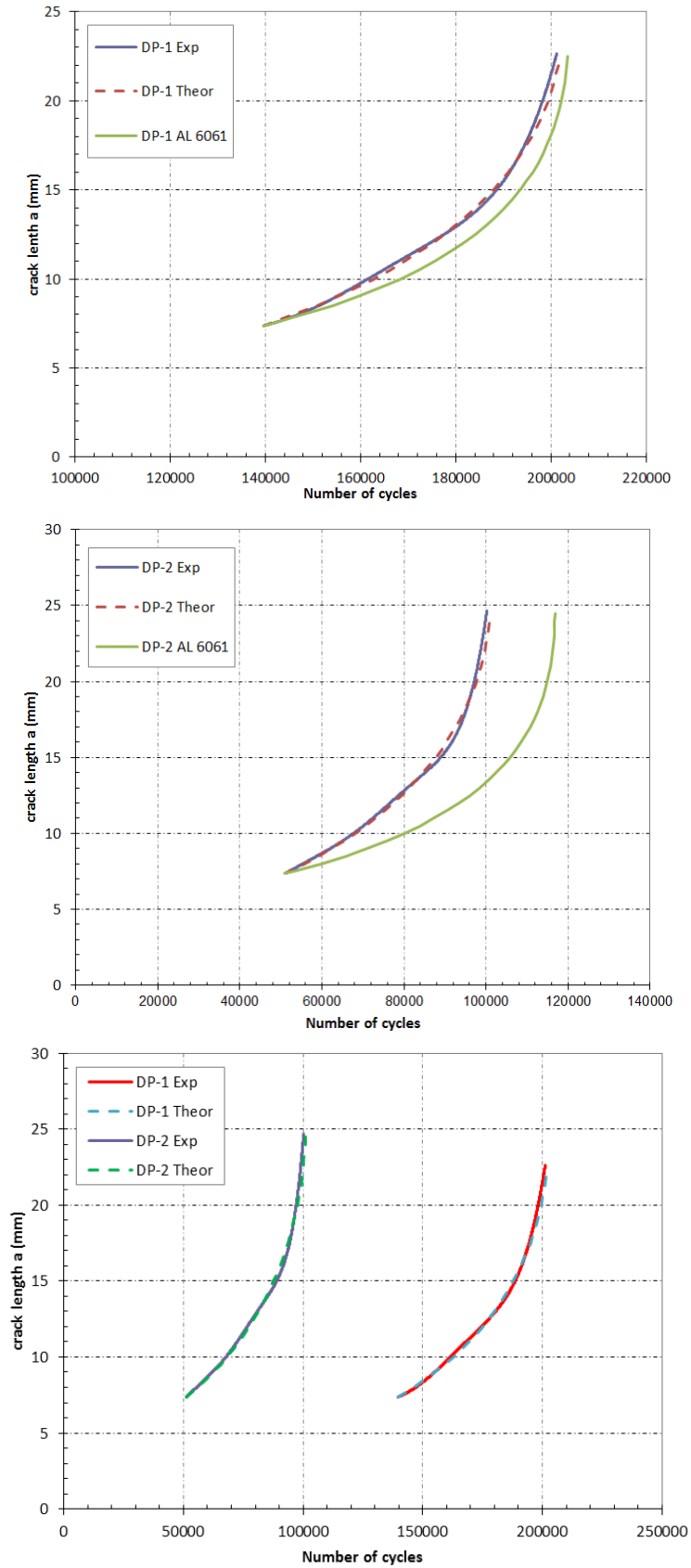
Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι με τη εξ.(4.2) είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός του Συντελεστή Έντασης Τάσης (ΣΕΤ) για δοκίμιο αλουμινίου με κεντρική διαμερή οπή. Ο υπολογισμός επομένως των θεωρητικών καμπυλών α -N δίνει ακριβέστατα αποτελέσματα, καθώς βασίστηκε στη χρήση της εξ.(4.2) για τον υπολογισμό των θεωρητικών τιμών του Συντελεστή Έντασης Τάσης και οι συντελεστές C και m που υπολογίστηκαν επίσης δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες αποκλίσεις. Οι θεωρητικές λοιπόν καμπύλες α -N είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο για τον υπολογισμό της διάδοσης της ρωγμής στην περίπτωση των δοκιμίων από αλουμίνιο με κεντρική διαμερή οπή.



Σχήμα 4.9: Πειραματικές (Exp) και θεωρητικές (Theor) καμπύλες μήκους ρωγμής – αριθμού κύκλων για τα δοκίμια αναφοράς (μέχρι το σημείο διακοπής καταγραφής από το crack cage στο DR-1).



Σχήμα 4.10: Πειραματικές (Exp) και θεωρητικές (Theor) καμπύλες μήκους ρωγμής – αριθμού κύκλων για τα δοκίμια με επίθεμα HLU.



Σχήμα 4.11: Πειραματικές (Exp) και θεωρητικές (Theor) καμπύλες μήκους ρωγμής – αριθμού κύκλων για τα δοκίμια με επίθεμα PP.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η αντιμετώπιση των προβλημάτων κόπωσης μεταλλικών κατασκευών απασχολεί έντονα τα τελευταία έτη την ερευνητική κοινότητα. Στις ναυπηγικές κατασκευές όπου η δημιουργία και διάδοση ρωγμών κοπώσεως στην υπερκατασκευή και τη γάστρα είναι πολύ συχνή λόγω των κυματισμών, η μέθοδος επισκευής με σύνθετα επιθέματα με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει έχει καθιερωθεί, καθόσον μπορεί όχι μόνο να αποκαταστήσει πλήρως τη βλάβη αλλά και σε πολλές περιπτώσεις να επεκτείνει τον αρχικό χρόνο ζωής, χωρίς να απαιτείται το πλοίο να διακόψει την λειτουργία του μέχρι την επόμενη προγραμματισμένη επισκευή του.

Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών όπως η ευκολία τοποθέτησης, οι αυξημένες μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητές τους, το χαμηλό βάρος, η αντοχή σε διαβρωτικό περιβάλλον και η αντοχή σε θραύση από κόπωση, τα καθιστούν ιδανικά για την επισκευή τοπικών αστοχιών στη ναυπηγική.

Τα τελευταία έτη έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες πειραματικές δοκιμές για τη βελτιστοποίηση και τη μελέτη της συμπεριφοράς των επιθεμάτων. Λίγες όμως μελέτες έχουν γίνει για την χρήση των σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική και οι περισσότερες αφορούν επισκευές σε ναυπηγικό χάλυβα, ελάχιστες δε υπάρχουν σε αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές. Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται και η παρούσα εργασία, της οποίας στόχος ήταν να εξειδικεύσει τις συνθήκες, τον τρόπο φόρτισης και τα υλικά, ώστε να ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες στις οποίες καταπονείται ένα σύνθετο επίθεμα σε ένα αλουμινένιο πλοίο και να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητά του ως μέσο επισκευής.

Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν πειραματικές δοκιμές που αφορούσαν κεντρικά ρωγματομένα δοκίμια αλουμινίου Al 1561, επισκευασμένα μονόπλευρα, (όπως πολλές φορές συμβαίνει στις ναυπηγικές επισκευές λόγω αδυναμίας πρόσβασης και στις δύο πλευρές του προς επισκευή ελάσματος), με σύνθετο επίθεμα από ίνες άνθρακα με εποξική ρητίνη (CFRP), το πιο διαδεδομένο σύνθετο υλικό στον τομέα των ναυπηγικών επισκευών. Επιλέχθηκαν για μελέτη δύο (2) τρόποι κατασκευής των επιθεμάτων, η επίστρωση με το χέρι (HLU) και τα προεμποτισμένα επιθέματα (Pre-Pregs). Τα δοκίμια καταπονήθηκαν σε δοκιμές κόπωσης, καθώς διάφορα τμήματα της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων παρουσιάζουν συχνά δομικές αστοχίες, όπως ρωγμές και τοπικές παραμορφώσεις που οφείλονται κυρίως στην εναλλασσόμενη φόρτιση από τους κυματισμούς (hogging-sagging) και εν συνεχεία μελετήθηκε η επίδραση της επισκευής με σύνθετο επίθεμα στην αντοχή των δοκιμίων και τη διάδοση της ρωγμής.

Από τις πειραματικές δοκιμές εξήχθησαν συμπεράσματα για τις ιδιότητες των ενισχυμένων δοκιμίων, την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής και τους συντελεστές C και m της σχέσης του Paris για τον θεωρητικό υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής. Τα θεωρητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά, ώστε να ελεγχθεί εάν μπορούν να αποτελέσουν μια αξιόπιστη μέθοδο για την πρόβλεψη του χρόνου ζωής σε κόπωση αντίστοιχων διατάξεων, με ή χωρίς την παράλληλη τέλεση πειραματικών δοκιμών.

Τα συμπεράσματα λοιπόν των πειραματικών δοκιμών παρουσιάζονται ακολούθως.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Τα συμπεράσματα των πειραματικών δοκιμών κατηγοριοποιούνται σε αυτά τα οποία εξήχθησαν κατά την πειραματική διαδικασία και σε αυτά που εξήχθησαν από την μελέτη των αποτελεσμάτων των δοκιμών.

Συμπεράσματα της πειραματικής διαδικασίας:

- Η επίτευξη της θεωρητικής και απαιτούμενης γεωμετρίας των δοκιμίων παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία στην πράξη, με αποτέλεσμα τα πειραματικά δοκίμια να έχουν αποκλίσεις μεταξύ τους. Η επιλογή των μεθόδων προετοιμασίας και κατεργασίας, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση η δημιουργία των εγκοπών με σέγα χειρός, των οπών με ηλεκτρικό δράπανο και της γεωμετρίας των δοκιμίων με ψαλίδι κοπής, επηρέασαν ως ένα βαθμό τα αποτελέσματα. Το πάχος του σύνθετου επιθέματος, η τραχύτητα στην προετοιμασία της επιφανείας και το αρχικό μήκος οπής/ εγκοπής εμφάνισαν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις.
- Ο αριθμός των εναλλαγών μέχρι την έναρξη της διάδοσης της ρωγμής παρατηρήθηκε πειραματικά ότι διαφέρει σημαντικά, ακόμα και μεταξύ των όμοιων δοκιμίων, αποτελώντας ένα παράγοντα που δυσχεραίνει την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η δημιουργία αρχικής ρωγμής στα δοκίμια, θα απομόνωνε το αρχικό στάδιο μέχρι την έναρξη της ρωγμής που δεν είναι σταθερός παράγοντας και η ρωγμή θα άρχιζε να διαδίδεται αμέσως με την έναρξη των εναλλαγών του φορτίου, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις των πειραματικών δοκιμών να είναι ευκολότερα συγκρίσιμες μεταξύ τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων επί της δράσης των επιθεμάτων.
- Με τη χρήση ενός crack gage 25 mm τοποθετημένου σε μία από τις δύο πλευρές της εγκοπής μόνο, καλύφθηκε μεν πλήρως όλη η απόσταση μέχρι την αστοχία των δοκιμίων, όμως σε μερικές περιπτώσεις όπου η ρωγμή διαδόθηκε ταχύτερα στην πλευρά που δεν ήταν τοποθετημένο crack cage, δεν ελήφθησαν πλήρως τα δεδομένα της καμπύλης α-N μέχρι την αστοχία του δοκιμίου και δεν είχαμε πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς των δοκιμίων. Η τοποθέτηση crack gages που να καλύπτουν όλη την απόσταση από την άκρη της εγκοπής μέχρι την αστοχία και στις δύο (2) πλευρές του δοκιμίου είναι προτιμότερη, αλλά όχι ιδιαίτερα οικονομική λύση.
- Η επιλογή του τύπου επιθέματος για εφαρμογή στο αλουμίνιο πρέπει να γίνεται συνεκτιμώντας πλέον του μέτρου ελαστικότητας και τις διαφορετικές ιδιότητες του αλουμινίου σε θερμοκρασιακές μεταβολές σε σχέση με τις ιδιότητες του επιθέματος (πχ. συντελεστής θερμικής α ής), ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία έντονων καμπτικών

φαινομένων στα δοκίμια μετά την τοποθέτηση του επιθέματος που οδηγούν σε πρόωρη αποκόλληση του, όπως διαπιστώθηκε στα δοκίμια Pre-Preg μετά την τοποθέτηση τους στον φούρνο για τον πολυμερισμό της ρητίνης του επιθέματος.

Συμπεράσματα των πειραματικών αποτελεσμάτων:

- Η συνολική διάρκεια ζωής των ενισχυμένων δοκιμίων με επίθεμα HLU αυξήθηκε εντυπωσιακά κατά 18 φορές σε σχέση με εκείνη των μη ενισχυμένων δοκιμίων αναφοράς, παρά τη χαμηλή τιμή του λόγου ακαμψίας ($SR=0.5$). Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο Pre-Preg γενικά δεν επέδειξαν την αναμενόμενη διαφοροποίηση από τα δοκίμια αναφοράς και διπλασίασαν τον χρόνο ζωής τους μόνο στο ένα δοκίμιο, ενώ το άλλο αστόχησε στον ίδιο περίπου αριθμό εναλλαγών.
- Διαπιστώσαμε ότι η ανωτέρω συνολική διάρκεια ζωής περιλαμβάνει και το χρονικό διάστημα για την έναρξη της ρωγμής που είναι μεταβλητό και εν πολλοίς άγνωστο και ότι αντικειμενικότερος τρόπος σύγκρισης των δοκιμίων είναι για ένα συγκεκριμένο εύρος διάδοσης της ρωγμής, όπως τα 7.37 mm και μετά, το οποίο ήταν το μεγαλύτερο μήκος έναρξης διάδοσης της ρωγμής, το οποίο μετρήθηκε στο δοκίμιο DH-1.
- Η διάρκεια ζωής από τα 7.37 mm της διάδοσης της ρωγμής και μετά αυξήθηκε στο ένα δοκίμιο με επίθεμα HLU κατά 1.96 φορές ενώ στο άλλο δεν παρατηρήθηκε διαφοροποίηση σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς επίθεμα. Στα δοκίμια με επίθεμα Pre-Preg μόνο στη μία περίπτωση είχαμε αύξηση της διάρκειας διάδοσης της ρωγμής κατά 1.44 φορές, ενώ στην άλλη η αύξηση ήταν πολύ μικρή έως ελάχιστη (1.15 φορές).
- Τα αποτελέσματα των όμοιων δοκιμίων, κυρίως αυτών με επίθεμα, εμφάνισαν μεγάλες αποκλίσεις, οι οποίες οφείλονται περισσότερο στις διαφορές της γεωμετρίας κατά την κατασκευή τους. Οι διαφορές στο αρχικό μήκος εγκοπής και οι εκκεντρότητες των οπών, οδήγησαν σε αυτές τις αποκλίσεις του κύκλου κόπωσης και μπορούσαν να είχαν μειωθεί με τη χρήση διαφορετικών μεθόδων κατεργασίας κατά την κατασκευή των δοκιμίων και την δημιουργία αρχικής ρωγμής. Παράμετροι όπως η λανθασμένη ευθυγράμμιση των δοκιμίων στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής, η προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμίων, οι αποκλίσεις της επιβαλλόμενης τάσης κ.α. πιθανότατα να συνετέλεσαν επίσης στις αποκλίσεις και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.
- Σε πειραματικές δοκιμές με τόσες παραμέτρους για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων χρειάζεται σημαντικά μεγαλύτερος αριθμός δοκιμίων.
- Επιβεβαιώθηκε πειραματικά, ότι σε μονόπλευρα ενισχυμένο δοκίμιο, το επίθεμα με υψηλό μέτρο ελαστικότητας και μικρό πάχος μπορεί να προκαλέσει έντονη κάμψη στο δοκίμιο, με αποτέλεσμα την αστοχία του δεσμού μεταξύ επιθέματος και ελάσματος και την γρηγορότερη αποκόλληση του κατά τις δοκιμές κόπωσης.
- Διαπιστώσαμε και πειραματικά ότι η ελαστική περιοχή είναι μεγαλύτερη στα δοκίμια με επίθεμα από τα δοκίμια αναφοράς. Λόγω της παρουσίας του επιθέματος το αλουμίνιο φορτίζεται λιγότερο καθώς ένα μέρος της φόρτισης το παραλαμβάνει το επίθεμα. Όταν όμως η εφαρμοζόμενη κόλληση αστοχήσει το επίθεμα δεν παραλαμβάνει πλέον φορτίο και τα δοκίμια εισέρχονται απότομα στην πλαστική περιοχή.

- Διαπιστώθηκε ότι η υπεροχή των δοκιμών με επίθεμα HLU οφείλεται πιθανότατα στην επίτευξη ενός αποτελεσματικότερου δεσμού μεταξύ του επιθέματος και του αλουμινίου. Αντίθετα στα δοκίμια με επίθεμα Pre-Preg η μικρότερη ποσότητα ρητίνης που διαθέτουν εκτιμάται ότι οδήγησε σε ταχύτερη αποκόλληση του επιθέματος, στην οποία οφείλεται ο χαμηλός αριθμός των εναλλαγών που παρουσίασαν.
- Τα ενισχυμένα δοκίμια μετά την αστοχία επιβεβαίωσαν τη μη ομοιόμορφη κατανομή του μετώπου της ρωγμής κατά τη διεύθυνση του πάχους του αλουμινένιου ελάσματος. Η ρωγμή διαδίδεται αρκετά πιο αργά στην επιφάνεια με το επίθεμα σε σχέση με την απέναντι ελεύθερη επιφάνεια, δημιουργώντας ένα καμπύλο μέτωπο. Αντιθέτως, στα μη ενισχυμένα δοκίμια το μέτωπο της ρωγμής διαδίδεται σχεδόν ομοιόμορφα κατά τη διεύθυνση του πάχους του αλουμινίου.
- Καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η σχέση με βάση την οποία υπολογίζεται η θεωρητική τιμή του εύρους του ΣΕΤ για έλασμα πεπερασμένου πλάτους με κεντρική διαμερή ρωγμή: $\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{2b \cdot \tan\left(\frac{\pi\alpha}{2b}\right)}$ και ο υπολογισμός των σταθερών C και m του νόμου του Paris βασισμένος στα πειραματικά αποτελέσματα σε δοκίμια αλουμινίου με οπή, είναι ακριβής για τον υπολογισμό των καμπυλών α -N. Επιβεβαιώθηκε επίσης ότι οι συντελεστές C και m παραμένουν σταθεροί ανεξάρτητα από την ύπαρξη του επιθέματος, ιδιαίτερα στα δοκίμια με επίθεμα Pre-Preg.
- Συμπεράναμε τη δυσκολία στην εκτέλεση επισκευών με σύνθετα υλικά PP, καθώς η αύξηση της αντοχής τους σε κόπωση αποδείχθηκε γενικά μικρότερη, αντίθετα με την περίπτωση των δοκιμών HLU, ενώ παράλληλα απαιτούν ειδικές συνθήκες αποθήκευσης, εξειδικευμένο προσωπικό και ειδικό εξοπλισμό για τον πολυμερισμό της ρητίνης (φούρνο ή θερμαντικές κουβέρτες, σάκος και συσκευή κενού, κ.α.). Η δυσκολία στην εκτέλεση επιθεωρήσεων των δοκιμών με επίθεμα Pre-Preg με μακροσκοπική παρατήρηση, πλην της εμφανής κάμψης τους δεν έδειχνε άλλα στοιχεία και η ακαταλληλότητα του επιθέματος στην αύξηση του χρόνου ζωής των ρωγματωμένων δοκιμών έγινε αντιληπτή μόνο μετά την τέλεση των πειραματικών δοκιμών.
- Παρατηρήθηκε λοιπόν πειραματικά ότι η κατασκευή του επιθέματος με τη μέθοδο HLU είναι προτιμότερη για επισκευές από την μέθοδο με επίθεμα Pre-Preg, τόσο λόγω της απλότητας της κατασκευής όσο και λόγω της αποτελεσματικότητας στην αύξηση του χρόνου ζωής της ρωγματωμένης αλουμινένιας κατασκευής.
- Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι πολύ λίγες για να μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας μπορούν να γενικευτούν και να χρησιμοποιηθούν ως οδηγός για οποιαδήποτε επισκευή αυτού του είδους.

5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η αποτίμηση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας και των συμπερασμάτων που εξήχθησαν, σε συνδυασμό με τη μελέτη της βιβλιογραφίας, οδήγησαν στη δημιουργία προτάσεων για περαιτέρω μελέτη και επέκταση της εργασίας. Οι προτάσεις

αυτές θα αναφερθούν παρακάτω για τη διευκόλυνση μελλοντικών εργασιών πάνω στη συγκεκριμένη θεματολογία.

- Αρχικά προτείνεται η τέλεση πειραματικών δοκιμών κόπωσης σε δοκίμια αλουμινίου των οποίων οι παράμετροι των δοκιμών να προσομοιάζουν στις πραγματικές συνθήκες σε ένα πλοίο, όπου η συχνότητα και ο λόγος των τάσεων των δοκιμών κόπωσης αντιστοιχούν σε μία τυπική εναλλασσόμενη φόρτιση της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου, λόγω hogging και sagging.
- Στην ίδια κατεύθυνση τα δοκίμια αλουμινίου θα μπορούσαν να υποστούν γήρανση σε περιβαλλοντικές συνθήκες τις οποίες είναι επίσης πιθανό να αντιμετωπίσουν τα σύνθετα επιθέματα σε ένα πλοίο. Ενδεικτικά αναφέρεται η γήρανση μέσα σε θάλαμο αλατονέφωσης ή θαλασσινό νερό, ώστε να προσομοιωθεί η κατάσταση που μπορεί να αντιμετωπίσει μία επισκευή με σύνθετο επίθεμα, πχ. μέσα σε δεξαμενή έρματος ή στο κατάστρωμα του πλοίου και να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της επισκευής υπό αυτές τις συνθήκες.
- Μία επιπλέον παράμετρος για μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει το κολλητικό μέσο. Στην παρούσα μελέτη το ρόλο του κολλητικού μέσου για τα δοκίμια με επίθεμα HLU έπαιξε μία αρχική στρώση ρητίνης για λόγους απλότητας, ενώ στα δοκίμια με επίθεμα PP δεν τοποθετήθηκε καθόλου επιπλέον ρητίνη. Η εξέταση διαφορετικών επιλογών σε κολλητικά μέσα θα μπορούσε να δώσει πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα, ιδιαίτερα στα δοκίμια με επίθεμα PP όπου δεν ήταν τα αναμενόμενα.
- Το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου επιθέματος, ο λόγος ακαμψίας επιθέματος-πλάκας (SR), ο προσανατολισμός, το πάχος και ο αριθμός των στρώσεων του επιθέματος είναι μερικές παράμετροι που δημιουργούν επίσης πολλούς συνδυασμούς και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.
- Επίσης θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση του αρχικού μήκους ρωγμής στην αποτελεσματικότητα της επισκευής με σύνθετο επίθεμα, δηλαδή η εκτέλεση πειραματικής μελέτης με επιπλέον παράμετρο το αρχικό μήκος ρωγμής του μετάλλου. Σε αυτή την περίπτωση τα δοκίμια έχουν το ίδιο αρχικό μήκος ρωγμής, αλλά το ενισχυτικό επίθεμα τοποθετείται μετά από διαφορετικό για κάθε δοκίμιο αριθμό εναλλαγών ή όταν η ρωγμή φτάσει σε ένα συγκεκριμένο μήκος. Με αυτό τον τρόπο θα διερευνηθεί ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής μιας ατέλειας μετά την επισκευή της.
- Στην παρούσα εργασία η ενίσχυση με σύνθετο επίθεμα έγινε μονόπλευρα. Προτείνεται η τέλεση αντίστοιχων πειραματικών δοκιμών με αμφίπλευρη ενίσχυση του μετάλλου και σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Όσον αφορά την επίδραση που είχε στην αποτελεσματικότητα της επισκευής κάθε μέθοδος κατασκευής σύνθετου επιθέματος, προτείνεται η εκτέλεση παρόμοιων πειραμάτων σε μεγαλύτερο των δύο αριθμό δοκιμίων, ώστε να επιβεβαιώνονται πιο εύκολα τα αποτελέσματα της έρευνας.
- Τέλος προτείνεται η μοντελοποίηση των δοκιμών με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Καντεράκης Γ. (2000), *Η Μέθοδος της Επισκευής Μεταλλικών Δομών με την Επικόλληση Ενισχυτικών Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά*, Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Μηχανικής, Τμήμα Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2000.
- Μυρισιώτης Λ., Τσούβαλης Ν. και Παπάζογλου Β. (2006), *Πειραματική Διερεύνηση της Συμπεριφοράς σε Κόπωση Ρωγματομένων Πλακών Χάλυβα Ενισχυμένων με Επιθέματα από Σύνθετα Υλικά*, Πυθαγόρας ΙΙ, Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στα Πανεπιστήμια, 2.2.3.στ, Report No. STL-228-F-06, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δεκέμβριος 2006.
- Παντελής Δ. (2006), *Εισαγωγή στη Μηχανουργική Τεχνολογία*, Σημειώσεις του Μαθήματος, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2006.
- Παπάζογλου Β. (1995), *Ναυπηγική Τεχνολογία*, Σημειώσεις του Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1995.
- Σωτηρόπουλος Π. (2007), *Αναλυτική και Αριθμητική Μοντελοποίηση της Χρήσης Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά για την Ενίσχυση και Επισκευή Χαλύβδινων Κατασκευών*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2007.
- Τσούβαλης Ν. (1998), *Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά*, Σημειώσεις του Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1998.
- Τσούβαλης Ν., Παπάζογλου Β. και Μυρισιώτης Λ., (2007), *Χρήση Ενισχυμένων Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά για την Ενίσχυση Τμημάτων Χαλύβδινων Ναυπηγικών Κατασκευών*, Συνέδριο για τη επιστημονική έρευνα στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πλωμάρι Λέσβου, Ιούλιος 2007.
- Κουτσούρης Σ. (2010), *Πειραματική Μελέτη και Αριθμητική Μοντελοποίηση της Συμπεριφοράς σε Κόπωση Ρωγματομένων Χαλύβδινων Πλοκών Ενισχυμένων με Επιθέματα από Σύνθετα Υλικά υπό την Επίδραση του Θαλασσίου Περιβάλλοντος*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2010.
- Παπαδόπουλος Μ. (2015), *Πειραματική Μελέτη της Στατικής Συμπεριφοράς σε Εφελκυσμό Ρωγματομένων Αλουμινένιων Πλακών Ενισχυμένων με Επιθέματα από Σύνθετα Υλικά*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2010.

Διεθνής

- Baker, A.A., Rose, L.R.F. and Jones, R. (2002), “*Advances in the Bonded Composite Repairs of Metallic Aircraft Structure Volume 1 and 2*”, Published by Elsevier Science Ltd, 2002.
- Benachour M., Benachour N, SERIARI F.Z., Benguediab M. (2012), “*Effect of Patch Repair on Fatigue Behavior*”, Engineering Mechanics, Czech Republic, 2012, 103–108.
- Massimiliano Bocciarelli M., Colombi P., Fava G., Poggi C., (2009), “*Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates*”, Composite Structures, **87**, 2009, 334-343.
- Chung K.H., Yang W.H. (2003), “*Mixed Mode Fatigue Crack Growth in Aluminium Plates With Composite Patches*”, Department of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University, International Journal of Fatigue, **25**, 2003, 325-333.
- Dalzel-Job, J., Sumpter, J.D.G. and Livingstone, F. (2003), “*Composite Patch Repair of Steel Ships*”, Proc. Advanced Marine Materials, Technology and Applications Conference, RINA, London, 2003.
- Elena Rodríguez, Clara Palleiro y Rubén de la Mano (2013), “*Best practice design and application procedures (Deliverable D5.1)*”, Co-Patch Project No: SCP8-GA-2009-233969.
- Grabovac I (2002), “*Case history: Bonded Composite Reinforcement of Ship Structure*” Maritime Platforms Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Defence Science and Technology Organization, Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure, **42**, 2002, 1035-1050.
- Grabovac I (2003), “*Bonded Composite Solution to Ship Reinforcement*”, Maritime Platforms Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Defence Science and Technology Organisation, Composites Part A, **34**, 2003, 847-854.
- Grabovac I, Whittaker D. (2009), “*Application of Bonded Composites in the Repair of Ships Structures-A 15-Year Service Experience*”, Department of Defence, Defence Science and Technology Organization, Australia, Composites Part A, **40**, 2009, 1381-1398.
- Hart D. C., Udinski, E. P., Hayden, M. J., Dr. Liu, X. (2014), “*Fatigue Performance and Analysis of Composite Patch Repaired Cracked Aluminum Plates*”.
- Hosseini H.- Toudeshky (2006), “*Effects of Composite Patches on Fatigue Crack Propagation of Single-Side Aluminum Panels*”, Composite Structures, **76**, 2006, 243-251.
- Hosseini H.- Toudeshky- B. Mohammadi (2006), “*A Simple Method to Calculate the Crack Growth Life of Adhesively Repaired Aluminum Panels*”, Composite Structures, **79**, 2007, 234-241.
- ISO 5893:2002, “*Rubber and Plastics Test Equipment-Tensile, Flexural and Compression Types (Constant Rate of Traverse)-Specification*”, 2002.

- Kotsidis E.A., Karatzas V.A and Tsouvalis N.G (2013), “*Manufacturing and long term tests of plate specimens (Deliverable D3.4)*”, Co-Patch Project No: SCP8-GA-2009-233969.
- Lafarie-Frenot M.C. (2006), “*Damage Mechanisms Induced by Cyclic Ply-Stresses in Carbon-Epoxy Laminates:Environmental Effects*”, International Journal of Fatigue, **28**, 2006, 1202-1216.
- Liu H., Al-Mahaidi R., and Zhao X. (2009), “*Experimental Study of Fatigue Crack Growth Behaviour in Adhesively Reinforced Steel Structures*”, Composite Structures, **90**, 2009, 12-20.
- McGeorge D., Echtermeyer A.T., Leong K.H., Melve B., Robinson M., Fischer K.P. (2009), “*Repair of Floating Offshore Units Using Bonded Fibre Composite Materials*”, Det Norske Veritas AS, Composites Part A, **40**, 2009, 1364-1380.
- E. Rodríguez^{1*}, R. de la Mano¹, L. Blanco (2012), “*Crack Repair of Steel Vessels with Bonded Composite Patches – Damage Control with FBGS*” paper presented at ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 2012.
- Sabelkin V., Mall S., Avram J.B (2006), “*Fatigue crack growth analysis of stiffened cracked panel repaired with bonded composite patch*”, Engineering Fracture Mechanics, **73**, 2006, 1553-1567.
- Sabelkin V., Mall S., Hansen M.A, Vandawaker R.M, Derriso M. (2007), “*Investigation into cracked aluminum plate repaired with bonded composite patch*”, Composite Structures, **79**, 2007, 55-66.
- Seo, D.C. and Lee, J.J. (2002), “*Fatigue Crack Growth Behavior of Cracked Aluminum Plate Repaired with Composite Patch*”, Composite Structures, **57**, 2002, 323-330.
- Sun C.T, Klug J.C. (1998), “*Large deflection effects of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patches*”, Paper presented at the First International Conference on Composite Science & Technology (ICCST/1).
- Tsouvalis N., Kouloukouras J., Dimou D. and Mirisiotis L. (2007), “*Numerical Modeling of the Static and Dynamic Experimental Tests Performed in Composite Patch Reinforced Steel Plates with Defects*”, Pithagoras II, Support of University Research Teams, 2.2.3.στ, Report No.STL-247-F-07, Athens, September 2007.
- Tsouvalis N., Mirisiotis L., Dimou D. (2009), “*Experimental and numerical study of the fatigue behaviour of composite patch reinforced cracked steel plates*”, Shipbuilding Technology Laboratory, School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, 2009.
- Turton T.J., Dalzel-Job, J. and Livingstone, F. (2005), “*Oil Platforms, Destroyers and Frigates – Case Studies of QinetiQ’s Marine Composite Patch Repairs*”, Composites Part A, **36**, 2005, 1066-1072.

Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

ASM International, Material Data Sheets,

<http://products.asminternational.org/datasheets/index.jsp>

<http://www.fibermax.gr>

Composite Patch Repair for Marine and Civil Engineering Infrastructure Applications - Co-Patch,

<http://www.co-patch.com>