



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ
ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ
ΠΛΑΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ
ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΤΑΜΑΔΑΚΗΣ ΑΡΗΣ

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ
ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ
ΠΛΑΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ
ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΤΑΜΑΔΑΚΗΣ ΑΡΗΣ

Τριμελής επιτροπή:

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ.
ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ**

Αναπληρωτής Καθηγητής

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Ι.
ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ**

Καθηγητής

**ΜΑΝΩΛΗΣ Σ.
ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ**

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	Σελ.
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	1
1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	3
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
2.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (PREPROCESSING).....	21
2.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείων (Element Type).....	21
2.2.2 Μηχανικές ιδιότητες των υλικών (Material properties).....	23
2.2.3 Σχεδίαση της κατασκευής (Modeling).....	23
2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ (SOLUTION).....	28
2.4 ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (POSTPROCESSING).....	28
2.5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	
3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	37
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	38
3.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	40
3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	44
3.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	49
3.6 ΘΑΛΑΜΟΣ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ.....	52
3.6.1 Δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης σε κλιματικούς θαλάμους.....	52
3.6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά θαλάμου.....	55
3.6.3 Πρότυπο ISO 14993:2001.....	57
3.6.4 Τοποθέτηση δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης.....	57
3.7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΑΞΟΝΙΚΗ ΑΚΑΜΨΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ.....	60
4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ.....	68
4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ.....	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

5.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	83
5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	98
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	99
6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	100
6.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ...	101

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	102
--------------------------	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας μοντελοποίησης πειραμάτων σε ANSYS.....	105
---	-----

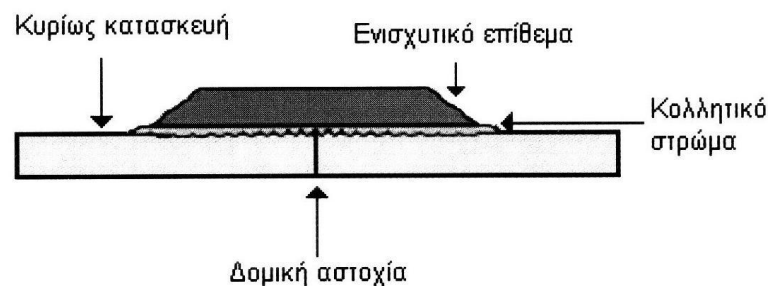
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η χρήση επιθεμάτων ως μέσο πρόχειρης και γρήγορης επισκευής, από τη συμπίεση στο ελαστικό ενός αυτοκινήτου μέχρι την άτρακτο ενός αεροσκάφους, έχει μακρά ιστορία και θεωρείται ένας από τους γρηγορότερους και αποτελεσματικούς τρόπους επίλυσης των προβλημάτων που συνεπάγεται μια πιθανή αστοχία τους. Τα τελευταία χρόνια, η έκρηξη της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών και συγκεκριμένα των σύνθετων ενισχυμένων με ίνες (FRP-Fibre Reinforced Plastics) και των κολλητικών ουσιών υψηλής αντοχής, όχι μόνο έχει καταφέρει να καταστήσει αποτελεσματικότερες τις προσωρινές αυτές επισκευές, αλλά έχει οδηγήσει και στην ανάπτυξη μιας εξ ολοκλήρου νέας επιστήμης ανθεκτικών επισκευών για τις μεταλλικές και όχι μόνο κατασκευές, η οποία μπορεί να αποκαταστήσει πλήρως τη βλάβη και σε πολλές περιπτώσεις να επεκτείνει τον αρχικό χρόνο ζωής τους. Μερικά τυπικά παραδείγματα εφαρμογών έχουν αναφερθεί στην αεροπορική βιομηχανία, σε πολεμικά πλοία, στη γεφυροποιία, σε μεγάλες κτιριακές κατασκευές και φυσικά στη ναυπηγική βιομηχανία.

Σύμφωνα με τη νέα αυτή μέθοδο κατασκευάζεται επίθεμα από σύνθετα υλικά (ρητίνη-συνήθως εποξική, με ίνες-συνήθως γυαλιού ή άνθρακα ή βορίου), κατάλληλων διαστάσεων και αντοχής, όπου με τη βοήθεια κολλητικής ουσίας και με την κατάλληλη μεθοδολογία τοποθετείται στην προς επισκευή επιφάνεια (Σχήμα 1.1). Το επίθεμα αναλαμβάνει μέρος ή και το σύνολο των επιβαλλόμενων φορτίων ανακουφίζοντας την περιοχή στην οποία υπάρχει κάποια δομική αστοχία (ρωγμή, διάβρωση, λυγισμός) ή δεν έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ανταπεξέλθει στις ανωτέρω φορτίσεις (περιπτώσεις μετασκευών, κατασκευαστικών σφαλμάτων).



Σχήμα 1.1: Επίθεμα απο σύνθετα υλικά κολλημένο σε μεταλλικό έλασμα με δομική αστοχία.

Η αναγκαιότητα χρήσης της τεχνολογίας επιθεμάτων απο σύνθετα υλικά στη ναυπηγική πηγάζει από τις συχνά εμφανιζόμενες δομικές αστοχίες της μεταλλικής κατασκευής των

πλοίων, λόγω της συνεχόμενης καταπόνησής της σε μεγάλα φορτία. Οι δομικές αυτές αστοχίες, όπως ρωγμές, διαβρωμένες επιφάνειες και τοπικές παραμορφώσεις, παρουσιάζονται σε διάφορα μέρη της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου (γάστρα, υπερκατασκευές, κ.α.). Οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, όπως στην εναλλασσόμενη φόρτιση από τους κυματισμούς (hogging-sagging), στο έντονα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον και σε διάφορα ατυχήματα κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής τους ζωής. Από τους συνηθέστερους τύπους αστοχίας είναι η ανάπτυξη ρωγμών από κόπωση (fatigue cracking). Αμέσως μόλις εντοπιστεί η αστοχία, η μόνη επιτρεπόμενη ενέργεια είναι αυτή να επισκευαστεί, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε επιχειρησιακή ανετοιμότητα του πλοίου εάν απαιτηθεί έκτακτος δεξαμενισμός, με σημαντικές παραπέρα οικονομικές επιπτώσεις. Γίνεται αντιληπτή επομένως η ανάγκη για άμεση προσωρινή ή μόνιμη επισκευή, ώστε το πλοίο να συνεχίσει κανονικά τη λειτουργία του. Οι επισκευές με επίθεμα από σύνθετα υλικά φαίνονται ιδανικές σε αυτές τις καταστάσεις και έχουν αναφερθεί αρκετές περιπτώσεις επιτυχημένης επισκευής [Grabovac-2002, 2003, 2009].

Σε περιπτώσεις προγραμματισμένων δεξαμενισμών, οι επιδιορθώσεις των αστοχιών γίνονται με τις κλασσικές μεθόδους επισκευής σε ναυπηγικές κατασκευές, όπως με τη χρήση συγκολλήσεων και την εφαρμογή κοχλιωτών μεταλλικών επιθεμάτων. Αυτό συμβαίνει καθώς η χρήση της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων, ως μέθοδος επισκευών με μόνιμο χαρακτήρα δεν έχει εγκριθεί από τους αρμόδιους νηογνώμονες. Η τεχνολογία όμως των σύνθετων επιθεμάτων λύνει πολλά από τα προβλήματα των κλασσικών μεθόδων επισκευής, προσφέροντας μια εύκολη, οικονομική και προπάντων γρήγορη λύση, ενισχύοντας την κατασκευή και επαναφέροντας σε μεγάλο ποσοστό την αρχική ακαμψία και αντοχής της.

Οι επισκευές με σύνθετα επιθέματα αποδεικνύονται σημαντικά πιο οικονομικές σε σχέση με τις παραδοσιακές, επειδή δεν απαιτείται θερμική κατεργασία του επιθέματος σε υψηλές θερμοκρασίες, αποφεύγοντας πιθανό άδειασμα γειτονικών δεξαμενών του σκάφους ή της αναγκαίας-υποχρεωτικής διαδικασίας της αδρανοποίησης δεξαμενών φορτίου καυσίμων (gas free) που επιβάλλεται και προβλέπεται σε περίπτωση αποκοπής και συγκόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων. Επίσης αποφεύγεται η δημιουργία νέων σημείων συγκέντρωσης τάσεων, λόγω της απουσίας θερμικών τάσεων (συγκολλήσεις) και οπών (κοχλιωτά μεταλλικά επιθέματα). Οι επισκευές με σύνθετο επίθεμα μπορούν να γίνουν είτε μονόπλευρα, είτε αμφίπλευρα, σε αντίθεση με την εφαρμογή κοχλιωτών μεταλλικών επιθεμάτων όπου απαιτείται προσβασιμότητα και από τις δύο πλευρές του προς επισκευή ελάσματος.

Σε αντίθεση με τις κλασσικές μεθόδους, η ενίσχυση με επιθέματα από σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες άνθρακα (CFRP) είναι μια σχετικά πρόσφατη μέθοδος στη ναυπηγική και υπόσχεται ελκυστικότερες μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες, λόγω της ευκολίας τοποθέτησης του επιθέματος και των άριστων ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα. Αυτά τα σύνθετα υλικά προσδίδουν και ορισμένα πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά στην περιοχή τοποθέτησης που ενδιαφέρουν καίρια τη ναυπηγική επιστήμη όπως, χαμηλό βάρος, αντίσταση στη διάβρωση, χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, ανθεκτικότητα-αντοχή μακράς διάρκειας σε συνθήκες υπηρεσίας θαλάσσιου

περιβάλλοντος και επίσης ανθίστανται σθεναρά σε θραύση από κόπωση. Η τελευταία ιδιότητα είναι ιδιαίτερος σημαντική στις ναυπηγικές εφαρμογές διότι αυτές καταπονούνται εντονότατα σε περιοδικά φορτία (π.χ. λόγω κυματισμών) και οι επισκευές με επιθέματα από σύνθετα υλικά παρεμποδίζουν τη διάδοση ρωγμών, παρέχοντας εναλλακτικές γεωμετρικές διαδρομές αποφόρτισης των τάσεων και ανακουφίζοντας έτσι τη μεταλλική κατασκευή. Οι τάσεις μεταφέρονται από τη μεταλλική πλάκα που περιέχει το σφάλμα στις ίνες του επιθέματος μέσω διάτμησης, διαμέσου του στρώματος της κόλλας. Το μεγαλύτερο ίσως μειονέκτημα αποτελεί ο κίνδυνος αποκόλλησης του επιθέματος από την κυρίως κατασκευή εξαιτίας των ισχυρών διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο κολλητικό μέσο, κάτι που όμως μπορεί να αντιμετωπιστεί με κόλλες υψηλού μέτρου διάτμησης, καθώς και με κατάλληλη διαστασιολόγηση και επιλογή των υλικών του επιθέματος για ελαχιστοποίηση των διατμητικών τάσεων στα όρια της επισκευής.

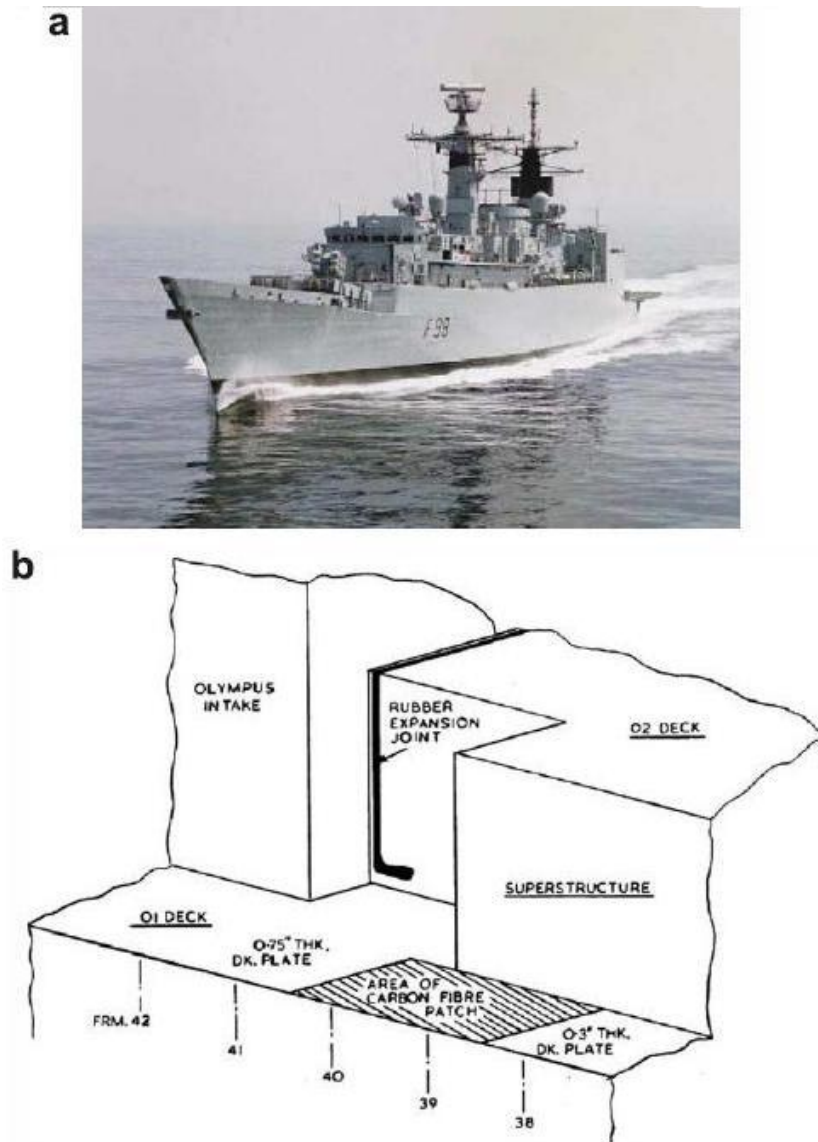
Η τεχνολογία των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά αποτελεί έναν ταχύτατα αναπτυσσόμενο κλάδο. Πολυάριθμες πειραματικές δοκιμές πραγματοποιούνται για τη βελτιστοποίηση και τη μελέτη της συμπεριφοράς των επιθεμάτων, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται σχετικά αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της συνολικής επισκευασμένης διατομής. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με εφαρμογές των σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική και παρουσιάζονται κάποιες από τις σημαντικότερες μελέτες και δημοσιεύσεις. Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται και η παρούσα διπλωματική εργασία, ο σκοπός της οποίας θα διασαφηνιστεί σε επόμενο εδάφιο.

1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Πρωτοπόρος στην εφαρμογή επιθεμάτων από σύνθετα υλικά σε μεταλλικά ελάσματα με τη χρήση κολλητικών μέσων, είναι η αεροπορική βιομηχανία. Η χρήση αλουμινίου σε αυτόν τον τομέα, το οποίο δεν επιδέχεται συγκόλληση ούτε χρήση κοχλιωτών μεταλλικών επιθεμάτων για την επιδιόρθωση ατελειών, οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων. Η χρήση σύνθετων επιθεμάτων τόσο στην αεροναυπηγική, όσο και στην αεροδιαστημική βιομηχανία είναι ευρεία εδώ και δεκαετίες και εξελίσσεται συνεχώς. Σε αυτό έχουν συντελέσει πολυάριθμες μελέτες για τη βελτίωση και την απαλειφή των δυσκολιών της χρήσης σύνθετων επιθεμάτων, με πρωτοπόρο τον αυστραλό Alan Baker ο οποίος πραγματοποίησε πολλές επισκευές με σύνθετα υλικά σε αεροσκάφη της πολεμικής αεροπορίας της Αυστραλίας και των ΗΠΑ, ενώ παράλληλα προχώρησε στην ανάπτυξη γενικευμένων μεθοδολογιών για την εφαρμογή επιθεμάτων. Η χρήση της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων επεκτάθηκε και σε άλλους τομείς και στη ναυπηγική βιομηχανία, με αρχικό πεδίο εφαρμογής τα πολεμικά σκάφη και μετέπειτα και τα εμπορικά.

Οι πρώτες μελέτες που προχώρησαν από τη θεωρία στην πράξη στη ναυπηγική βιομηχανία αφορούσαν την επισκευή ρωγμών στις αλουμινένιες υπερκατασκευές φρεγατών Amazon Class (Σχήμα 1.2) του πολεμικού ναυτικού της Μ. Βρετανίας τη δεκαετία του '80. Η επισκευή της ρωγμής μήκους 500 mm με συγκόλληση δεν απέδωσε καθώς αστόχησε σε μικρό χρονικό διάστημα, ενώ η χρήση μεταλλικών επιθεμάτων δεν ήταν δυνατή λόγω αδυναμίας διαμόρφωσής τους στην απαιτούμενη γεωμετρία. Για αυτό το λόγο

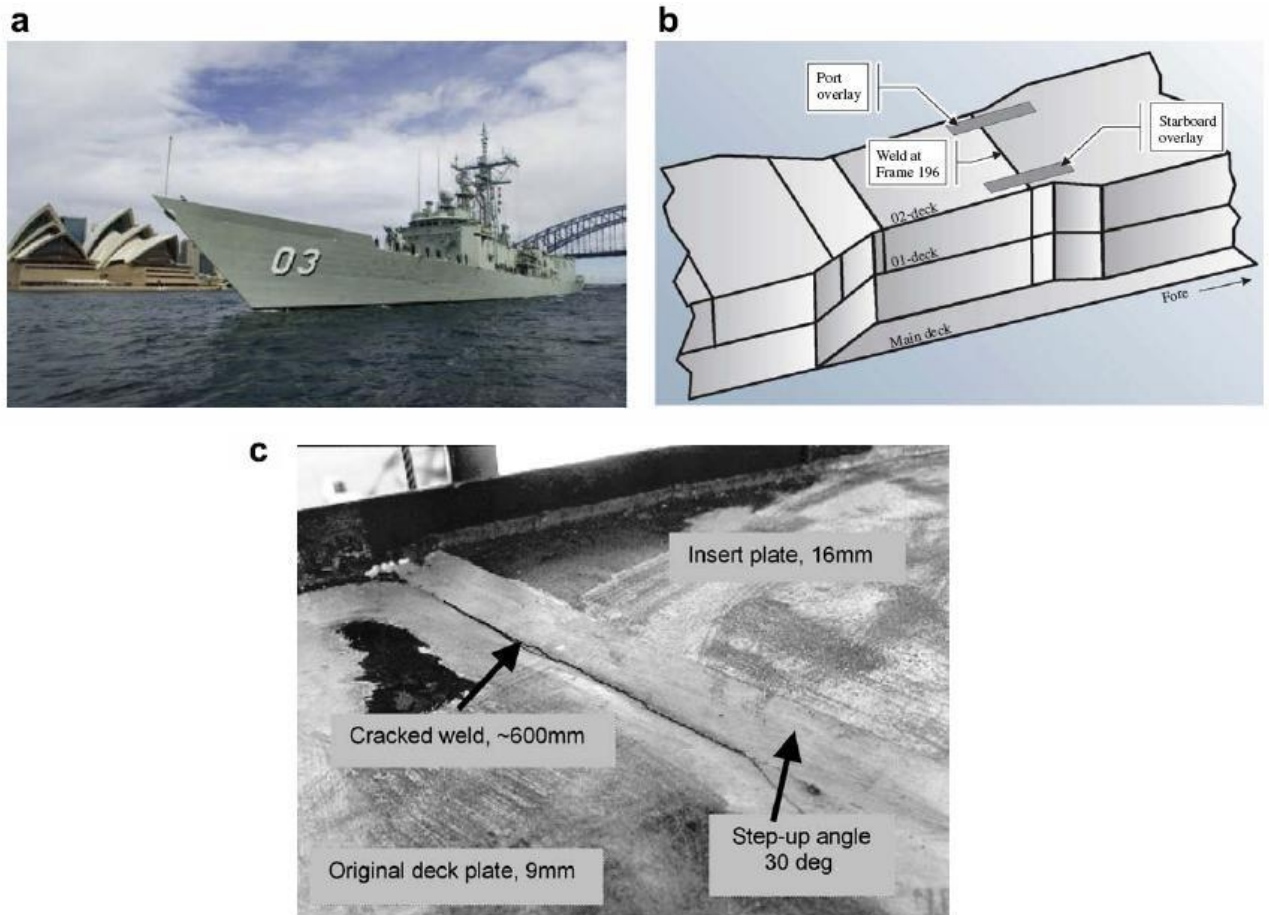
χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά επίθεμα από ίνες άνθρακα με εποξική ρητίνη για την επισκευή της ρωγμής, η οποία προηγουμένως είχε συγκολληθεί. Η τεχνική αυτή απέδωσε και επεκτάθηκε και στις υπόλοιπες φρεγάτες ίδιου τύπου χωρίς να παρουσιαστεί επανεμφάνιση της ρωγμής για τα επόμενα 10 χρόνια κατά τα οποία τα πλοία ήταν εν ενεργεία [Turton-2005].



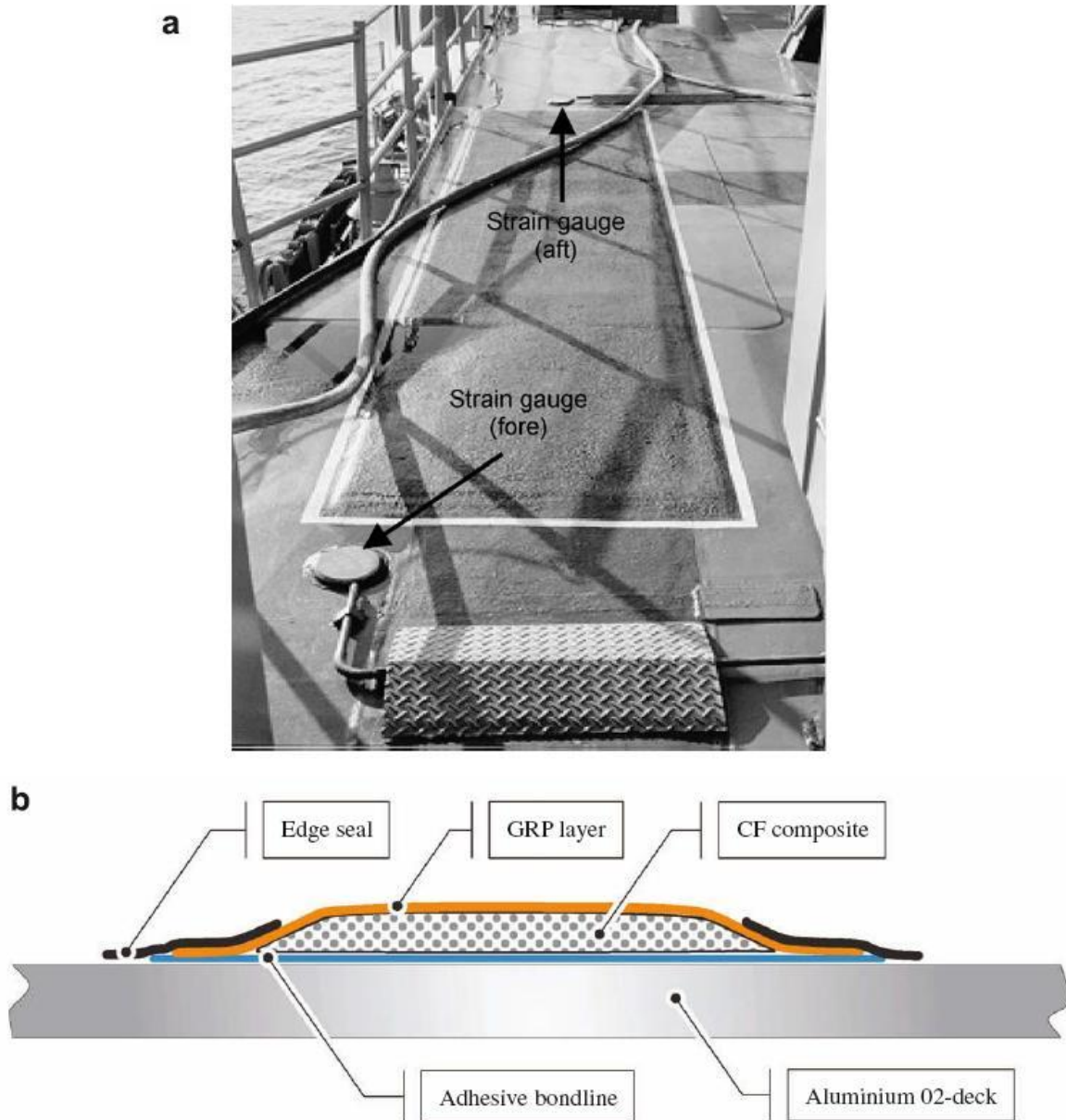
Σχήμα 1.2: (a) Φρεγάτα του RN κλάσης Amazon, (b) τοποθεσία της ρωγμής στις υπερκατασκευές και τοποθέτηση σύνθετου επιθέματος.

Η επιτυχία αυτής της μεθόδου επισκευής την κατέστησε ιδανική σε αντίστοιχες περιπτώσεις. Στα μέσα της δεκαετίας του '80 εμφανίστηκαν ρωγμές στις αλουμινένιες υπερκατασκευές των φρεγατών κλάσης FFG-7 (Σχήμα 1.3) του πολεμικού ναυτικού της Αυστραλίας (RAN). Οι προσπάθειες επισκευής των ρωγμών με συγκόλληση και με τοποθέτηση ενισχυτικών μεταλλικών επιθέματων ήταν ανεπιτυχείς με αποτέλεσμα την επανεμφάνιση των ρωγμών. Η λύση η οποία δόθηκε σε συνεργασία με τον οργανισμό Defence Science and Technology Organisation (DSTO) ήταν η τοποθέτηση σύνθετου

επιθέματος με ίνες άνθρακα, το οποίο προστατεύεται από τη διάβρωση από ένα στρώμα GRP, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Ύστερα από 15 χρόνια σε ενεργό δράση δεν έγινε επανεμφάνιση των ρωγμών στις φρεγάτες και οι εργασίες συντήρησης αφορούσαν κυρίως την αποκατάσταση του προστατευτικού στρώματος GRP, το οποίο είχε υποστεί μηχανικές φθορές και είχε διαβρωθεί από το θαλάσσιο περιβάλλον [Grabovac-2003, 2009].



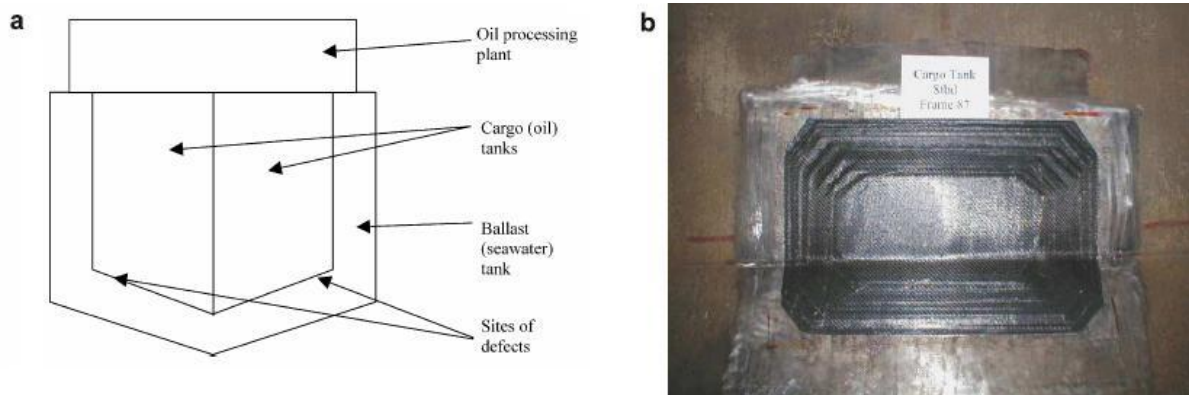
Σχήμα 1.3: (a) Η φρεγάτα ‘Sydney’ τύπου FFG-7 του RAN, (b) τοποθεσία των σύνθετων ενισχυτικών στο δεύτερο κατάστρωμα των υπερκατασκευών και (c) επανεμφάνιση ρωγμής μετά από ενίσχυσή της με μεταλλική πλάκα και συγκόλληση.



Σχήμα 1.4: (a) Επίθεμα τοποθετημένο στο διάδρομο υπερκατασκευής, (b) πλάγια όψη τομής του σύνθετου επιθέματος.

Η χρήση σύνθετων επιθεμάτων στα εμπορικά πλοία δεν είναι ακόμα τόσο διαδεδομένη, τα πλεονεκτήματα όμως αυτής της μεθόδου επισκευής τα καθιστούν ιδανικά σε αρκετές περιπτώσεις. Το 2002 επισκευάστηκαν τρεις ρωγμές που προκλήθηκαν από κόπωση στις δεξαμενές φορτίου ενός πλοίου FPSO στη Νορβηγία με τη χρήση σύνθετων επιθεμάτων, τα οποία αποτελούνταν από ίνες άνθρακα σε εποξική μήτρα (Σχήμα 1.5). Το FPSO είναι δεξαμενόπλοιο μόνιμα αγκυροβολημένο το οποίο χρησιμεύει σαν αποθήκη καυσίμων, οπότε επιλέχτηκε αυτή η μέθοδος επισκευής έναντι της συγκόλλησης καθώς δεν αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες (μέγιστη θερμοκρασία σκλήρυνσης της μήτρας: 60°C) και επομένως δε χρειάζεται να αδειάσουν και να καθαριστούν όλες οι δεξαμενές που συνορεύουν με την προς επισκευή δεξαμενή (για λόγους ασφαλείας), παρά μόνο η δεξαμενή που εμφάνισε τη

ρωγμή. Με αυτόν τον τρόπο η μείωση στην αποθηκευτική ικανότητα του πλοίου δεν ήταν μεγάλη κατά το διάστημα των εργασιών, διατηρώντας την επιχειρησιακή του ικανότητα και περιορίζοντας τις οικονομικές απώλειες στο ελάχιστο [Turton-2005].



Σχήμα 1.5: (a) Εγκάρσια τομή πλοίου FPSO και τοποθεσία ρωγμών στις δεξαμενές, (b) σύνθετο επίθεμα διαστάσεων 750×250 mm τοποθετημένο σε δεξαμενή φορτίου πλοίου FPSO για την επισκευή ρωγμής.

Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει η χρήση σύνθετων υλικών σε επισκευές όπου η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών είναι ανεπιθύμητη, εξετάζεται σε μελέτη του Νορβηγικού νηογνώμονα (DNV). Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη [McGeorge-2009] η χρήση σύνθετων επιθεμάτων για τον περιορισμό της διάδοσης ρωγμών από κόπωση μπορεί να γενικευτεί σε όλα τα πλοία που μεταφέρουν ή αποθηκεύουν προϊόντα πετρελαίου (FOUs, FPSO, FSO, Tanker, Product), περιορίζοντας παράλληλα τη χρήση των συγκολλήσεων και των θερμών εργασιών οι οποίες ενέχουν κινδύνους και επιβάλλουν άδειασμα των δεξαμενών και προσεκτικό καθαρισμό τους πριν την επισκευή. Κατά τη διάρκεια της μελέτης τοποθετήθηκαν σύνθετα επιθέματα σε ρωγμές που εμφανίστηκαν σε πλοίο τύπου FSO, με αποτέλεσμα την παύση της διάδοσης της ρωγμής. Οι επισκευές δεν έγιναν σε κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου τα οποία είναι κρίσιμα για την ακεραιότητά του και τη διατήρηση της πλευστότητάς του, καθώς δεν υπάρχουν ακόμα αρκετά στοιχεία ούτε πρακτικές εφαρμογές που να αποκλείουν την αστοχία τέτοιων επισκευών.

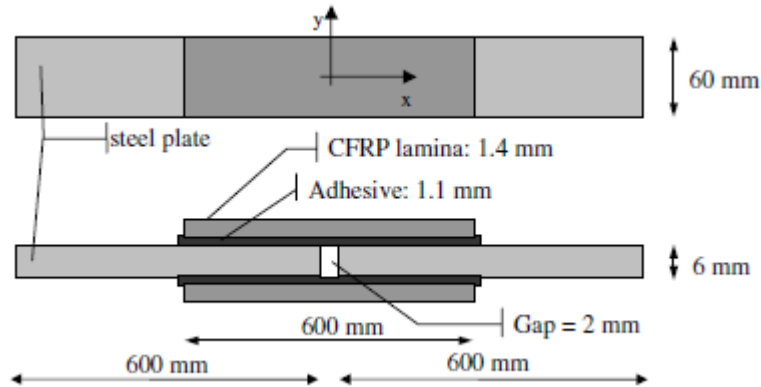
Παράλληλα με τις πρακτικές εφαρμογές σύνθετων επιθεμάτων σε πλοία πραγματοποιούνται έρευνες ώστε να διερευνηθεί περαιτέρω η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου επισκευής και να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματά της, με σκοπό την τυποποίηση των επισκευών με σύνθετα επιθέματα και την πιστοποίησή τους από τους νηογνώμονες. Οι έρευνες αυτές πραγματοποιούνται με την τέλεση πειραματικών δοκιμών όπου εξετάζονται διάφοροι παράγοντες όπως το προς επισκευή μέταλλο, τα υλικά των σύνθετων επιθεμάτων, η γεωμετρία κ.α. Οι περισσότερες έρευνες που γίνονται γύρω από τη μέθοδο αυτή, αφορούν πειράματα κόπωσης μιας και είναι η συχνότερη αιτία καταπόνησης των μετάλλων, ειδικότερα στις ναυπηγικές κατασκευές. Σπανιότερα συναντάμε στη βιβλιογραφία πειράματα όπου τα δοκίμια καταπονούνται σε εφελκυσμό. Παράλληλα γίνεται μοντελοποίηση των δοκιμών με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων για την ανάπτυξη μιας

αξιόπιστης μεθόδου υπολογισμού και πρόβλεψης της αποτελεσματικότητας της επισκευής. Ενδεικτικά μερικές από τις έρευνες αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Οι Okafor και Bhogaruraru [Okafor, Bhogaruraru–2006], έκαναν παραμετρική μελέτη μοντελοποιώντας με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων, ορθογωνική πλάκα αλουμινίου 2024 T3 με μήκος 457.2 mm και πλάτος 203.2 mm, μονόπλευρα ενισχυμένη με επίθεμα ινών βορίου. Το επίθεμα είχε μήκος 259.08 mm και πλάτος 196.85 mm. Το πάχος του αλουμινίου και ο αριθμός των στρώσεων του επιθέματος ήταν παράμετροι που εξετάστηκαν. Έγιναν αριθμητικά μοντέλα για πάχος αλουμινίου 3.175 mm με επίθεμα 7 και 11 στρώσεων και για πάχος αλουμινίου 6.35 mm με 19 και 22 στρώσεις επιθέματος. Το πάχος κάθε στρώσης ήταν 0.127 mm. Στο κέντρο του αλουμινίου υπήρχε τυφλή οπή διαμέτρου 25.4 mm, βάθους 2.54 mm και διαμετρής ρωγμή μήκους 12.7 mm, η οποία ξεκινούσε από τη μία άκρη της οπής και βρισκόταν στο εγκάρσιο επίπεδο συμμετρίας. Στα μοντέλα αυτά ασκήθηκε εφελκυστικό φορτίο 279 MPa. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ύπαρξη του επιθέματος μετατόπισε την περιοχή υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Ένω όταν δεν υπήρχε επίθεμα οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονταν στο μέτωπο της ρωγμής, με την ύπαρξη επιθέματος εμφανίστηκαν στο αλουμίνιο στην περιοχή μετά το άκρο του επιθέματος. Η μείωση της μέγιστης τάσης στο αλουμίνιο εξαιτίας του επιθέματος ήταν 26% - 37% , επίσης η μέγιστη τάση που εμφανίστηκε στο επίθεμα ήταν 1.2 – 1.5 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που έφερε το αλουμίνιο. Επίσης, η μέγιστη παραμόρφωση που έδειξε η ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για το αλουμίνιο, το επίθεμα και το κολλητικό μέσο ήταν 0.00313, 0.00133 και 0.0140 ανίστοιχα. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει πως πιθανότατα θα εμφανιστεί αστοχία πρώτα στο κολλητικό στρώμα, με αποτέλεσμα την γενική αστοχία του δοκιμίου. Στην έρευνα αυτή έγινε και πειραματική δοκιμή προς εκτίμηση της πιστότητας των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Ένα δοκίμιο πάχους 3.175 mm χωρίς επίθεμα και 4 δοκίμια με επίθεμα 7, 11, 19 και 22 στρώσεων ελέγχθηκαν σε εφελκυσμό. Το δοκίμιο χωρίς επίθεμα αστόχησε σε φορτίο 155,680 N ενώ τα δοκίμια με επίθεμα άντεξαν έως το μέγιστο φορτίο της μηχανής που ήταν 200,170 N. Παρατηρήθηκε πως η αστοχία στο επίθεμα άρχισε από το κολλητικό μέσο σαν αστοχία λόγω διάτμησης, επιβεβαιώνοντας τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την αριθμητική μοντελοποίηση.

Σε άλλη έρευνα πραγματοποιήθηκαν πειράματα εφελκυσμού σε ορθογωνικά χαλύβδινα δοκίμια, αμφίπλευρα ενισχυμένα με σύνθετο επίθεμα carbon-epoxy [Colombi, Roggi-2006]. Τρία δοκίμια είχαν μήκος 1200 mm, πλάτος 60 mm και πάχος 6 mm και στο ένα από αυτά υπήρχε κεντρική διαμετρής οπή διαμέτρου 20 mm. Το επίθεμα είχε μήκος 600 mm για τα δοκίμια χωρίς οπή και 480 mm για εκείνο με την οπή, πάχος 1.4 mm και κάλυπτε το πλάτος του δοκιμίου. Στα άκρα τους ασκήθηκε ομοιόμορφη εφελκυστική τάση. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως στα ενισχυμένα δοκίμια η τάση διαρροής (συμπεριλαμβανομένου και του δοκιμίου με την οπή), κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα με αυτή του μη ενισχυμένου. Η περιοχή υψηλής συγκέντρωσης τάσεων μεταφέρθηκε μακριά από το επίθεμα. Επίσης η αποκόλληση του επιθέματος σε όλες τις περιπτώσεις ξεκίνησε με την εμφάνιση αστοχίας στη διεπιφάνεια κόλλας-χάλυβα. Παράλληλα στα πλαίσια της ίδιας έρευνας έγιναν πειράματα σε τρία δοκίμια τα οποία αποτελούνταν από δύο τμήματα χάλυβα που επικαλύφθηκαν αμφίπλευρα με σύνθετο επίθεμα carbon-epoxy, ώστε να συγκρατούνται

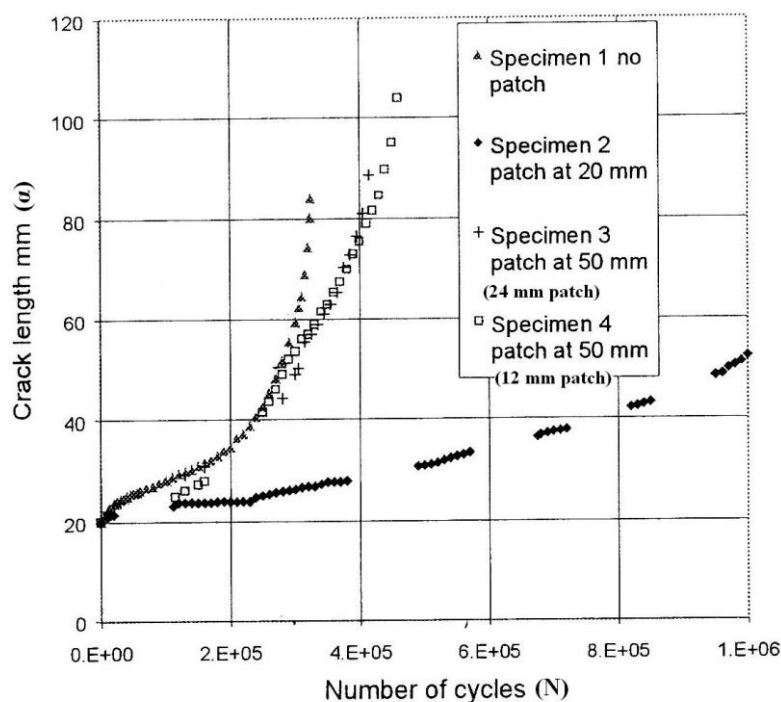
μεταξύ τους. Η γεωμετρία των δοκιμίων φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Το κενό των 2 mm μεταξύ των δύο τμημάτων χάλυβα προσομοίαζε την ύπαρξη μιας ρωγμής (ασυνέχεια υλικού). Τα αποτελέσματα έδειξαν πως και σε αυτή την περίπτωση η τάση διαρροής των δοκιμίων κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτή του δοκιμίου αναφοράς ενώ το μέγιστο φορτίο ήταν λίγο μεγαλύτερο από την τάση διαρροής στις δύο από τις τρεις περιπτώσεις και μικρότερο στην τρίτη. Το συμπέρασμα αυτής της έρευνας ήταν πως και σε περίπτωση ύπαρξης ρωγμής καθ' όλη τη διατομή ενός δοκιμίου, η ενίσχυση με επίθεμα επαναφέρει την αντοχή του δοκιμίου σε εφελκυσμό, στα αρχικά επίπεδα (χωρίς τη ρωγμή).



Σχήμα 1.6: Γεωμετρία δύο χαλύβδινων πλακών ενισχυμένων αμφίπλευρα με σύνθετο επίθεμα.

Άλλος σημαντικός παράγοντας για το μέγεθος της συνεισφοράς που έχει το σύνθετο επίθεμα στη μηχανική αντοχή δοκιμίων είναι και η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας του δοκιμίου όπου θα επιστρωθεί το επίθεμα. Ο παράγοντας αυτός είναι σημαντικός καθώς καθορίζει το πόσο καλή θα είναι η πρόσφυση μεταξύ του κολλητικού μέσου και του μετάλλου. Σε πειραματική έρευνα εφελκυσμού χαλύβδινων δοκιμίων με μονόπλευρη ενίσχυση με επίθεμα carbon-epoxy, εξετάστηκε αυτός ο παράγοντας [Tsouvalis, Mirisiotis-2007]. Τα δοκίμια είχαν 330 mm μήκος, 47 mm πλάτος και 4 mm πάχος. Το ολικό μήκος του επιθέματος ήταν 90 mm και το ενεργό 50 mm. Στο κέντρο του επιθέματος ανοίχτηκε κεντρική διαμετρής οπή διαμέτρου 14 mm. Τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι προετοιμασίας της επιφάνειας εφαρμόστηκαν. Έγινε προετοιμασία της επιφάνειας με ηλεκτρικό περιστρεφόμενο τριβείο, αμμοβολή με σκόνη από οξείδιο του αργιλίου No. 60-80, αμμοβολή με χαλύβδινα σφαιρίδια διαμέτρου 1.2 mm και αμμοβολή με ρινίσματα νικελίου. Στα άκρα των δοκιμίων ασκήθηκε ομοιόμορφο εφελκυστικό φορτίο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως υπάρχει αύξηση της τάσης αστοχίας από 30% έως 50% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν είχαν το επίθεμα. Παρατηρήθηκε πως η μέθοδος που δημιουργούσε μεγαλύτερη τραχύτητα στην επιφάνεια του χάλυβα έδινε και τη μεγαλύτερη αύξηση στην τάση αστοχίας. Καλύτερη μέθοδος αποδείχτηκε η αμμοβολή με ρινίσματα νικελίου ενώ η χειρότερη ήταν η μέθοδος με το ηλεκτρικό τριβείο. Εξαιτίας της μονόπλευρης ενίσχυσης παρατηρήθηκε κάμψη του δοκιμίου λόγω ασύμμετρης διατομής. Επίσης σημαντική ήταν η αύξηση της ελαστικής περιοχής σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.

Η εταιρεία QinetiQ πραγματοποίησε πειράματα κόπωσης σε κεντρικά ρωγματοωμένα χαλύβδινα δοκίμια, μονόπλευρα ενισχυμένα με σύνθετο επίθεμα carbon-epoxy [Turton-2005]. Τα δοκίμια είχαν 15 mm πάχος και 140 mm πλάτος, η αρχική ρωγμή είχε μήκος 20 mm και το σύνθετο επίθεμα είχε πάχος 24 mm. Στα άκρα των δοκιμίων επιβλήθηκε ομοιόμορφη τάση ίση με ± 100 MPa με συχνότητα 1.67 Hz, ώστε να προσομοιάζει στα κοπωτικά φορτία που αναπτύσσονται σε ένα πλοίο. Το ενισχυμένο δοκίμιο αύξησε τη διάρκεια ζωής του σε σχέση με το μη ενισχυμένο κατά ένα παράγοντα της τάξης του 3, φτάνοντας τους ένα εκατομμύριο κύκλους χωρίς να αστοχήσει, που αντιστοιχούν στην καταπόνηση 12 ετών σε ένα πλοίο. Παράλληλα ερευνήθηκε η επίδραση του πάχους του επιθέματος στη διάρκεια ζωής των δοκιμίων. Κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια με αρχική ρωγμή 20 mm και αφού καταπονήθηκαν σε κόπωση μέχρι η ρωγμή να φτάσει τα 50 mm, ενισχύθηκαν με σύνθετο επίθεμα πάχους 24 mm το ένα και 12 mm το άλλο και καταπονήθηκαν εκ νέου σε κόπωση μέχρι να στοχίσουν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι από το μήκος ρωγμής ίσο με 50 mm μέχρι το μήκος αστοχίας αύξησαν τη διάρκεια ζωής τους κατά ένα παράγοντα μεταξύ 2 και 4 σε σχέση με το μη ενισχυμένο δοκίμιο, με το λεπτότερο επίθεμα να δίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο δοκίμιο σε σχέση με το πιο παχύ. Τα αποτελέσματα φαίνονται γραφικά στο διάγραμμα $a-N$ του Σχήματος 1.7. Επισημαίνεται ότι η τοποθέτηση σύνθετου επιθέματος δεν σταματά εντελώς την ανάπτυξη της ρωγμής στο χάλυβα, αλλά απλά την καθυστερεί.

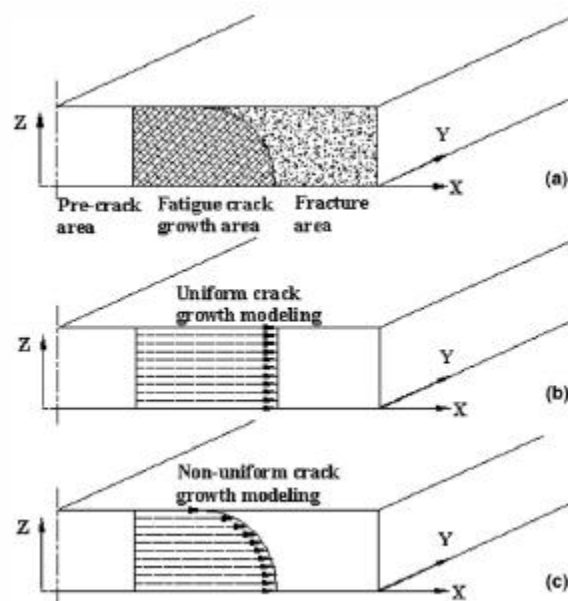


Σχήμα 1.7: Διάρκεια ζωής σε κόπωση για τα ενισχυμένα και μη δοκίμια.

Σε ανάλογα συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των σύνθετων επιθεμάτων καταλήγουν και άλλες έρευνες. Σε χαλύβδινα δοκίμια μήκους 660 mm, πλάτους 200 mm και πάχους 10 mm, με κεντρική διαμερή ρωγμή αρχικού μήκους 60 mm, τα οποία

ενισχύθηκαν με μονόπλευρο σύνθετο επίθεμα από ίνες άνθρακα με πλάτος 180 mm και συνολικό μήκος 300 mm διενεργήθηκαν δοκιμές κόπωσης [Μυρισιώτης-2006]. Στα δοκίμια επιβλήθηκε ομοιόμορφη τάση στα άκρα τους ίση με ± 100 MPa με συχνότητα ίση με 2 Hz. 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 σε μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια αλουμινίου η διάρκεια ζωής των δοκιμίων αυξήθηκε μεταξύ 2.4 με 5 φορές σε σχέση με τα μη ενισχυμένα δοκίμια [Chung-2003]. Η αποτελεσματικότητα της χρήσης σύνθετων επιθεμάτων είναι αποδεδειγμένη πειραματικά, όμως το ποσοστό της αύξησης του χρόνου ζωής του επισκευασμένου μετάλλου διαφέρει καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως από τα υλικά, τη γεωμετρία του μετάλλου και του σύνθετου επιθέματος, τη φόρτιση, το μήκος της αρχικής ρωγμής, κ.α.

Σε πειράματα κόπωσης σε κεντρικά ρωγματωμένα 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. 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 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% [Hosseini-2006]. Τα πειράματα μοντελοποιήθηκαν με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων ώστε να ερευνηθεί η σύμπτωση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά. Η μοντελοποίηση για τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια έγινε προσομοιώνοντας το μέτωπο της ρωγμής με ευθεία και με μη ομοιόμορφη καμπύλη γραμμή (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8: Μοντελοποίηση του πραγματικού μετώπου ρωγμής (a), με ευθεία (b) και με καμπύλη (c) γραμμή.

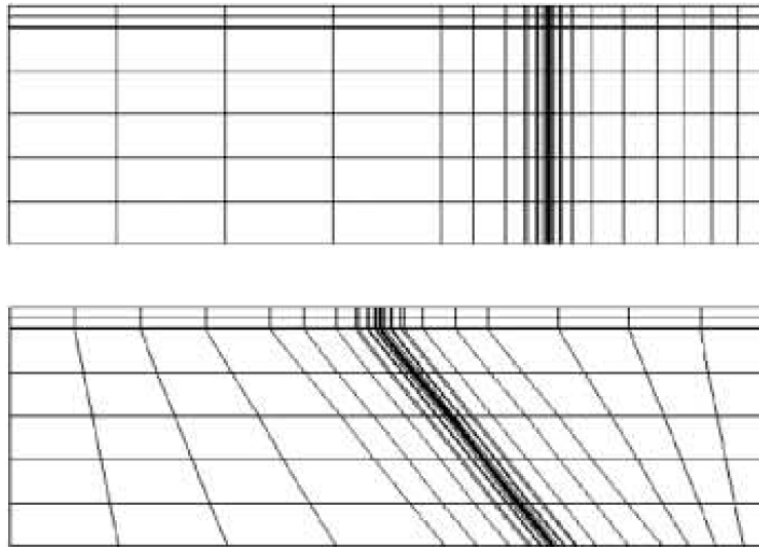
Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με ευθύ μέτωπο ρωγμής, λαμβάνοντας υπόψη το Συντελεστή Έντασης Τάσης του μεσαίου και του εξωτερικού κόμβου προς την ανεπισκεύαστη πλευρά, υπολόγισαν διάρκεια ζωής για τα δοκίμια με μεγάλες αποκλίσεις, ενώ οι αποκλίσεις της μοντελοποίησης με καμπυλόγραμμο μέτωπο ρωγμής ήταν ελάχιστες σε σχέση με τα πειραματικά. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε μία απλή μεθοδολογία, η οποία βασίστηκε σε παραμετρική μελέτη και δίνει πολύ κοντινά αποτελέσματα με τα πειραματικά χρησιμοποιώντας την προσομοίωση με ευθύ μέτωπο ρωγμής που απαιτεί λιγότερο χρόνο και εξειδίκευση από τη μοντελοποίηση με λοξό μέτωπο. Οι Lee και Lee [Lee-2004] μοντελοποίησαν με τη ΜΠΣ μονόπλευρα ενισχυμένες πλάκες αλουμινίου διαφόρων παχών, για να μελετήσουν τη διάδοση της ρωγμής από κόπωση. Ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για τη μη ομοιόμορφη μοντελοποίηση του μετώπου της ρωγμής κατά το πάχος του μετάλλου, ώστε να προσομοιάζει στο πραγματικό μέτωπο ρωγμής (Σχήμα 1.9). Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει μη γραμμική ανάλυση για τον υπολογισμό του ΣΕΤ σε διάφορους κόμβους κατά το πάχος του ελάσματος, υπολογισμό της διάδοσης της ρωγμής σε κάθε κόμβο και επανασχεδιασμό του μετώπου της ρωγμής για κάθε διαφορετικό μήκος ρωγμής. Τα αποτελέσματα που δίνει για τη διάρκεια ζωής των αλουμινένιων ελασμάτων έχουν ελάχιστες αποκλίσεις από τα πειραματικά, προβλέποντας με επιτυχία τη συμπεριφορά σε κόπωση των δοκιμίων με μοναδικό μειονέκτημα τους πολύ αυξημένους χρόνους υπολογισμού. Σε αντίθεση με την προαναφερθείσα μελέτη [Hosseini-2006], οι Lee και Lee καταλήγουν ότι για αυξημένα πάχη ελασμάτων (>6 mm) η μοντελοποίηση με ευθύ μέτωπο ρωγμής δίνει πολύ καλά αποτελέσματα, με μέγιστη απόκλιση 9.5% από τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με καμπυλόγραμμο μέτωπο ρωγμής. Το ποσοστό αυτό της απόκλισης για πάχη ελασμάτων μικρότερα των 6 mm φτάνει μέχρι και 46.5%. Οπότε, ενώ για μικρά πάχη ελασμάτων η μοντελοποίηση με καμπυλόγραμμο μέτωπο της ρωγμής είναι αναγκαία, για μεγαλύτερα πάχη μπορεί να γίνει μοντελοποίηση με ευθύ μέτωπο, εξασφαλίζοντας ικανοποιητική ακρίβεια σε σχέση με τα πειραματικά απαιτώντας πολύ μικρότερους υπολογιστικούς χρόνους.



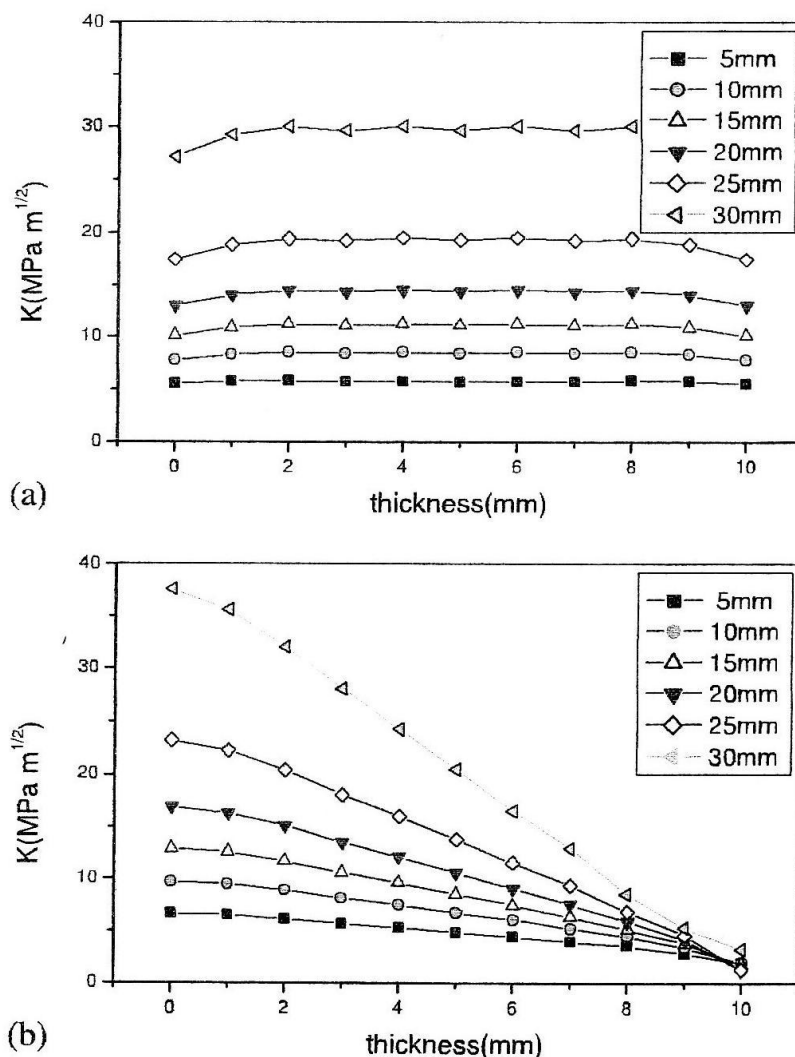
Σχήμα 1.9: Καμπυλόγραμμο μέτωπο ρωγμής από κόπωση κατά το πάχος μονόπλευρα ενισχυμένου ελάσματος αλουμινίου.

Παρά τα αποδεδειγμένα καλά αποτελέσματα που δίνει η καμπυλόγραμμη μοντελοποίηση του μετώπου της ρωγμής, η οποία προσομοιάζει στο πραγματικό μέτωπο, η απαίτηση για αυξημένους υπολογιστικούς χρόνους και εξειδίκευση την καθιστά δύσχρηστη. Για αυτό το λόγο οι έρευνες στρέφονται σε μεθόδους μοντελοποίησης, οι οποίες δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα εύκολα και γρήγορα. Οι Seo και Lee [2002] μοντελοποίησαν πειράματα

κόπωσης σε μονόπλευρα ενισχυμένες με σύνθετο επίθεμα (carbon-epoxy) πλάκες αλουμινίου, όπου το μέτωπο της ρωγμής προσομοιώθηκε με ευθεία και με λοξή γραμμή (Σχήμα 1.10). Το αλουμινένιο δοκίμιο είχε πάχος 10 mm, πλάτος 70 mm, με αρχικό μήκος ρωγμής 10 mm και οι διαστάσεις του επιθέματος ήταν $70 \times 70 \times 1$ mm. Στο μοντέλο με ευθεία γραμμή το μέτωπο της ρωγμής ήταν παράλληλο στη διεύθυνση του πάχους του μετάλλου, ενώ στο μοντέλο με λοξή γραμμή υπολογίστηκε ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής μόνο στην ανεπισκεύαστη και επισκευασμένη πλευρά του μετάλλου και ενώθηκαν με γραμμή η οποία ήταν λοξή σε σχέση με το πάχος του αλουμινίου. Λόγω της μεγάλης διακύμανσης του ΣΕΤ κατά το πάχος του αλουμινίου (Σχήμα 1.11), υπολογίστηκαν και συγκρίθηκαν αρκετοί συνδυασμοί και μέσοι όροι των ΣΕΤ των διαφόρων κόμβων κατά το πάχος του μετάλλου. Τελικά κατέληξαν ότι με τη χρήση του μέσου όρου των τιμών του ΣΕΤ που υπολογίστηκαν για το μισό πάχος του αλουμινίου προς την ελεύθερη, μη ενισχυμένη επιφάνεια και με τη χρήση της μέσης τιμής της ρίζας των τετραγώνων (RMS) όλων των τιμών του ΣΕΤ κατά το πάχος του μετάλλου, προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια η πειραματικά μετρημένη διάρκεια ζωής των δοκιμίων, ανεξάρτητα από τον τρόπο μοντελοποίησης του μετώπου της ρωγμής. Στην ίδια λογική σε μοντελοποίηση μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων χάλυβα σε κόπωση, η διάρκεια ζωής των δοκιμίων υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη το μέσο όρο των τιμών του ΣΕΤ που υπολογίστηκαν για το μισό πάχος του χάλυβα προς την ελεύθερη, μη ενισχυμένη πλευρά [Tsouvalis-2007]. Το μέτωπο της ρωγμής μοντελοποιήθηκε με ευθεία γραμμή και τα αποτελέσματα εμφάνισαν πολύ μικρές αποκλίσεις από τα πειραματικά. Το πάχος των χαλύβδινων δοκιμίων ήταν 4 mm, το πλάτος 140 mm, το αρχικό μήκος ρωγμής ήταν 80 mm, ενώ το επίθεμα από μονοδιευθυντικές ίνες άνθρακα είχε ίδιο πλάτος με το μέταλλο και μήκος ίσο με 300 mm.



Σχήμα 1.10: Μοντελοποίηση του μετώπου της ρωγμής με ευθεία και με λοξή γραμμή.



Σχήμα 1.11: Διακύμανση του ΣΕΤ κατά το πάχος του μετάλλου για διάφορα μήκη ρωγμής: (α) δοκίμιο χωρίς επίθεμα, (β) μονόπλευρα ενισχυμένο με σύνθετο επίθεμα δοκίμιο.

Τα τελευταία χρόνια οι έρευνες στρέφονται στις επιπτώσεις που έχει η γήρανση των σύνθετων υλικών στις ιδιότητές τους και στην αποτελεσματικότητά τους στην επισκευή αστοχιών. Τα σύνθετα υλικά, κατά τη διάρκεια της υπηρεσιακής τους ζωής, εκτίθενται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, επίπεδα υγρασίας και οξειδωτικές συνθήκες, με αποτέλεσμα τη μείωση των ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητάς τους. Λόγω της μειωμένης απόδοσης των σύνθετων υλικών υπό αυτές τις συνθήκες, οι συντελεστές ασφαλείας κατά τη φάση της σχεδίασης των κατασκευών και των επισκευών με σύνθετα υλικά κυμαίνονται μεταξύ 1.5 με 4. Για αποδοτικότερη χρήση των σύνθετων υλικών, είναι αναγκαία η καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε κόπωση υπο συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας και υγρασίας [Chateauinois-1992].

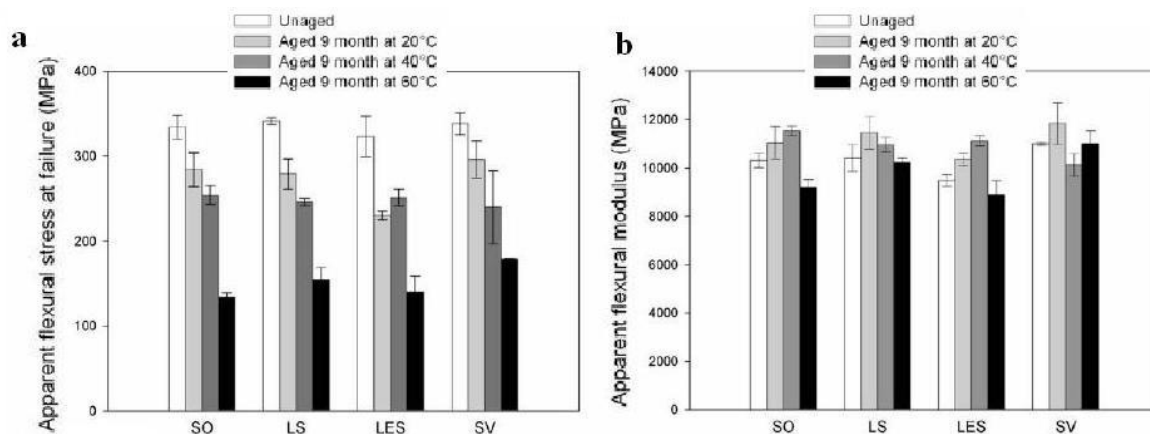
Η γήρανση των σύνθετων υλικών διαχωρίζεται σε φυσική γήρανση και χημική. Μερικοί από τους παράγοντες που επιδρούν στη φυσική γήρανση είναι η θερμική διαστολή, η χαλάρωση και η απορρόφηση υγρασίας, ενώ η χημική γήρανση προκαλείται από υδρόλυση, οξείδωση, ακτινοβολία και θερμική αποσύνθεση [Branca-2004].

Πολλές μελέτες εστιάζουν στις επιπτώσεις της θερμικής οξειδωτικής γήρανσης των σύνθετων υλικών. Σύμφωνα με μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι η θερμική γήρανση των σύνθετων υλικών επιφέρει απώλεια μάζας, αλλαγές στη θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού και σημαντική μείωση της μηχανικής αντοχής, ενώ η χημική υποβάθμιση των σύνθετων βασίζεται έντονα στη συγκέντρωση οξυγόνου στο περιβάλλον και στη γεωμετρία τους. Η θερμική οξειδωτική γήρανση των σύνθετων βασίζεται στην επιβολή αυξομειώσεων της θερμοκρασίας σε οξειδωτικό περιβάλλον και αφορά κυρίως την αεροναυπηγική. Οι Lafarie [2006] και Bellenger [2005] υπέβαλλαν δοκίμια με ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη σε κυκλικές εναλλαγές θερμοκρασίας (1000/500 cycles, max Temperature= +180°C, min Temperature= -50°C), οι οποίες προκάλεσαν αστοχίες στα δοκίμια όπως ρωγμές στη μήτρα των σύνθετων, αποκόλληση των ινών και της μήτρας και αποχωρισμό των στρώσεων. Οι αστοχίες αυτές, οι οποίες ήταν ίδιου τύπου με αυτές που προκαλούνται από καταπόνηση σε κόπωση, επιδεινώθηκαν με την παρουσία οξειδωτικού περιβάλλοντος (ξηρός αέρας, οξυγόνο, άζωτο), προκαλώντας απώλεια μάζας, αύξηση της πυκνότητας και συρρίκνωση του επιφανειακού στρώματος του σύνθετου. Οι συνθήκες επηρεάζουν κατά βάση τη μήτρα του σύνθετου και όχι τις ίνες άνθρακα.

Τη ναυπηγική αφορά κυρίως η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών κάτω από συνθήκες αυξημένης υγρασίας και θερμότητας, για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ο Chateauminois [1992] τοποθέτησε δοκίμια από ίνες γυαλιού σε εποξική μήτρα σε απεσταγμένο νερό για διάστημα 100 ημερών. Η θερμοκρασία του νερού διέφερε για κάθε δοκίμιο και κυμαινόταν μεταξύ 30 και 90°C. Μερικά από τα δοκίμια αφού εκτέθηκαν στο νερό, τοποθετήθηκαν σε φούρνο κενού σε θερμοκρασία δωματίου, ώστε να στεγνώσουν και να διαπιστωθεί η αναστρέψιμη ή μη φύση της αλλαγής στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων μετά την έκθεση στο νερό. Τα δοκίμια καταπονήθηκαν σε δοκιμές στατικής κόπωσης με λόγο τάσεων $R=1$. Η απορρόφηση νερού από τα σύνθετα προκάλεσε μείωση στην αντοχή και στην τάση αστοχίας τους. Μέχρι τους 50°C οι απώλειες στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων επανακτήθηκαν μετά το στέγνωμα, δεν συνέβη όμως το ίδιο στους 70 και 90°C όπου οι απώλειες αυτές ήταν μη αναστρέψιμες. Η διάρκεια ζωής των δοκιμίων μειώθηκε σε όλα τα δοκίμια που υπέστησαν γήρανση, σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς, με την εξής διαφορά: μέχρι τους 50°C, η μείωση της διάρκειας ζωής δεν ήταν εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, η αστοχία επήλθε λόγω των θλιπτικών φορτίων και μετά το στέγνωμα οι ιδιότητες και η διάρκεια ζωής επανήλθαν στα κανονικά επίπεδα. Στους 70 και 90°C, η μείωση της διάρκειας ζωής εξαρτώταν από τη θερμοκρασία, δεν επανήλθε μετά το στέγνωμα και προκλήθηκε από τα εφελκυστικά φορτία. Σε αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές διερευνήθηκε η επίδραση που είχε στη διάρκεια ζωής σε κόπωση δοκιμίων glass-epoxy, η έκθεση σε αυξημένη θερμοκρασία και επίπεδα υγρασίας [Vauthier-1998]. Τα δοκίμια εκτέθηκαν σε σχετική υγρασία 60% σε θερμοκρασία 50 και 70°C, προσομοιώνοντας την απορρόφηση υγρασίας που θα είχαν τα δοκίμια ύστερα από δύο χρόνια φυσικής γήρανσης στη Γαλλία και την Τυνισία αντίστοιχα. Οι πειραματικές δοκιμές κόπωσης διενεργήθηκαν σε περιβάλλον με διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασιών και ποσοστών υγρασίας. Η θερμική γήρανση με την παρουσία υγρασίας, μείωσε δραστικά τη διάρκεια ζωής των δοκιμίων λόγω της πλαστικοποίησης της μήτρας με την απορρόφηση υγρασίας και της αποδυνάμωσης των

γυμνών ινών γυαλιού στις σχηματιζόμενες κατά την κόπωση ρωγμές. Η παρουσία υγρασίας κατά τη διάρκεια των δοκιμών επιδείνωσε το φαινόμενο, οδηγώντας σε μεγαλύτερο ρυθμό διάδοσης των ρωγμών, ειδικά στις αυξημένες θερμοκρασίες.

Σε άλλες έρευνες μελετάται η γήρανση σύνθετων υλικών σε θαλασσινό νερό και οι επιπτώσεις της στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων. Ύστερα από επιταχυνόμενη γήρανση σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών γυαλιού σε θαλασσινό νερό διαφόρων θερμοκρασιών, ελέγχθηκαν με δοκιμές εφελκυσμού οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων [Maurin-2009]. Οι θερμοκρασίες του θαλασσινού νερού ήταν: 20, 40 και 60°C και ο χρόνος παραμονής ήταν σε κάθε περίπτωση εννέα μήνες. Δοκιμάστηκαν διάφοροι τύποι ρητινών που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές εφαρμογές. Η απορρόφηση νερού από τη ρητίνη οδήγησε σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και σημαντική μείωση της τάσης αστοχίας των σύνθετων δοκιμών συγκριτικά με τα μη γηρασμένα δοκίμια (Σχήμα 1.12). Το ίδιο παρατηρήθηκε για όλα τα είδη των ρητινών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.12, η αύξηση της θερμοκρασίας επιδείνωσε τα φαινόμενα. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η μείωση του μέτρου ελαστικότητας στους 60°C. Ο Kootsookos [2004] βύθισε δοκίμια glass-epoxy και carbon-epoxy σε θαλασσινό νερό θερμοκρασίας 30°C για διάστημα δύο ετών. Παρατηρήθηκε, ότι τα δοκίμια που ήταν κατασκευασμένα με ίνες γυαλιού απορρόφησαν περισσότερο νερό από αυτά με ίνες άνθρακα και εμφάνισαν μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Πιθανότερη αιτία είναι η διαφορά του μεγέθους των ινών, καθώς οι μικρότερες σε μέγεθος ίνες γυαλιού διευκόλυναν την απορρόφηση υγρασίας στην επιφάνεια μεταξύ των ινών και της μήτρας.



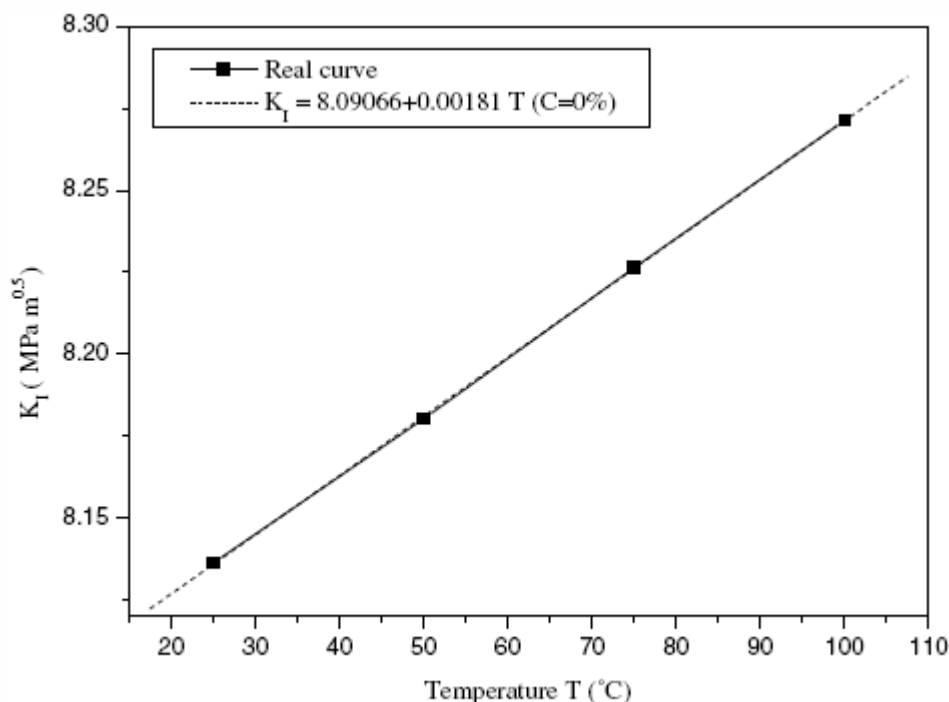
Σχήμα 1.12: Τάση αστοχίας (a) και μέτρο ελαστικότητας (b) σύνθετων υλικών ύστερα από γήρανση εννέα μηνών σε θαλασσινό νερό και σε θερμοκρασίες 20, 40 και 60°C.

Πέρα από την επίδραση που έχει στις ιδιότητες των σύνθετων υλικών η γήρανση και η φόρτιση σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, τα τελευταία χρόνια πολλές έρευνες επικεντρώνονται στην αποτελεσματικότητα των επισκευών με σύνθετα επιθέματα κάτω από περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως αυξημένη υγρασία και θερμοκρασία, που αντιμετωπίζουν τα σύνθετα επιθέματα κατά τη διάρκεια της υπηρεσιακής τους ζωής. Σε πειραματικές δοκιμές κόπωσης σε αμφίπλευρα ενισχυμένα ελάσματα αλουμινίου με κεντρική ρωγμή εξετάστηκε η επίδραση στη διάρκεια ζωής των ελασμάτων της θερμοκρασίας και της

παρουσίας υγρασίας, κατά τη διάρκεια των δοκιμών [Ergun-2010]. Το σύνθετο επίθεμα αποτελούνταν από ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη και οι δοκιμές έγιναν για διάφορα πάχη μετάλλου και επιθέματος. Τα δοκίμια καταπονήθηκαν σε δοκιμές κόπωσης με συχνότητα 10 Hz, λόγο τάσεων $R=0.05$, ενώ η μέγιστη ομοιόμορφη τάση που αναπτύχθηκε στα άκρα των δοκιμίων ήταν 150 MPa. Οι πειραματικές δοκιμές επαναλήφθηκαν για διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασιών (από -20 έως 100°C) και υγρασίας (κανονικά επίπεδα υγρασίας: 45% και υψηλά επίπεδα: 85%). Παράλληλα μετρήθηκαν στις διάφορες συνθήκες οι μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου και του σύνθετου επιθέματος και λήφθηκαν υπόψη στη μοντελοποίηση που έγινε με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Τα πειράματα έδειξαν, ότι με την άνοδο της θερμοκρασίας μειώνεται η διάρκεια ζωής των δοκιμίων σε κόπωση. Η μείωση αυτή είναι εντονότερη στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες (100°C), όπου η διάρκεια ζωής των δοκιμίων μειώθηκε κατά τέσσερις φορές σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που καταπονήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου. Ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία, τα ενισχυμένα δοκίμια αστόχησαν σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων σε σχέση με τα μη ενισχυμένα. Το ποσοστό όμως της αύξησης της διάρκειας ζωής μεταξύ ενισχυμένων και μη δοκιμίων επηρεάστηκε από τη θερμοκρασία, καθώς το ποσοστό αυτό για τα δοκίμια που καταπονήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου ήταν δεκατέσσερις φορές μεγαλύτερο, σε σχέση με το αντίστοιχο των δοκιμίων που καταπονήθηκαν στη μέγιστη θερμοκρασία. Στην κατώτερη θερμοκρασία (-20°C) η διάρκεια ζωής των δοκιμίων αυξάνει. Η επίδραση της υγρασίας στις ιδιότητες του σύνθετου επιθέματος δεν αποδείχτηκε ιδιαίτερα σημαντική, παρουσιάζοντας μέγιστο ποσοστό μείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων του επιθέματος ίσο με 4-5% στη μέγιστη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης εμφάνισαν πολύ μικρές αποκλίσεις από τα πειραματικά.

Ο Megueni [2003] ερεύνησε την αποτελεσματικότητα ενίσχυσης ρωγματομένης μεταλλικής πλάκας με σύνθετο επίθεμα, το οποίο είχε υποστεί γήρανση. Το σύνθετο επίθεμα αποτελούνταν από ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη και πριν τοποθετηθεί στα αλουμινένια ελάσματα, τοποθετήθηκε σε νερό διαφορετικών θερμοκρασιών (20, 46 και 72°C) για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (529, 529 και 225 ημέρες αντίστοιχα). Προκαταρκτικά πειράματα που έγιναν στα σύνθετα επιθέματα, έδειξαν ότι η απορρόφηση νερού αυξάνει με την άνοδο της θερμοκρασίας και ανάλογα μειώνονται οι μηχανικές τους ιδιότητες. Τα ρωγματομένα δοκίμια ενισχύθηκαν με τα γηρασμένα επιθέματα και τους επιβλήθηκε εφελκυστική τάση 70 MPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν, ότι ενώ τα σύνθετα επιθέματα που δεν υπέστησαν γήρανση μείωσαν το ΣΕΤ του μετάλλου κατά ένα ποσοστό της τάξης του 90%, στα δοκίμια που ενισχύθηκαν με γηρασμένα επιθέματα (απορρόφηση νερού κατά 1.46%) το ποσοστό αυτό έπεσε στο 70%. Η αρνητική επίδραση λοιπόν ενός γηρασμένου σύνθετου επιθέματος, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε ανάλογες επισκευές. Ο Megueni [2007] χρησιμοποίησε τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων για να αναλύσει την εξέλιξη του ΣΕΤ για ρωγμές που έχουν ενισχυθεί με γηρασμένα σύνθετα επιθέματα. Χρησιμοποίησε αναλυτικούς τύπους με τους οποίους υπολόγισε το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας, σύμφωνα με τη θερμοκρασία και την υγρασία. Με βάση αυτούς τους υπολογισμούς υπολόγισε τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου επιθέματος. Συμπαίρανε, ότι οι μηχανικές ιδιότητες ενός γηρασμένου σύνθετου επιθέματος έχουν

γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με τη θερμοκρασία και την υγρασία. Ανάλογη γραμμική συμπεριφορά έχει και ο ΣΕΤ στο μέτωπο της ρωγμής του μετάλλου, σε σχέση με τη θερμοκρασία (Σχήμα 1.13), ενώ η υγρασία έχει μικρή επίδραση σε αυτόν.



Σχήμα 1.13: Γραμμική συμπεριφορά ΣΕΤ σε σχέση με τη θερμοκρασία.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα προτερήματα που παρουσιάζουν οι επισκευές και οι ενισχύσεις με σύνθετα επιθέματα σε σχέση με τους συνήθεις τύπους επισκευών καθιστούν αναγκαία την καθιέρωσή τους στη ναυπηγική. Η χρήση όμως της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων στον τομέα των ναυπηγικών επισκευών δεν είναι εξίσου διαδεδομένη όπως σε άλλους τομείς, για παράδειγμα στην αεροναυπηγική. Η ευρεία χρήση της τεχνολογίας εμποδίζεται από τη μη ύπαρξη κανονισμών και σταδίων μεθοδολογίας, που μπορούν να ακολουθηθούν για την τυποποίηση των εργασιών, από τη φάση του σχεδιασμού ως την εφαρμογή των επιθεμάτων και την τυποποίηση ποιότητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε περίπτωση να αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστή, κάτι που σημαίνει μελέτη της επισκευής από την αρχή, αυξημένο χρόνο προετοιμασίας και αβέβαια αποτελέσματα. Για να επιτευχθεί η τυποποίηση αυτή θα πρέπει καταρχάς να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται η παρούσα διπλωματική εργασία, όπου με τη διενέργεια πειραμάτων εφελκυσμού και με τη μοντελοποίησή τους με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων, αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα των επισκευών με σύνθετα επιθέματα και την καταλληλότητα της χρήσης τους στη ναυπηγική.

Σκοπός λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη μέσω πειραματικών δοκιμών της συμπεριφοράς σε εφελκυσμό ρωγματωμένης χαλύβδινης πλάκας ενισχυμένης

με σύνθετο επίθεμα και η επίδραση σε αυτήν του θαλάσσιου περιβάλλοντος, το οποίο προσομοιώθηκε σε θάλαμο αλατονέφωσης. Επίσης, μελετάται η αξιοπιστία της μοντελοποίησης των πειραματικών δοκιμών με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων, μέσω των αποτελεσμάτων που δίνουν σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη χρήση της για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς σε εφελκυσμό αντίστοιχων διατάξεων.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας, περιγράφοντας συνοπτικά τι περιλαμβάνει και για ποιο 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 αναλύεται διεξοδικά ο τρόπος μοντελοποίησης των πειραματικών δοκιμών με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Περιγράφονται όλες οι παράμετροι και τα στάδια κατασκευής του τρισδιάστατου μοντέλου της ρωγματομένης πλάκας ενισχυμένης με σύνθετο επίθεμα, καθώς και ο τρόπος φόρτισης του μοντέλου σε εφελκυσμό και εξαγωγής αποτελεσμάτων από τη συγκεκριμένη διαδικασία. Στη συνέχεια γίνεται επαλήθευση του τρόπου μοντελοποίησης με παράδειγμα από τη βιβλιογραφία.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια γενική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Παρουσιάζεται η γεωμετρία των δοκιμών, τα υλικά κατασκευής και οι ιδιότητές τους καθώς και η κατασκευή των δοκιμών. Στη συνέχεια, αφού γίνει περιγραφή του θαλάμου αλατονέφωσης και του προτύπου το οποίο ακολουθήθηκε για τη γήρανση των δοκιμών, παρουσιάζεται ο τρόπος προετοιμασίας και η τοποθέτηση των δοκιμών στο θάλαμο αλατονέφωσης. Τέλος, αναλύονται οι παράμετροι των πειραματικών δοκιμών και οι μετρήσεις που έγιναν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τη βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση, στη μηχανική αντοχή των δοκιμών, της ενίσχυσης με σύνθετο επίθεμα και του κλιματικού θαλάμου.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την μοντελοποίηση των πειραματικών δοκιμών με πεπερασμένα στοιχεία με βάση τις πραγματικές επιτευχθείσες ιδιότητες που μετρήθηκαν κατά τις πειραματικές δοκιμές. Συγκεκριμένα περιγράφονται η κατασκευή του μοντέλου, οι συνοριακές συνθήκες και η φόρτιση που επιβλήθηκε. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής μοντελοποίησης και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα των πειραματικών δοκιμών.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο δίνεται ένας επίλογος και μια αποτίμηση του έργου της εργασίας και συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, τόσο από τις πειραματικές δοκιμές, όσο και από την αριθμητική μοντελοποίηση και προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα μηχανικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ). Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή σχεδιάζεται μία δομή και αφού εισαχθούν όλες οι απαιτούμενες παράμετροι, όπως γεωμετρικά χαρακτηριστικά, σταθερές των υλικών, τασική κατάσταση, φορτία, κατακερματίζεται σε πολλά μικρά τμήματα τα οποία συνδέονται με εξισώσεις συνέχειας. Με την επίλυση των εξισώσεων αυτών είναι δυνατή η εύρεση οποιουδήποτε μεγέθους, σε οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου, οποιαδήποτε χρονική στιγμή (αν το πρόβλημα περιέχει δυναμικά χαρακτηριστικά). Υπάρχει πληθώρα προγραμματιστικών πακέτων πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS, ABAQUS, ALGOR, κ.α), τα οποία δίνουν πολλές επιλογές στο χρήστη ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης, την επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο, τη μέθοδο επίλυσης, κτλ. Η ΜΠΣ είναι μία αξιόπιστη και ακριβής μέθοδος υπολογισμού της αποτελεσματικότητας επισκευών με σύνθετα υλικά και έχει χρησιμοποιηθεί από την πλειοψηφία των ερευνητικών ομάδων που έχουν ασχοληθεί με το θέμα, επιβεβαιωμένη μάλιστα σε μεγάλο βαθμό από πειραματικές διαδικασίες. Απαιτεί όμως μεγάλη προσοχή κατά την εφαρμογή της, καθώς μία μικρή παράβλεψη ή ένα μικρό σφάλμα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις. Για το λόγο αυτό, πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιστότερη προσομοίωση της πραγματικής κατασκευής και σωστές παραδοχές ώστε τα αποτελέσματα να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχτηκε το πρόγραμμα ANSYS, καθώς προσφέρει υψηλές δυνατότητες προσομείωσης και ευκολία χειρισμού από την πλευρά του χρήστη. Γενικά η επίλυση του προβλήματος μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια:

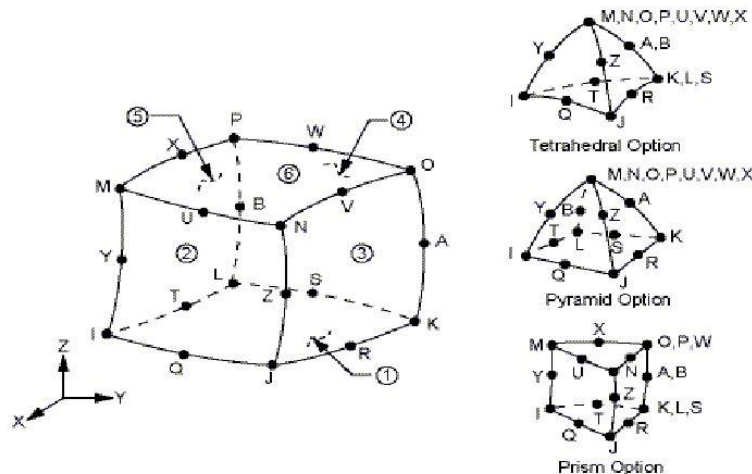
- Προεπεξεργασία (Preprocessing)
- Επίλυση (Solution)
- Μετεπεξεργασία (Postprocessing)

2.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (PREPROCESSING)

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνονται όλα εκείνα τα βήματα που απαιτούνται για τη δημιουργία του καννάβου (mesh). Πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος στοιχείων για τη δημιουργία διδιάστατου (2D) ή τρισδιάστατου μοντέλου (3D), να προσδιοριστούν πλήρως οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν το μοντέλο, να σχεδιαστεί το μοντέλο ορίζοντας τα κατάλληλα σημεία (keypoints), τις επιφάνειες (areas) και τους όγκους (volumes) αυτού και τελικά να γίνει διακριτοποίηση και δημιουργία του τελικού καννάβου. Τέλος ορίζεται το καθεστώς φόρτισης και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου, διαδικασία η οποία μπορεί να γίνει και στο στάδιο της επίλυσης.

2.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείων (Element Type)

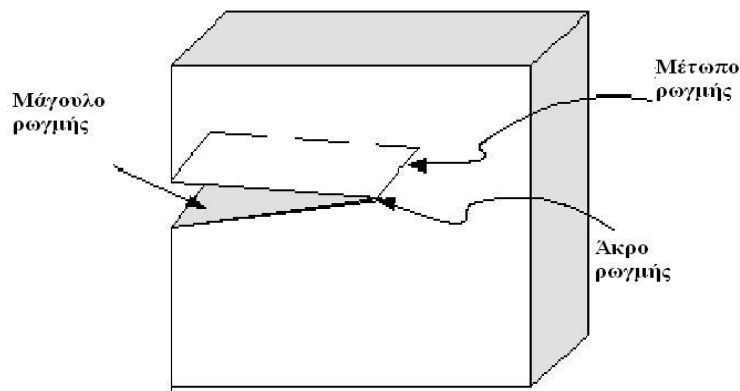
Η μοντελοποίηση με τη ΜΠΣ βασίζεται στον κατακερματισμό του μοντέλου σε μικρά δομικά τμήματα, τα στοιχεία. Η πρώτη λειτουργία που κάνει ο χρήστης είναι η επιλογή του κατάλληλου τύπου στοιχείου. Το ANSYS παρέχει μία μεγάλη βιβλιοθήκη στοιχείων, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από την κατασκευή που θα μοντελοποιηθεί και τον τρόπο μοντελοποίησής της. Για την προσομοίωση ρωγματομένης πλάκας επισκευασμένης με επικολλούμενο σύνθετο επίθεμα μπορούν να υιοθετηθούν αρκετές διαφορετικές μέθοδοι που έχουν σαν αποτέλεσμα την επιλογή διαφορετικού τύπου στοιχείων. Η μέθοδος που επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική ήταν η μοντελοποίηση με τρισδιάστατα στερεά στοιχεία (solid elements), τα οποία παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Ειδικότερα επιλέχθηκε το εικοσακομβικό στοιχείο (20-node) SOLID95 (βλ. Σχήμα 2.1), το οποίο έχει 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατόπιση στους άξονες x, y, z) και παρουσιάζει επιπλέον χαρακτηριστικά πλαστικότητας, ερπυσμού και μεγάλων εκτροπών και παραμορφώσεων.



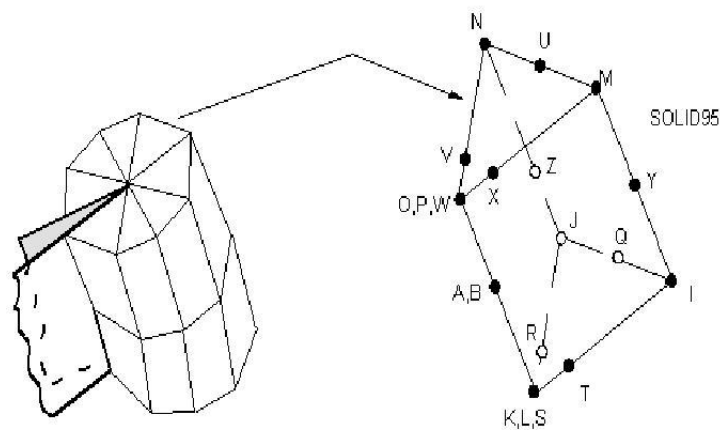
Σχήμα 2.1: Γεωμετρία στοιχείου SOLID95.

Σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο θραύσης η πιο σημαντική περιοχή είναι γύρω από το μέτωπο της ρωγμής (βλ. Σχήμα 2.2). Στα γραμμικά ελαστικά προβλήματα, έχει αποδειχθεί ότι το πεδίο μετατοπίσεων μεταβάλεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της απόστασης από το μέτωπο της ρωγμής ($\sim r^{1/2}$), ενώ το πεδίο των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι ιδίομορφο και είναι αντιστρόφως ανάλογο με το $r^{1/2}$ [ANSYS Release 9.0 Documentation-

2004]. Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα ιδιομορφίας των πεδίων αυτών πρέπει τα στοιχεία γύρω από το μέτωπο της ρωγμής να είναι μη γραμμικά (quadratic) με τους μεσαίους κόμβους να μετακινούνται στο $\frac{1}{4}$ της απόστασης από το άκρο. Τέτοια στοιχεία λέγονται ιδιόμορφα (singular elements, Σχήμα 2.3). Με τη χρήση ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από το μέτωπο της ρωγμής επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων χωρίς να χρειαστεί μεγάλη πύκνωση του καννάβου σε αυτήν την περιοχή, άρα και μεγάλος υπολογιστικός χρόνος. Το ANSYS υποστηρίζει την απευθείας δημιουργία ιδιόμορφων στοιχείων, ενώ παράμετροι όπως ο αριθμός των ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από το άκρο της ρωγμής και οι διαστάσεις τους καθορίζονται με ευκολία.



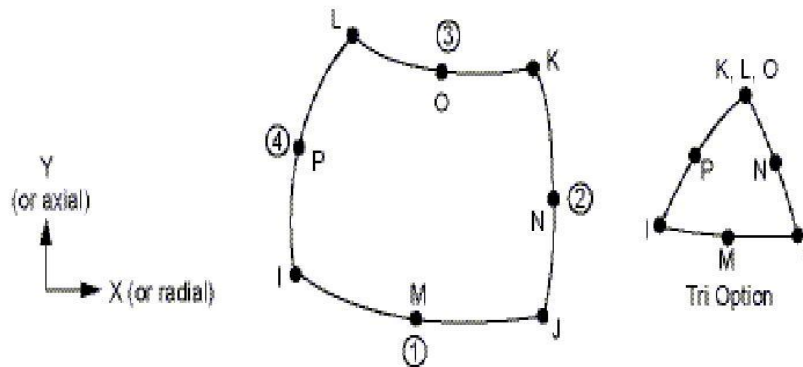
Σχήμα 2.2: Γεωμετρία ρωγμής.



Σχήμα 2.3: Ιδιόμορφο στοιχείο SOLID95.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί η χρήση του διδιάστατου στοιχείου PLANE82 (βλ. Σχήμα 2.4) ως βοηθητικό. Η χρήση του οφείλεται στον τρόπο δημιουργίας των τρισδιάστατων μοντέλων η οποία δεν είναι άμεση. Αρχικά δημιουργείται μια επίπεδη επιφάνεια, γίνεται διακριτοποίησή της με χρήση του στοιχείου PLANE82 και στη συνέχεια γίνεται προεκβολή της στην τρίτη διάσταση. Μετά τη δημιουργία του όγκου, η επιφάνεια και επομένως τα διδιάστατα στοιχεία σβήνονται και δεν λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία της κυρίως επίλυσης, γι' αυτό και ο ρόλος τους χαρακτηρίζεται ως βοηθητικός. Το

PLANE82 είναι οκτακόμβικό στοιχείο με δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (2 μετατοπίσεις) και συνεργάζεται άψογα με το στοιχείο SOLID95 καθώς έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και τον ίδιο αριθμό κόμβων σε κάθε πλευρά.



Σχήμα 2.4: Γεωμετρία στοιχείου PLANE82.

2.2.2 Μηχανικές ιδιότητες των υλικών (Material properties)

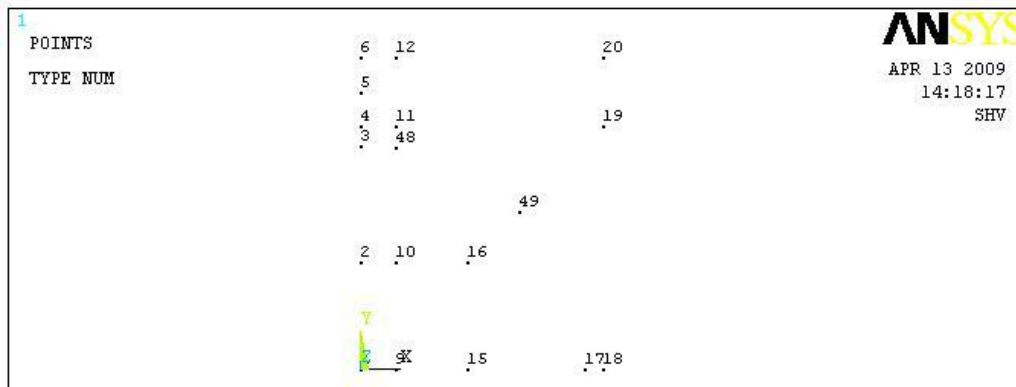
Μετά την επιλογή των κατάλληλων τύπων στοιχείων και πριν αρχίσει η δημιουργία του μοντέλου, καθορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που θα προσομοιωθούν. Στη μελέτη αυτή ο χάλυβας θα εισαχθεί ως μη γραμμικό ελαστοπλαστικό υλικό, ενώ το σύνθετο επίθεμα και το κολλητικό μέσο, ως γραμμικά ελαστικά. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών στην παρούσα μελέτη καθορίστηκαν ως εξής:

- Η χαλύβδινη μεταλλική πλάκα είναι ιστροπικό υλικό, άρα παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις. Οπότε χαρακτηρίζεται από ένα μέτρο ελαστικότητας και ένα λόγο Poisson (E , ν) και ένα μέτρο κράτυνσης που χαρακτηρίζει την πλαστική περιοχή του χάλυβα.
- Το κολλητικό μέσο θεωρείται και αυτό ως ιστροπικό υλικό, επομένως χαρακτηρίζεται από ένα μέτρο ελαστικότητας και ένα λόγο Poisson.
- Το σύνθετο επίθεμα, το οποίο αποτελείται από ίνες άνθρακα σε πλέξη Plane Weave και εποξική ρητίνη (βλ. Κεφάλαιο 3), είναι ορθοτροπικό υλικό. Γι' αυτό το λόγο ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson και μέτρο διάτμησης) σε κάθε διεύθυνση ξεχωριστά.

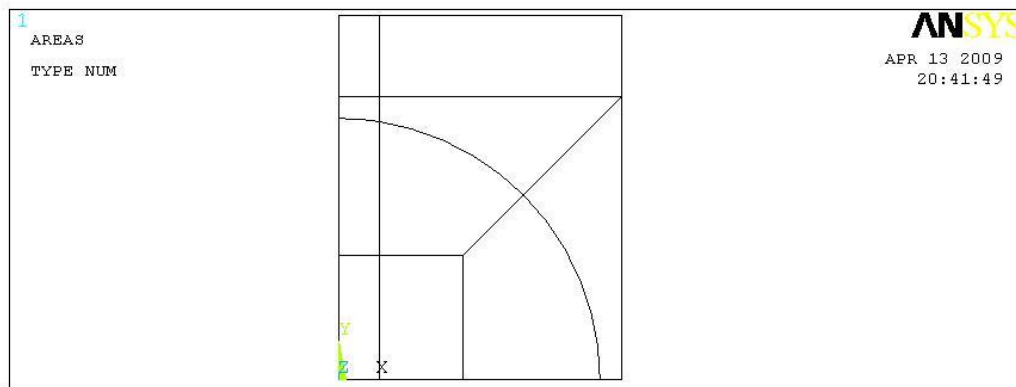
2.2.3 Σχεδίαση της κατασκευής (Modeling)

Για τη σχεδίαση της τρισδιάστατης κατασκευής χαλύβδινη πλάκα-κολλητικό στρώμα-σύνθετο επίθεμα, αρχικά δημιουργείται μία επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή χωρίζεται σε άλλες μικρότερες. Στη συνέχεια προεκβάλλεται η κάθε επιφάνεια στην τρίτη διάσταση (πάχος). Οι άξονες x , y και z αντιστοιχούν στο μήκος, πλάτος και πάχος της κατασκευής, αντίστοιχα. Για πρακτικούς λόγους μοντελοποιείται μόνο το $\frac{1}{4}$ της κατασκευής, καθώς η κατασκευή είναι συμμετρική ως προς τους άξονες x και y , και με συνθήκες συμμετρίας τα αποτελέσματα θα αφορούν το σύνολό της. Σε πρώτη φάση εισάγονται με τη μορφή

συντεταγμένων τα σημεία τα οποία οριοθετούν την περιοχή της κάθε επιφάνειας (keypoints) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



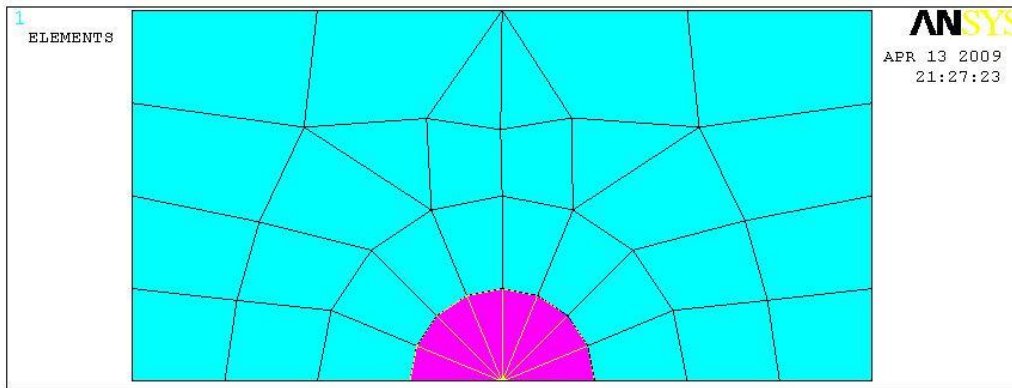
Σχήμα 2.5: Δημιουργία keypoints της επιφάνειας.



Σχήμα 2.6: Δημιουργία των επιφανειών.

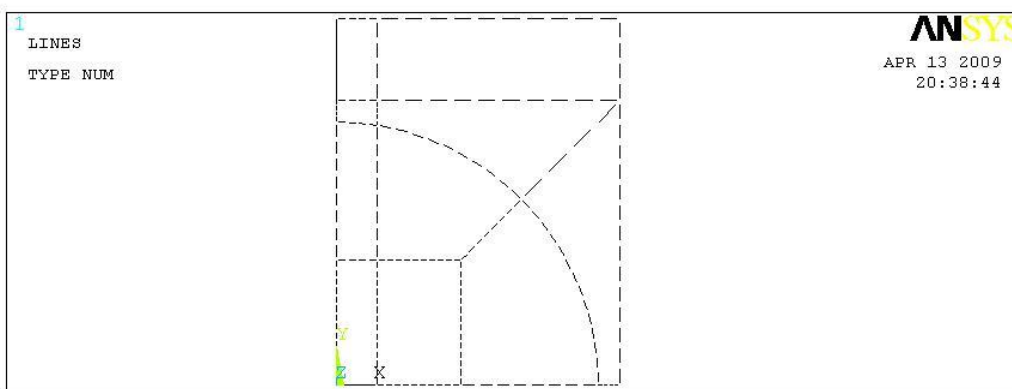
Έπειτα από την εισαγωγή των keypoints, ακολουθεί η δημιουργία επιφανειών (Σχήμα 2.6) βάσει των σημείων αυτών με χρήση στοιχείων τύπου PLANE82. Ύστερα δηλώνεται το σημείο που θα αποτελέσει το άκρο της ρωγμής ώστε να χρησιμοποιηθούν ιδιόμορφα στοιχεία στην περιοχή αυτή (Σχήμα 2.7). Ακόμα πρέπει να οριστούν οι παρακάτω παράμετροι, οι τιμές των οποίων επιλέχτηκαν βάσει παραμετρικής μελέτης [Σωτηρόπουλος-2007]:

- Αριθμός των ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από το άκρο της ρωγμής. Ο αριθμός αυτός επιλέχτηκε ίσος με 8.
- Ακτίνα της πρώτης σειράς των ιδιόμορφων στοιχείων. Με την παράμετρο αυτή ορίζονται οι δύο ισοσκελείς πλευρές των τριγώνων που αποτελούν τα ιδιόμορφα στοιχεία, γύρω από το άκρο της ρωγμής και συνήθως ορίζεται ως κλάσμα του ημιμήκους της ρωγμής. Η ακτίνα επιλέχτηκε ίση με $a/32$, με το a να συμβολίζει το ημιμήκος της ρωγμής.
- Λόγος της ακτίνας της δεύτερης σειράς στοιχείων προς την ακτίνα της πρώτης. Η τιμή αυτή είναι μικρής σημασίας, οπότε και επιλέχτηκε η λειτουργία αυτόματης επιλογής από το πρόγραμμα.

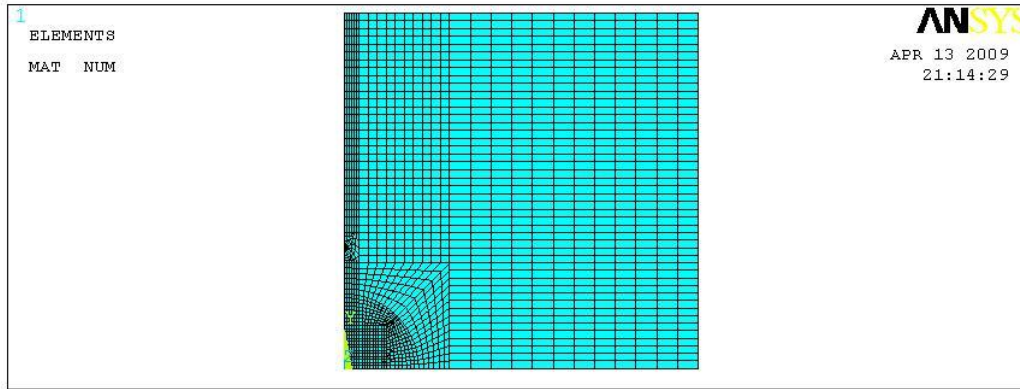


Σχήμα 2.7: Ιδιόμορφα στοιχεία γύρω από το άκρο της ρωγμής.

Το επόμενο στάδιο είναι η διαδικασία της διακριτοποίησης (meshing), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Αφού έχουν δημιουργηθεί οι επιφάνειες, διακριτοποιούνται οι πλευρές αυτών. Η διακριτοποίηση της κατασκευής μπορεί να γίνει είτε αυτόματα, καθορίζοντας ο χρήστης κάποιες από τις παραμέτρους και αφήνοντας τις υπόλοιπες στο πρόγραμμα, είτε προσαρμοσμένα, καθορίζοντας όλες εκείνες τις παραμέτρους που θα καταλήξουν στη δημιουργία του καννάβου όπως ακριβώς τον επιθυμεί ο χρήστης (σχήμα και αριθμό των στοιχείων που θα υπάρχουν σε κάθε περιοχή). Όσο μεγαλύτερη πυκνωση υπάρχει σε κάποια περιοχή, τόσο καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν. Η δημιουργία όμως ενός πολύ πυκνού καννάβου αποκλείεται καθώς ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού θα ήταν απαγορευτικός. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε η δημιουργία πυκνότερου καννάβου στις περιοχές που μας ενδιέφεραν τα αποτελέσματα και λιγότερο πυκνού στις υπόλοιπες. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε να υπάρχουν κόμβοι στα σημεία που θα αναζητηθούν αποτελέσματα στη φάση της μετεπεξεργασίας. Έπειτα από τη διακριτοποίηση των γραμμών ακολουθεί η δημιουργία του επιφανειακού καννάβου (Σχήμα 2.9).

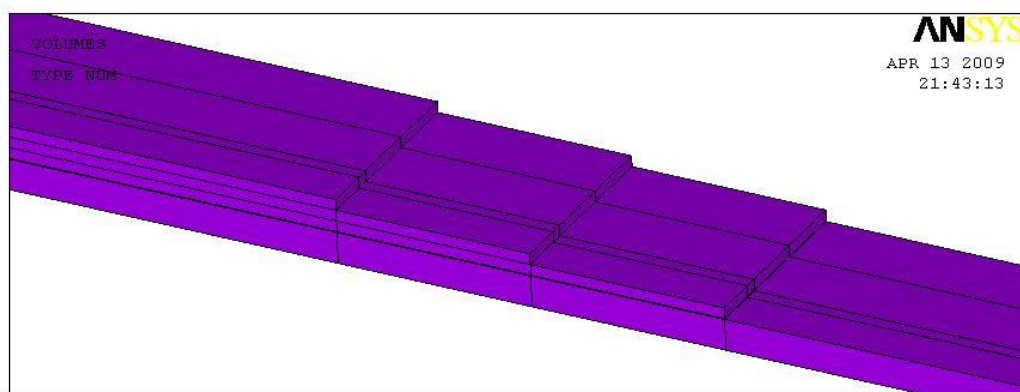


Σχήμα 2.8: Διακριτοποίηση γραμμών των επιφανειών.



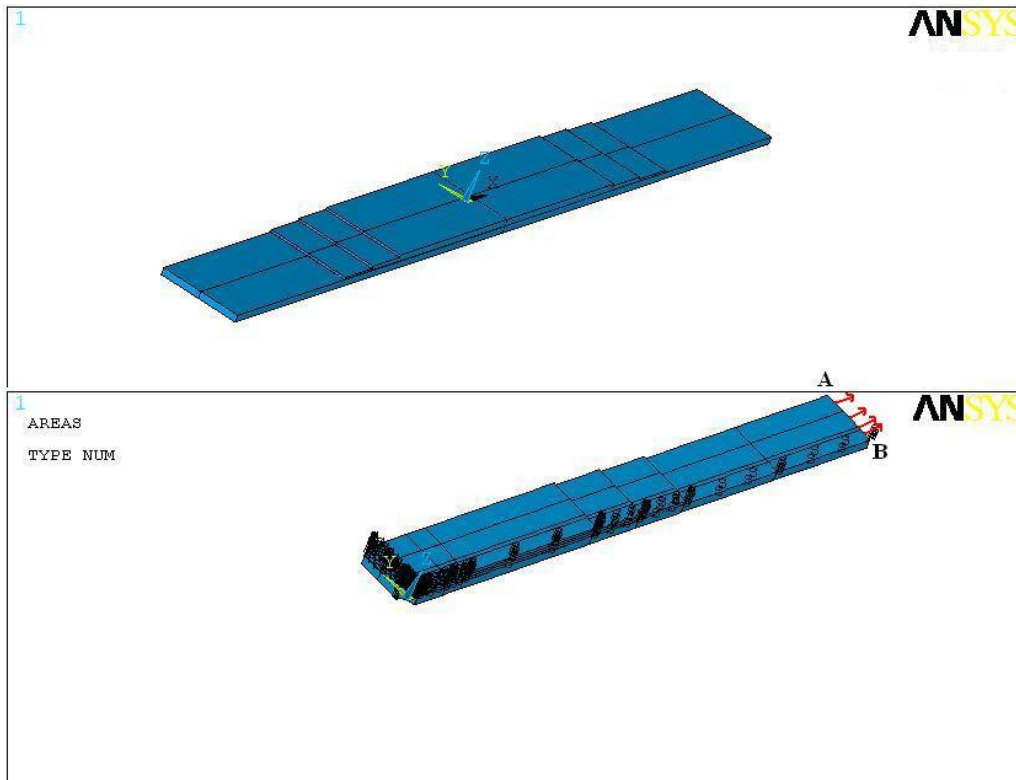
Σχήμα 2.9: Δημιουργία του καννάβου.

Το τελευταίο βήμα για το σχηματισμό του τρισδιάστατου μοντέλου αποτελεί η προεκβολή της διακριτοποιημένης επιφάνειας κατά τη διεύθυνση του πάχους (Σχήμα 2.10). Αρχικά δημιουργείται ο όγκος της χαλύβδινης πλάκας, ορίζοντας τον τύπο των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν (SOLID95), τον τύπο του υλικού που οι ιδιότητές του έχουν οριστεί στην αρχή (material number 1), το πάχος της πλάκας και τον αριθμό των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν κατά το πάχος. Κατόπιν επιλέγεται η επιφάνεια της πλάκας πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί το κολλητικό μέσο και προεκβάλλεται κατά το επιθυμητό πάχος ορίζοντας τον τύπο των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν (SOLID95), τον τύπο του υλικού που οι ιδιότητές του έχουν οριστεί στην αρχή (material number 3) και τον αριθμό των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν κατά το πάχος. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για κάθε μία ομάδα στρώσεων του επιθέματος, επιλέγοντας τύπο στοιχείων το SOLID95 και υλικό το material number 2.



Σχήμα 2.10: Δημιουργία όγκου (προεκβολή επιφανειών κατά το πάχος).

Για να επιτευχθεί συνέχεια μεταξύ των στρώσεων των διαφορετικών υλικών θα πρέπει να γίνει συγχώνευση (merge) των διαφορετικών κόμβων που έχουν τις ίδιες συντεταγμένες. Το πρόγραμμα πριν τη συγχώνευση αναγνωρίζει τρεις διαφορετικούς όγκους (πλάκα, κολλητικό στρώμα, επίθεμα), ασύνδετους μεταξύ τους. Μετά τη συγχώνευση η κατασκευή συμπεριφέρεται στις φορτίσεις ως ενιαία.



Σχήμα 2.11: Μοντελοποίηση του $\frac{1}{4}$ της κατασκευής, συνθήκες συμμετρίας και φόρτιση.

Λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζει η κατασκευή, μοντελοποιήθηκε το $\frac{1}{4}$ αυτής (Σχήμα 2.11), όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οπότε ορίστηκαν οι απαραίτητες συνθήκες συμμετρίας στα επίπεδα $x-z$ και $y-z$. Η ρωγμή μοντελοποιήθηκε μη οριζόντιας συνθήκες συμμετρίας στην περιοχή αυτή (ασυνέχεια υλικού). Στην επιφάνεια της πλάκας που εφαρμόστηκαν τα φορτία, τέθηκε περιορισμός στις μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση του πάχους (άξονας z). Η τελική φάση της προεπεξεργασίας είναι η επιβολή των φορτίων. Επιλέγονται οι επιφάνειες που ασκούνται τα φορτία και ο τρόπος επιβολής τους (επιβολή επιμήκυνσης, επιβολή τάσης, επιβολή δύναμης). Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο εφελκυσμός προσομοιώνεται με την επιβολή εφελκυστικής τάσης ή με την επιβολή επιμήκυνσης. Η εφελκυστική τάση που ασκείται στην πλάκα εφαρμόζεται ως ομοιόμορφα κατανομημένη τάση στην ακραία επιφάνειά της AB (Σχήμα 2.11). Στην ακραία επιφάνεια της πλάκας (AB) γίνεται σύζευξη των κόμβων ώστε η επιφάνεια αυτή να παραμένει παράλληλη στο επίπεδο $y-z$ κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η πάκτωση των δοκιμίων στην υδραυλική μηχανή κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Στην περίπτωση που για την προσομοίωση του εφελκυσμού επιλέγουμε επιβολή επιμήκυνσης, έχουμε ομοιόμορφη επιμήκυνση σε όλη την ακραία επιφάνεια AB (Σχήμα 2.11). Ως εκ τούτου δε χρειάζεται να γίνει σύζευξη των κόμβων στην επιφάνεια αυτή.

2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ (SOLUTION)

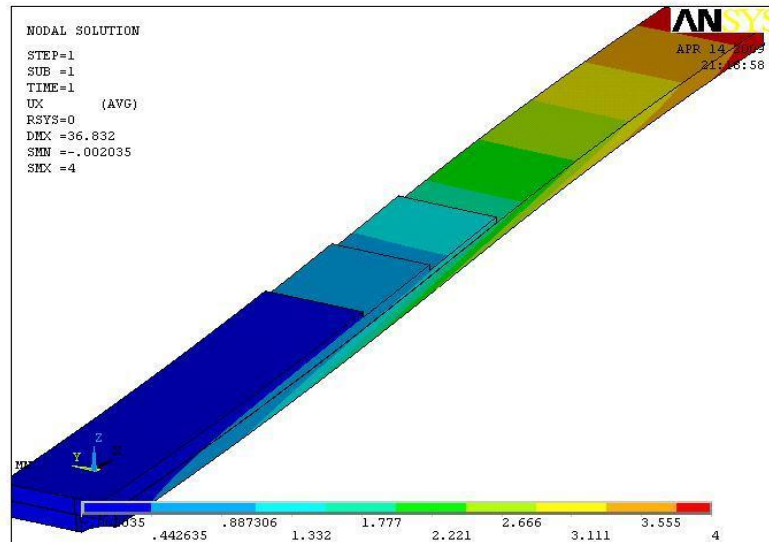
Σε αυτό το στάδιο ορίζεται ο τύπος της ανάλυσης βάσει του οποίου θα γίνει η επίλυση του προβλήματος. Για τη μοντελοποίηση του πειράματος και του παραδείγματος από τη βιβλιογραφία (βλ. εδάφιο 2.5) επιλέχτηκε στατική ανάλυση, δηλαδή επιβολή δεδομένης και σταθερής φόρτισης στο μοντέλο. Ένας άλλος βασικός διαχωρισμός στον τύπο της ανάλυσης είναι αυτός μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής (θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων). Είναι προφανές πως από τη στιγμή που υπάρχει η χαλύβδινη πλάκα στη μοντελοποίησή μας, η επιλογή γραμμικής ανάλυσης μπορεί να προσομοιάσει με ακρίβεια μόνο την ελαστική περιοχή του χάλυβα. Ως εκ τούτου επιλέχτηκε η χρήση της μη γραμμικής ανάλυσης ώστε να μοντελοποιηθεί η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του χάλυβα.

Ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση του σταδίου της μη γραμμικής επίλυσης εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους, εκ των οποίων η κυριότερη είναι ο αριθμός των βημάτων (substeps) που θα οριστούν. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των βημάτων τόσο μεγαλύτερος είναι και ο υπολογιστικός χρόνος. Κατά τον κατακερματισμό του συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου σε μια σειρά από βήματα, κάθε βήμα εφαρμόζεται ξεχωριστά στην κατασκευή. Μετά την ολοκλήρωση κάθε βήματος το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής προσαρμόζεται στη νέα παραμορφωσιακή κατάσταση πριν επιβληθεί το επόμενο τμήμα φορτίου. Η βηματική προσέγγιση γίνεται με την αριθμητική μέθοδο Newton–Raphson μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν τεθεί από το χρήστη. Αυστηρότερα κριτήρια σύγκλισης αυξάνουν τον υπολογιστικό χρόνο. Πέρα από τον αρχικό καθορισμό των βημάτων, υπάρχει η δυνατότητα ορισμού ενός μέγιστου και ενός ελάχιστου αριθμού βημάτων και αυτόματης επιλογής από το πρόγραμμα του τελικού αριθμού που θα εφαρμοστούν, μέθοδος η οποία ακολουθήθηκε, ικανοποιώντας όλα τα κριτήρια σύγκλισης και προσφέροντας ικανοποιητική ακρίβεια με σχετικά χαμηλό υπολογιστικό χρόνο.

Τέλος, να σημειωθεί πως για κάθε μοντέλο έγινε και η αντίστοιχη γραμμική επίλυση για λόγους επιβεβαίωσης της ορθότητας των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής, μόνο όσον αφορά την περιοχή ελαστικής συμπεριφοράς του μοντέλου.

2.4 ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (POSTPROCESSING)

Κατά τη διαδικασία της μετεπεξεργασίας η οποία είναι και η τελική, το πρόβλημα έχει επιλυθεί από το πρόγραμμα και ο χρήστης παίρνει τα αποτελέσματα που τον ενδιαφέρουν. Το ANSYS παρουσιάζει αποτελέσματα μόνο στους κόμβους ή σε ομάδα κόμβων που έχει επιλεγεί από το χρήστη. Αφού βρεθεί ο κόμβος που μας ενδιαφέρει, διαλέγουμε το φυσικό μέγεθος του οποίου τα αποτελέσματα χρειαζόμαστε. Το πρόγραμμα εμφανίζει μία λίστα με τα αποτελέσματα αυτά, ανά βήμα φόρτισης, για τον συγκεκριμένο κόμβο που έχει επιλεγεί. Ακόμα, μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη του προγράμματος χρωματική διαστρωμάτωση των αποτελεσμάτων ενός φυσικού μεγέθους (πχ. επιμήκυνση στον x άξονα, Σχήμα 2.12), σε όλο τον όγκο της κατασκευής που μοντελοποιήθηκε. Αυτός ο τρόπος μας δίνει μια γενικότερη άποψη για τη συμπεριφορά του μοντέλου.

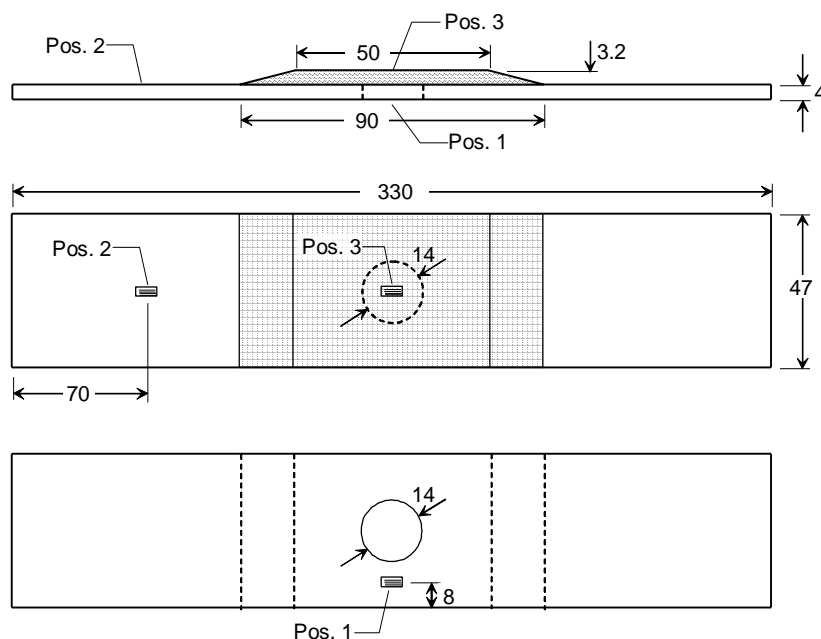


Σχήμα 2.12: Χρωματική διαστρωμάτωση αποτελεσμάτων.

2.5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Πριν την προσομοίωση των πειραμάτων με χρήση της ΜΠΣ, κρίθηκε σκόπιμη η επιβεβαίωση του τρόπου μοντελοποίησης που θα ακολουθηθεί. Για την επιβεβαίωση αυτή επιλέχθηκε ένα παράδειγμα από τη βιβλιογραφία το οποίο αποτελείται από πειραματικές δοκιμές. Το παράδειγμα αυτό μοντελοποιήθηκε στο ANSYS ακολουθώντας τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα εδάφια του Κεφαλαίου 2. Οι μηχανικές ιδιότητες και η γεωμετρία των μοντέλων διατηρήθηκαν κοινές με το παράδειγμα της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα ύστερα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά και αυτά της μοντελοποίησης του παραδείγματος και εξήχθησαν τα ανάλογα συμπεράσματα.

Το παράδειγμα που επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί αφορά τη μηχανική αντοχή σε εφελκυσμό χαλύβδινης πλάκας με κεντρική διαμπερή οπή, επικαλυμμένη με σύνθετο επίθεμα [Tsouvalis N.-2007]. Ο παράγοντας που μελετήθηκε στο παράδειγμα αυτό ήταν η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας που επιστρώθηκε το επίθεμα. Εφαρμόστηκαν 4 μέθοδοι προετοιμασίας της επιφάνειας και κατασκευάστηκαν 2 δοκίμια για κάθε μέθοδο, συνολικά 8 δοκίμια με επίθεμα. Σε δύο από τις μεθόδους ασκήθηκε εφελκυστικό φορτίο με επιβολή επιμήκυνσης με σταθερό ρυθμό και στις άλλες δύο το φορτίο ασκήθηκε με επιβολή δύναμης με σταθερό ρυθμό. Για κάθε τρόπο επιβολής του φορτίου κατασκευάστηκαν 2 δοκίμια αναφοράς χωρίς επίθεμα, στο σύνολο 4.



Σχήμα 2.13: Γεωμετρία δοκιμίου.

Στο Σχήμα 2.13 φαίνεται η γεωμετρία των δοκιμίων. Η διάμετρος της οπής είναι 14 mm. Το μήκος της χαλύβδινης πλάκας είναι 330 mm, όμως επειδή στην υδραυλική μηχανή εφελκυσμού όπου τοποθετήθηκαν τα δοκίμια απαιτούνταν 50 mm από κάθε άκρο της πλάκας για τις αρπάγες της μηχανής, το ελεύθερο μήκος της χαλύβδινης πλάκας είναι $L_s=230$ mm. Το πλάτος του χάλυβα είναι $W_s=47$ mm και το πάχος $t_s=4$ mm. Το επίθεμα αποτελείται από 12 στρώσεις οι οποίες τοποθετήθηκαν σε τρεις ομάδες, καθεμία αποτελούμενη από τέσσερις στρώσεις. Η πρώτη ομάδα που τοποθετήθηκε είχε μήκος 50 mm, η δεύτερη 70 mm και η τρίτη 90 mm, άρα το επίθεμα είχε ενεργό μήκος $L_p=50$ mm. Το πάχος του ενεργού μήκους του επιθέματος ήταν $t_p=3.2$ mm και το πλάτος $W_p= W_s=47$ mm. Επίσης, στο Σχήμα 2.13 φαίνονται και οι θέσεις όπου τοποθετήθηκαν τα επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges).

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε είναι κοινός ναυπηγικός. Το σύνθετο επίθεμα αποτελείται από ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη. Το ανθρακούφασμα είχε προσανατολισμό ινών $0^\circ/90^\circ$, πλέξη twill 2×2 με επιφανειακό βάρος 160 gr/m^2 , της εταιρείας R&G Faserverbundwerkstoffe. Η ρητίνη είναι η εποξική ρητίνη D.E.R. 331 της εταιρείας Dow και ο σκληρυντής με τον οποίο προσμείχθηκε είναι ο EPAMINE PC13 της εταιρείας PO.INT.ER S.r.l. Η μέθοδος επίστρωσης του επιθέματος που ακολουθήθηκε ήταν η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (Hand Lay-Up).

Οι μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Με E συμβολίζεται το μέτρο ελαστικότητας, ν είναι ο λόγος Poisson και G το μέτρο διάτμησης. Οι δείκτες x , y και z συμβολίζουν τις διευθύνσεις του μήκους, πλάτους και πάχους, αντίστοιχα. Οι τιμές με πλάγια γραφή έχουν υπολογιστεί σε δοκιμές χαρακτηρισμού του επιθέματος [Tsouvalis N.-2007], ενώ όλες οι υπόλοιπες πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα προέκυψε ίσο με 183.75 GPa και το όριο διαρροής σ_0 ίσο με 348 MPa, ύστερα από πειραματικές δοκιμές

χαρακτηρισμού του χάλυβα [Tsouvalis N.-2007]. Ο λόγος Poisson λήφθηκε ίσος με 0.30 και το μέτρο κράτυνσης ίσο με 1500 MPa. Για το κολλητικό μέσο το μέτρο ελαστικότητας ήταν 4500 MPa και ο λόγος Poisson ίσος με 0.25. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα και της κόλλας που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση. Το επίθεμα κατά τη μοντελοποίησή του χωρίστηκε σε τρεις ομάδες κατά τη διεύθυνση του πάχους, κάθε μία εκ των οποίων είχε μήκος 90 mm, 70 mm και 50 mm. Το πάχος της κάθε ομάδας ήταν ίσο με το 1/3 του πάχους του επιθέματος t_p . Το πάχος του κολλητικού μέσου θεωρήθηκε ίσο με 0.1 mm και κάλυπτε όλη τη διεπιφάνεια μεταξύ της χαλύβδινης πλάκας και της πρώτης στρώσης του επιθέματος. Πάνω από την οπή δεν υπήρχε κολλητικό μέσο.

Πίνακας 2.1: Μηχανικές ιδιότητες επιθέματος που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση.

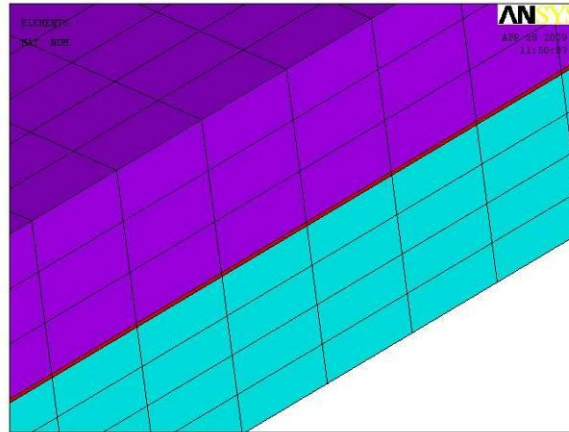
Υλικό	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy} (MPa)	G_{xz} (MPa)	G_{yz} (MPa)
Επίθεμα	41500	41500	5000	0.30	0.30	0.02	2400	2400	1600

Πίνακας 2.2: Μηχανικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση.

Υλικό	E (MPa)	ν	Μέτρο κράτυνσης (MPa)	σ_0 (MPa)
Χάλυβας	183750	0.3	1500	348
Κόλλα	4500	0.25	-	-

Στο παράδειγμα αυτό ο κύριος παράγοντας που εξετάστηκε ήταν η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας. Διαφορετική μέθοδος συνεπάγεται και διαφορετική τραχύτητα στην επιφάνεια του χάλυβα. Η τραχύτητα όμως δεν είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί με τη ΜΠΣ, έτσι δεν λήφθηκε υπ' όψιν ο παράγοντας αυτός κατά τη μοντελοποίηση. Ως εκ τούτου κατασκευάστηκε ένα αριθμητικό μοντέλο που να αντιστοιχεί στα 8 δοκίμια με επίθεμα και ένα που να αντιστοιχεί στα 4 δοκίμια αναφοράς.

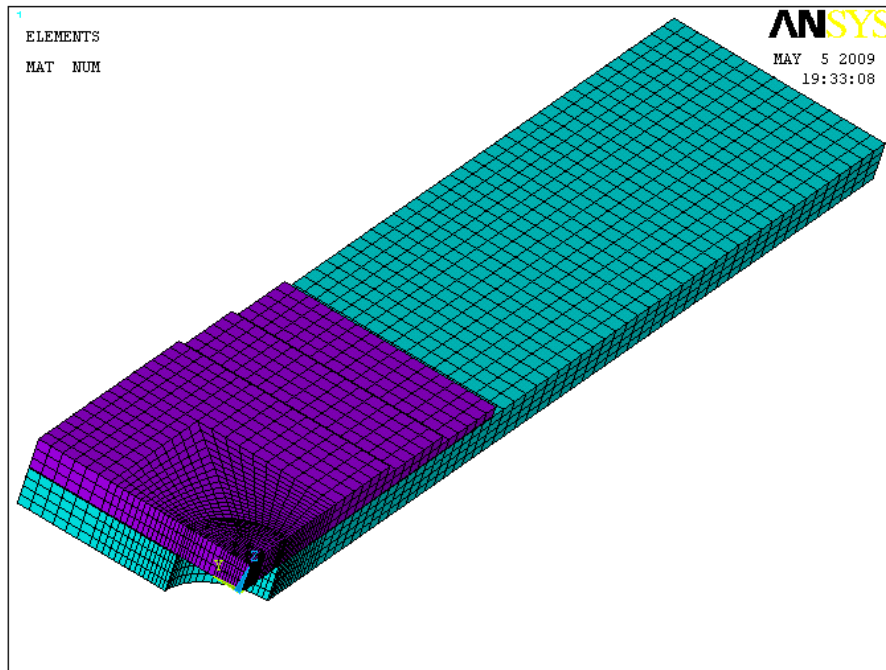
Σε όλα τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο εικοσακομβικό στοιχείο SOLID95 σε συνδυασμό με το βοηθητικό δισδιάστατο οκτακομβικό στοιχείο PLANE82. Κατά τη διεύθυνση του πάχους (άξονας z), χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα στοιχεία για τη μοντελοποίηση της χαλύβδινης πλάκας, ένα στοιχείο για τη μοντελοποίηση της κόλλας και τρία στοιχεία για τη μοντελοποίηση του σύνθετου επιθέματος, ένα για κάθε μία από τις τρεις ομάδες στρώσεων με διαφορετικό μήκος (Σχήμα 2.14). Στην περιοχή κοντά στην οπή η διακριτοποίηση του καννάβου ήταν αρκετά πιο πυκνή, καθώς εκεί επιζητούσαμε μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.14: Αριθμός στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους.

Εξαιτίας της συμμετρίας που παρουσιάζει η κατασκευή μοντελοποιήθηκε το $\frac{1}{4}$ αυτής. Στο Σχήμα 2.15 φαίνεται το μοντέλο ενός δοκιμίου με επίθεμα. Σε όλο το επίπεδο x-z και σε όλο το επίπεδο y-z τέθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας. Στις πειραματικές δοκιμές είχαμε επιβολή επιμήκυνσης και δύναμης με σταθερό ρυθμό στα δοκίμια. Οι ίδιοι τύποι φόρτισης (επιβολή επιμήκυνσης και δύναμης) ασκήθηκαν και στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, στο ελεύθερο άκρο τους. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση για κάθε τύπο φόρτισης ήταν πανομοιότυπα. Η συνοριακή συνθήκη που τέθηκε στην επιφάνεια του ελεύθερου άκρου είναι μηδενική μετατόπιση ως προς τον άξονα z. Το γεγονός ότι ασκήθηκε ομοιόμορφη επιμήκυνση καθ' όλη την επιφάνεια του ελεύθερου άκρου των μοντέλων συνεπάγεται πως η επιφάνεια αυτή παραμένει επίπεδη και παράλληλη προς το επίπεδο y-z κατά τη φόρτιση, πράγμα που συνάδει με τις πειραματικές δοκιμές.

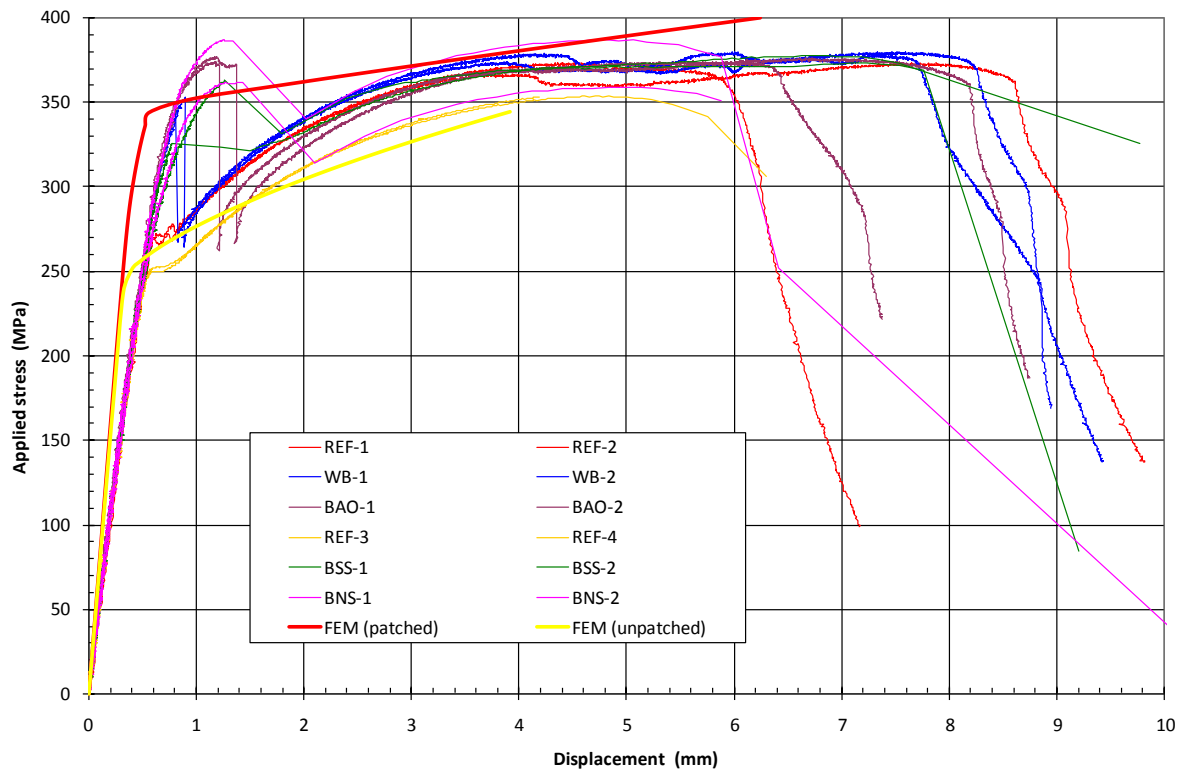
Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε πως η μοντελοποίηση των δοκιμίων με επίθεμα δεν περιλαμβάνει κάποιου είδους αστοχία υλικού. Αυτό σημαίνει πως το επίθεμα, η κόλλα και η χαλύβδινη πλάκα είναι τέλεια ενωμένα μεταξύ τους. Γι' αυτό τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με τα πειραματικά μόνο για όσο τα υλικά είναι τέλεια ενωμένα μεταξύ τους, άρα οποιαδήποτε σύγκριση μετά από έστω και μερική αστοχία υλικών είναι ανούσια.



Σχήμα 2.15: Μοντέλο του $\frac{1}{4}$ ενός δοκιμίου με επίθεμα.

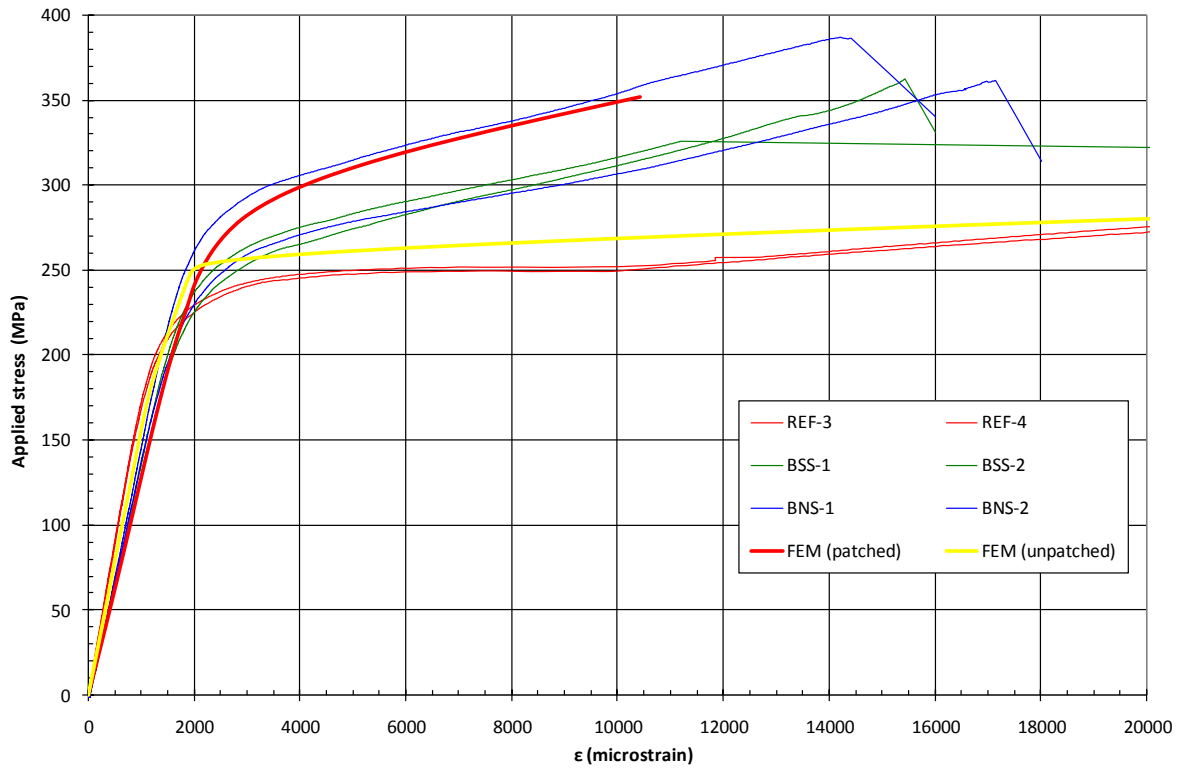
Τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης των δύο μοντέλων που κατασκευάσαμε φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν. Το Σχήμα 2.16 παρουσιάζει τις καμπύλες τάσης – επιμήκυνσης που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές όλων των δοκιμίων και από το μοντέλο αναφοράς (FEM unpatched) και το μοντέλο με επίθεμα (FEM patched). Τα δοκίμια αναφοράς είναι τα REF-1,2,3,4 και τα υπόλοιπα είναι δοκίμια με επίθεμα. Στα δοκίμια με επίθεμα η απότομη πτώση της επιβαλλόμενης τάσης οφείλεται στην αποκόλληση του επιθέματος, οπότε οποιαδήποτε σύγκριση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων από αυτό το σημείο και μετά δεν έχει νόημα. Στο Σχήμα 2.16 παρατηρούμε μία εμφανή διαφορά στην ακαμψία (κλίση της περιοχής ελαστικής συμπεριφοράς) που παρουσιάζουν τα αριθμητικά μοντέλα σε σχέση με αυτή των δοκιμίων. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μικρότερη ακαμψία σε σχέση με αυτή που προβλέπεται από τη μοντελοποίηση. Αυτή η διαφορά δεν οφείλεται σε λάθος της μοντελοποίησης αλλά στη μέτρηση της επιμήκυνσης που έδειχνε η υδραυλική μηχανή εφέλκυσμού που χρησιμοποιήθηκε για την τέλεση των πειραμάτων αυτών. Η επιμήκυνση που μετρούσε η μηχανή δεν είναι από την άκρη της αρπάγης ώστε η μέτρηση να αφορά μόνο το μήκος του δοκιμίου, αλλά από το έμβολό της. Με την επιβολή φορτίου από τη μηχανή, η αντίστοιχη επιμήκυνση που μετρούσε η μηχανή συμπεριελάμβανε και την όποια επιμήκυνση εμφανίζουν η αρπάγες, το υλικό των οποίων έχει και αυτό μία δεδομένη ακαμψία. Άρα τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν για την επιμήκυνση είναι μεγαλύτερα από τα πραγματικά. Γι' αυτό και τα δοκίμια εμφανίζουν μικρότερη ακαμψία από αυτή που δείχνει η αριθμητική μοντελοποίηση. Οι διαφορές μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων στην περιοχή πλαστικής συμπεριφοράς οφείλονται στην απλοποιημένη μοντελοποίηση του χάλυβα, ο οποίος θεωρήθηκε ελαστοπλαστικός. Αν συνυπολογίσουμε όλα αυτά που προαναφέρθηκαν και το γεγονός πως δεν έχει συμπεριληφθεί στη

μοντελοποίηση η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας, μπορούμε να συμπεράνουμε πως η ΜΠΣ δίνει μια αρκετά καλή προσέγγιση της συμπεριφοράς των δοκιμών.

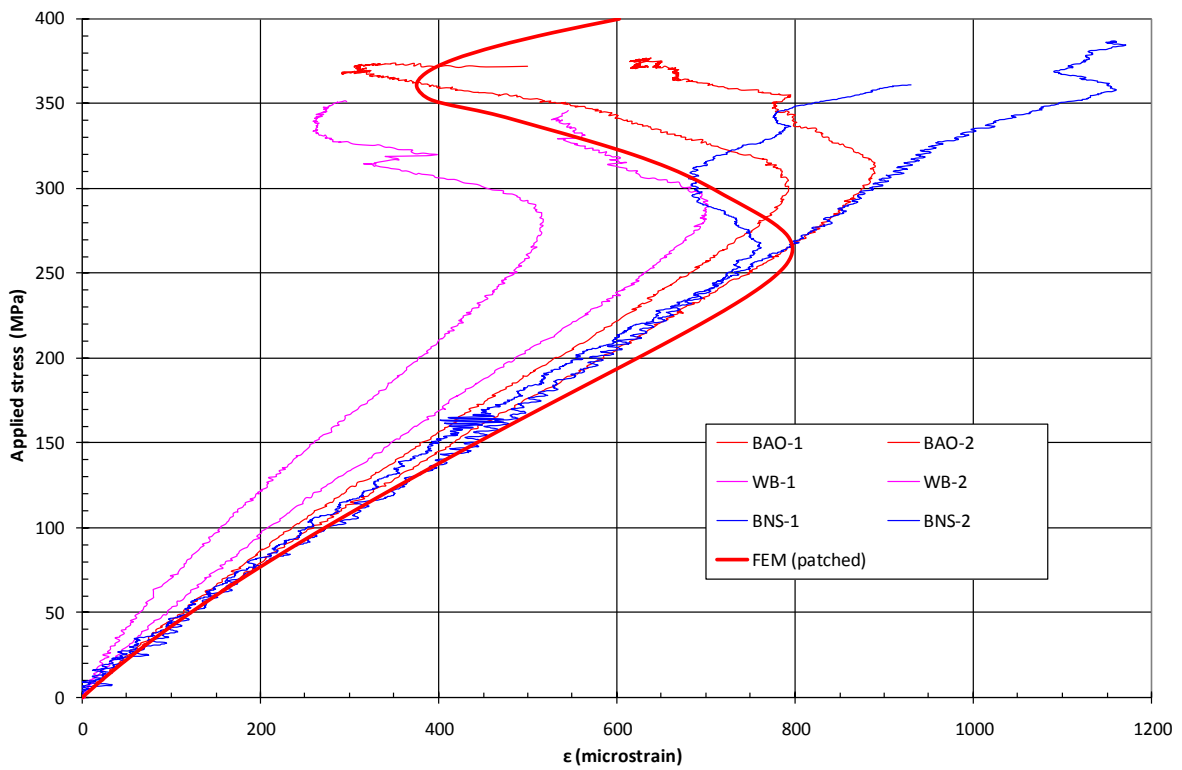


Σχήμα 2.16: Διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης.

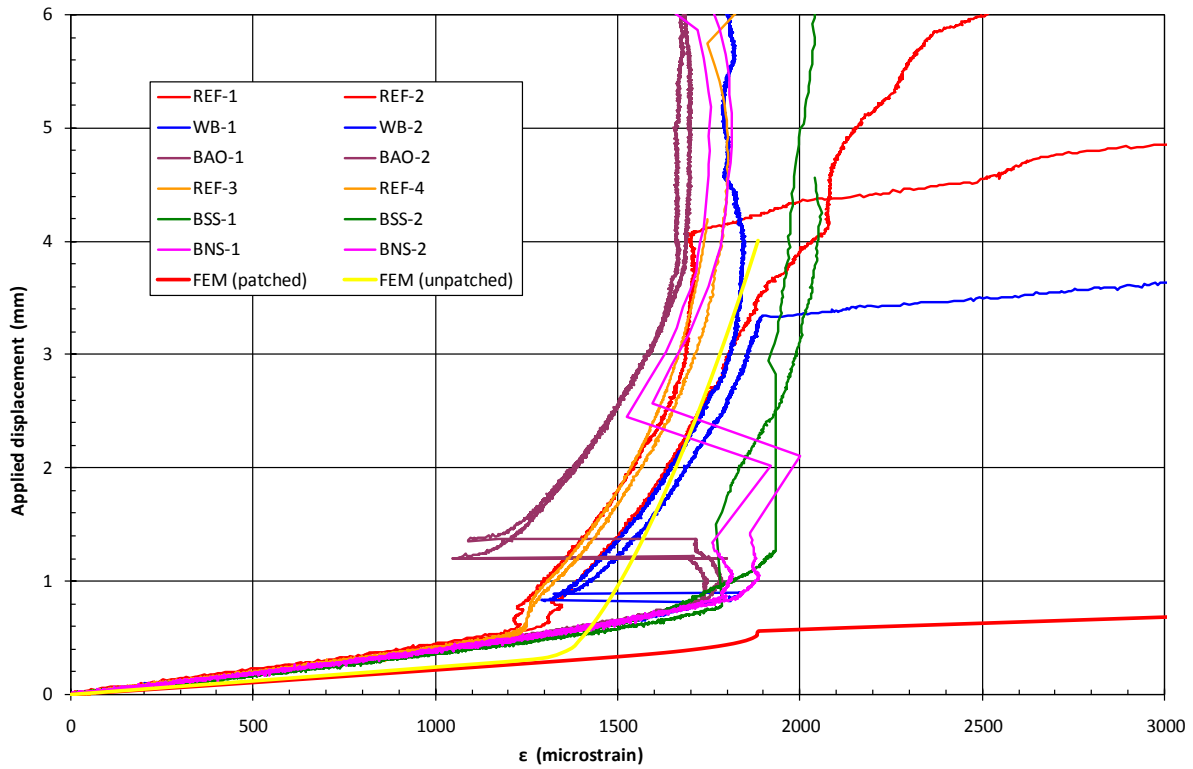
Στα Σχήματα 2.17 και 2.18 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης στις θέσεις 1 και 3 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται τα αποτελέσματα της αριθμητικής μοντελοποίησης συγκλίνουν με αυτά των πειραματικών δοκιμών. Το γεγονός ότι δεν υπάρχει διαφορά στην κλίση των καμπυλών μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, οφείλεται στο ότι δεν εμφανίζεται στα διαγράμματα αυτά το μέγεθος της επιμήκυνσης και επιβεβαιώνει την αιτιολόγηση που διατυπώσαμε παραπάνω που αφορά τη διαφορά στην ακαμψία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων (Σχήμα 2.16). Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 2. Πέραν της αναμενόμενης διαφοράς στην ακαμψία μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών, τα αποτελέσματα της σύγκρισης είναι αρκετά καλά και τα αριθμητικά μοντέλα φαίνεται πως προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των δοκιμών.



Σχήμα 2.17: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης στη θέση 1.



Σχήμα 2.18: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης στη θέση 3.



Σχήμα 2.19: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 2.

Σαν συμπέρασμα, η εφαρμογή της ΜΠΣ στο συγκεκριμένο παράδειγμα μοντελοποιεί αρκετά ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των δοκιμών πριν αυτά αστοχήσουν. Οπότε η εφαρμογή της ΜΠΣ βάσει της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στα προηγούμενα εδάφια του παρόντος κεφαλαίου, είναι μια ασφαλής μέθοδος για τη μοντελοποίηση των πειραματικών δοκιμών της παρούσας διπλωματικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Ο στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς σε εφελκυσμό, ρωγματομένης χαλύβδινης πλάκας ενισχυμένης με συνθετικό επίθεμα και η επίδραση σε αυτήν του θαλάσσιου περιβάλλοντος το οποίο προσομοιώθηκε σε θάλαμο αλατονέφωσης. Οι παράγοντες που εξετάστηκαν είναι η επίδραση στη μηχανική αντοχή της ύπαρξης του επιθέματος, της κατασκευαστικής μεθόδου του επιθέματος και του χρόνου παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης.

Ο χάλυβας που επιλέχτηκε είναι κοινός ναυπηγικός Grade A και το επίθεμα είναι ίνες άνθρακα με εποξική ρητίνη. Στο πείραμα εξετάστηκαν 2 διαφορετικές μέθοδοι κατασκευής του επιθέματος και 3 συνθήκες γήρανσης. Οι μέθοδοι κατασκευής που επιλέχτηκαν είναι οι Vacuum Bag (VB) και Hand Lay-Up (HLU). Τα στάδια γήρανσης ήταν 10, 20 και 60 ημέρες παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης, καθώς και ένα στάδιο αναφοράς χωρίς εισαγωγή στο θάλαμο. Για κάθε συνδυασμό αυτών των παραγόντων κατασκευάστηκαν 2 δοκίμια (για την αξιολόγηση της επαναληψιμότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων), στα οποία η προετοιμασία της επιφάνειας του μετάλλου πριν την τοποθέτηση του επιθέματος έγινε με αμμοβολή. Επίσης έγινε και ένα ζευγάρι πειραμάτων σε 2 δοκίμια χωρίς επίθεμα και χωρίς εισαγωγή στο θάλαμο (δοκίμια αναφοράς). Τέλος κατασκευάστηκαν 4 επιπλέον δοκίμια με επίθεμα, 2 για κάθε κατασκευαστική μέθοδο, στα οποία η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αερόσφυρα (αεροματσάκονο) και δεν εισήχθησαν στο θάλαμο αλατονέφωσης. Συνολικά κατασκευάστηκαν 22 δοκίμια στα οποία ελέγχθηκε η μηχανική αντοχή τους σε εφελκυσμό.

Η ονοματολογία των δοκιμίων που επιλέχτηκε και σύμφωνα με την οποία θα γίνεται αναφορά σε αυτά εφεξής είναι αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Η ονοματολογία που ακολουθήθηκε, έχει ως εξής:

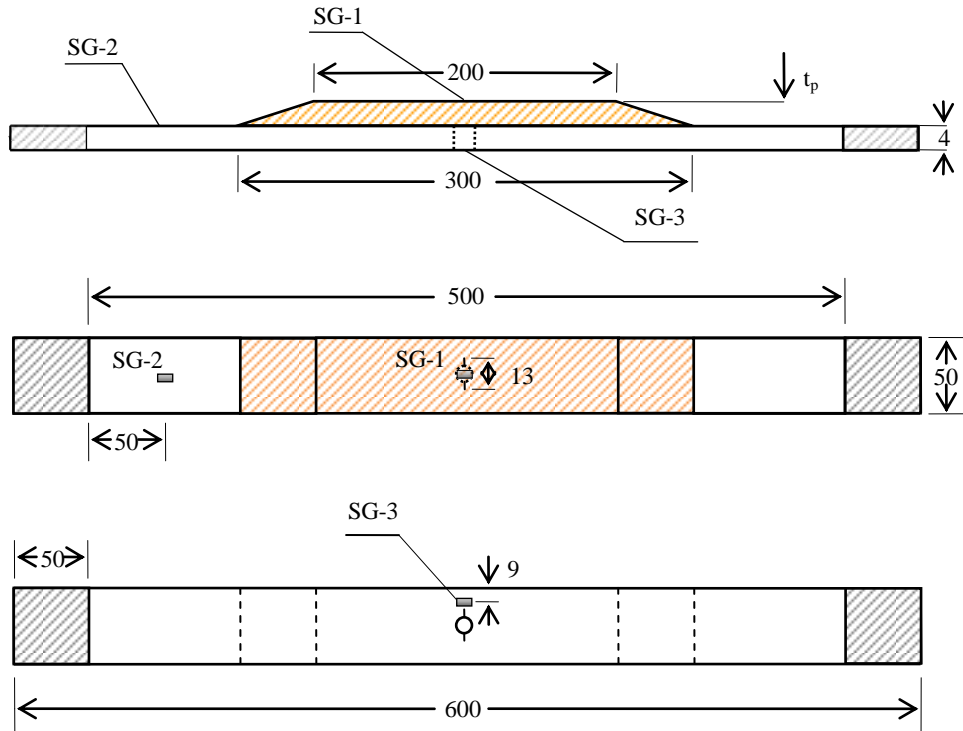
- το πρώτο γράμμα *S* αναφέρεται στο ότι η φόρτιση των δοκιμίων ήταν στατική (static)
- το δεύτερο γράμμα υποδηλώνει την κατασκευαστική μέθοδο με την οποία φτιάχτηκαν τα επιθέματα, *H* για Hand Lay-Up και *V* για Vacuum Bag. Το γράμμα *R* αναφέρεται στα δοκίμια που δεν είχαν επίθεμα και ήταν τα δοκίμια αναφοράς (reference)
- τα ζευγάρια αριθμών 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 σχετίζονται με το χρόνο παραμονής των δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης και αντιστοιχούν σε: 0 (μη εισαγωγή), 10, 20 και 60 ημέρες, αντίστοιχα
- στα δοκίμια που η κατεργασία της επιφάνειας έγινε με αερόσφυρα τοποθετήθηκε το γράμμα *A* μετά τον αριθμό, ενώ σε όλα τα άλλα που έγινε αμμοβολή (ή καμία κατεργασία όπως στα δοκίμια αναφοράς *SR*) δεν χρησιμοποιήθηκε κανένα υποδηλωτικό.

Πίνακας 3.1: Ονοματολογία δοκιμίων.

Specimen	Manufacturing method	Patch	Loading	Surface Preparation	Aging
SR-1 SR-2	-	No	Static	-	No
SH-1 SH-2	Hand Lay-Up	Yes	Static	Sandblasting	No
SH-3 SH-4	Hand Lay-Up	Yes	Static	Sandblasting	30 cycles (10 days)
SH-5 SH-6	Hand Lay-Up	Yes	Static	Sandblasting	60 cycles (20 days)
SH-7 SH-8	Hand Lay-Up	Yes	Static	Sandblasting	180 cycles (60 days)
SV-1 SV-2	Vacuum Bag	Yes	Static	Sandblasting	No
SV-3 SV-4	Vacuum Bag	Yes	Static	Sandblasting	30 cycles (10 days)
SV-5 SV-6	Vacuum Bag	Yes	Static	Sandblasting	60 cycles (20 days)
SV-7 SV-8	Vacuum Bag	Yes	Static	Sandblasting	180 cycles (60 days)
SH-1A SH-2A	Hand Lay-Up	Yes	Static	Air-Hammer	No
SV-1A SV-2A	Vacuum Bag	Yes	Static	Air-Hammer	No

3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η γεωμετρία των δοκιμίων είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Τα δοκίμια είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα με ονομαστικά μεγέθη: ελεύθερο μήκος $L_s=500$ mm, πλάτος $W_s=50$ mm, πάχος $t_s=4$ mm. Για να κατασκευάσουμε κεντρική διαμπερή εγκοπή μήκους $2a=13$ mm, δημιουργήσαμε κεντρική οπή διαμέτρου 10.5 mm και 2 εγκοπές κατά τη διεύθυνση του πλάτους, μήκους 1.25 mm η καθεμία, οι οποίες θα οδηγήσουν τη διάδοση της ρωγμής προς αυτή τη διεύθυνση. Το επίθεμα αποτελείται από τρεις ομάδες στρώσεων πλάτους $W_p=W_s=50$ mm, ενεργού μήκους $L_p=200$ mm και συνολικού πάχους t_p . Οι τρεις στρώσεις επικαλύπτουν η μία την άλλη (tapered) και έχουν μήκη κατά σειρά τοποθέτησης 200 mm, 250 mm και 300 mm. Το πραγματικό μήκος των δοκιμίων είναι 600 mm όμως κατά την τοποθέτηση του δοκιμίου στην υδραυλική μηχανή εφελκυσμού MTS, χρειάζονται 50 mm από κάθε άκρη του δοκιμίου τα οποία μπαίνουν στις αρπάγες της μηχανής (γκρι γραμμοσκιασμένο τμήμα). Για κάθε δοκίμιο μετρήθηκαν οι ακριβείς διαστάσεις, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Το μήκος L_s σε όλες τις περιπτώσεις παραμένει 500 mm. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται και οι θέσεις όπου τοποθετήθηκαν τα επιμηκυσιόμετρα (strain gauges). Τα strain gauges είναι αισθητήρες, ορθογώνιου παραλληλόγραμμου σχήματος και μετράνε την παραμόρφωση στο σημείο όπου είναι τοποθετημένα, κατά τη διεύθυνση του μήκους τους. Αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα είχαν μήκος 10 mm και τοποθετήθηκαν έτσι ώστε οι άξονες x των strain gauges και του δοκιμίου να έχουν την ίδια διεύθυνση (άρα ίδια και με τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου). Οι άξονες x, y και z αντιστοιχούν στις διευθύνσεις μήκους, πλάτους και πάχους, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία δοκιμίων.

Πίνακας 3.2: Ακριβείς διαστάσεις δοκιμίων.

Δοκίμιο	Πάχος χάλυβα t_s (mm)	Πάχος επιθέματος t_p (mm)	Πλάτος $W_s=W_p$ (mm)
SR-1	4.2	-	50.2
SR-2	4.2	-	50.3
SH-1	4.2	4.1	50.1
SH-2	4.3	4.5	50.1
SH-3	4.2	4.8	50.1
SH-4	4.1	4.4	50.2
SH-5	4.2	4.7	50.1
SH-6	4.2	4.6	50.1
SH-7	4.2	4.6	50.2
SH-8	4.2	4.6	50.2
SH-1A	4.1	4.4	50.3
SH-2A	4.1	4.6	50.2
SV-1	4.2	4.1	50.2
SV-2	4.2	4.0	50.2
SV-3	4.2	4.0	50.1
SV-4	4.2	4.4	50.1
SV-5	4.2	4.0	50.2
SV-6	4.2	4.1	50.1
SV-7	4.3	4.2	50.1
SV-8	4.2	4.0	50.2
SV-1A	4.1	4.1	50.2
SV-2A	4.2	4.1	50.2

3.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

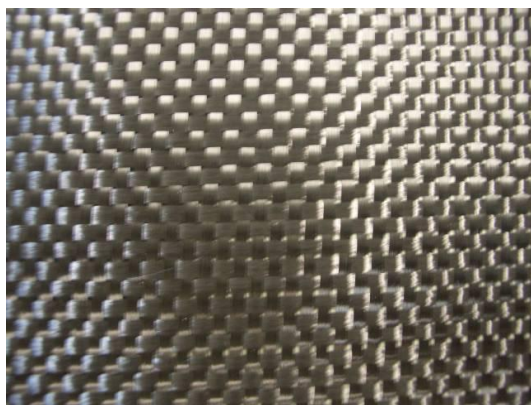
Ο χάλυβας που επιλέχτηκε είναι κοινός ναυπηγικός Grade A. Τα δοκίμια κόπηκαν όλα από την ίδια πλάκα μετάλλου. Για τον ακριβή προσδιορισμό των μηχανικών του ιδιοτήτων, 3 ορθογωνικά δοκίμια χάλυβα καταπονήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Πειραματικές μετρήσεις ιδιοτήτων χάλυβα.

Αριθμός δοκιμίου	Μέτρο ελαστικότητας E_s (GPa)	Όριο διαρροής σ_0 (MPa)
1	195.0	283.3
2	202.3	279.5
3	201.1	279.6

Από το μέσο όρο των τριών μετρήσεων προέκυψε: $E_s=199.5$ GPa και $\sigma_0=280.8$ MPa.

Ο τύπος του ανθρακούφασματος που επιλέχτηκε είχε προσανατολισμό ινών $0^\circ/90^\circ$, πλέξη Plain Weave (βλ. Σχήμα 3.2) και επιφανειακό βάρος 200 gr/m^2 της εταιρείας R&G Faserverbundwerkstoffe. Η ρητίνη είναι η εποξική ρητίνη D.E.R. 358 της εταιρείας Dow, η οποία είναι λεπτόρρευστη (ιξώδες στους $25^\circ\text{C} = 600 - 750 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) και ο σκληρυντής με τον οποίο προσμείχθηκε είναι ο EPAMINE PC13 (αργός, με Pot life 150 g στους $25^\circ\text{C} = 50 \text{ min}$ και με ιξώδες στους $25^\circ\text{C} = 70 - 140 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) της εταιρείας PO.INT.ER S.r.l. Ο συνδυασμός αυτός ινών και ρητίνης χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή επιθεμάτων και με τις δύο μεθόδους κατασκευής (HLU και VB).



Σχήμα 3.2: Πλέξη Plain Weave.

Ο πλήρης χαρακτηρισμός των σύνθετων υλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν τα επιθέματα 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]. Από την τεχνική αυτή έκθεση προκύπτει ο Πίνακας 3.4 με τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπου σ_u είναι η αντοχή του σύνθετου υλικού, ϵ_u είναι η αντίστοιχη παραμόρφωση, 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. Στον πίνακα αυτόν με PW υποδηλώνεται το ύφασμα Plain Weave, ενώ με HLU και VB υποδηλώνονται οι δύο μέθοδοι κατασκευής.

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες σύνθετων υλικών επιθεμάτων.

Υλικό	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	E_p (MPa)	W_f (%)	t_{ply} (mm)
PW/HLU	658.9	1.36	46300	56.0	0.30
PW/VB	759.6	1.35	58000	62.6	0.26

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:

$$SR = \frac{E_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s} \quad (3.1)$$

Από αυτή τη σχέση προκύπτει:

$$t_p = SR \cdot \frac{E_s \cdot t_s}{E_p} \quad (3.2)$$

Ο αριθμός των στρώσεων υπολογίζεται:

$$\text{Αριθμός στρώσεων} = t_p / t_{ply} \quad (3.3)$$

όπου:

E_s = 199.5 GPa, το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

t_s είναι το πάχος του χάλυβα

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 επιθυμητό θα ήταν να μπορούσαμε να επιτύχουμε SR=1 όπως και προτείνεται στη βιβλιογραφία [Turton, T.J.-2005]. Όμως σε αυτήν την περίπτωση θα οδηγούμασταν σε πολύ μεγάλο πάχος επιθέματος σύμφωνα με τη Σχέση 3.2, άρα και αριθμού στρώσεων (Σχέση 3.3), πράγμα το οποίο είναι και μη πρακτικό όταν αναφερόμαστε σε πραγματικές συνθήκες αλλά ενέχει και κινδύνους για την ποιότητα της κατασκευής. Αν για παράδειγμα παίρναμε SR=0.5 για τη μέθοδο HLU θα καταλήγαμε σε πάχος επιθέματος 8.62 mm και αριθμό στρώσεων 29, ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος και απαγορευτικός. Επιλέχθηκε επομένως λόγος ακαμψίας SR=0.3, από τον οποίο προκύπτει πάχος επιθέματος t_p =5.17 mm και 4.13

mm για τις μεθόδους HLU και VB αντίστοιχα, το οποίο, διαιρώντας το με το t_{ply} (Πίνακας 3.4), προκύπτει ο αριθμός των στρώσεων του επιθέματος, ο οποίος είναι 17 στρώσεις για τη μέθοδο HLU και 16 στρώσεις για τη μέθοδο VB. Στον Πίνακα 3.5 φαίνονται συγκεντρωτικά οι υπολογισθείσες τιμές που λήφθησαν υπόψη για την κατασκευή των επιθεμάτων.

Πίνακας 3.5: Γεωμετρία και μέτρο ελαστικότητας των επιθεμάτων που λήφθησαν υπόψη για την κατασκευή των επιθεμάτων.

Επίθεμα	Μέτρο ελαστικότητας E_p (GPa)	Πάχος επιθέματος t_p (mm)	Πάχος στρώσης t_{ply} (mm)	Αριθμός στρώσεων
PW/HLU	46.3	5.17	0.30	17
PW/VB	58.0	4.13	0.26	16

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, το ενεργό μήκος του επιθέματος είναι 200 mm. Για την αποφυγή του κινδύνου αποκόλλησης του επιθέματος στα άκρα του, επελέγη η τμηματική διαστρωμάτωση. Έτσι, οι στρώσεις του σύνθετου χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες, οι οποίες έχουν το ίδιο πλάτος αλλά διαφορετικό μήκος. 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 χαλύβδινο δοκίμιο για την κατασκευή του επιθέματος, έχουν ως εξής:

➤ Μέθοδος HLU

- 1^η Ομάδα – 5 στρώσεις μήκους 200 mm
- 2^η Ομάδα – 6 στρώσεις μήκους 250 mm
- 3^η Ομάδα – 6 στρώσεις μήκους 300 mm

➤ Μέθοδος VB

- 1^η Ομάδα – 5 στρώσεις μήκους 200 mm
- 2^η Ομάδα – 5 στρώσεις μήκους 250 mm
- 3^η Ομάδα – 6 στρώσεις μήκους 300 mm

Επομένως, κάθε επόμενη ομάδα στρώσεων επικαλύπτει την προηγούμενη.

Μετά την τέλεση των πειραμάτων μετρήθηκε η περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα των επιθεμάτων όλων των δοκιμίων που δεν τοποθετήθηκαν στο θάλαμο αλατονέφωσης. Η διαδικασία αυτή δεν έγινε για τα δοκίμια που εισήχθησαν στο θάλαμο αλατονέφωσης διότι δεν είναι γνωστή η επίδραση που έχει το διαβρωτικό περιβάλλον στα επιθέματα. Η μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα του σύνθετου επιθέματος, στην οποία βασίστηκε ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας, έγινε σύμφωνα με τη μεθοδολογία του προτύπου ISO/DIS 1183-1.2:1999 “Plastics – Methods for determining the density of non-cellular plastics”. Αρχικά έγινε βύθιση δοκιμίου, διαστάσεων 15×15 mm το οποίο κόπηκε από το ενεργό μήκος του επιθέματος, σε διάλυμα HNO₃ το οποίο είχε ζεσταθεί στους 160 °C. Μετά την αντίδραση του νιτρικού οξέως με τη ρητίνη, το μίγμα χυνόταν σε φίλτρο

προσαρμοσμένο σε κεραμικό χωνί. Ύστερα γινόταν απόπλυση με απιονισμένο νερό και θέρμανση των ινών άνθρακα για να αποβάλλουν την υγρασία. Το βάρος των ινών άνθρακα που είχαν απομείνει (καθώς η ρητίνη είχε αντιδράσει με το νιτρικό οξύ) συγκρινόταν με το ολικό βάρος του δοκιμίου πριν τη βύθισή του στο οξύ και προέκυπε η περιεκτικότητα των ινών άνθρακα του επιθέματος. Η ίδια μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί και σε προηγούμενες πειραματικές διαδικασίες του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα σύνθετων επιθεμάτων [Μυρισιώτης-2006, Κουλουκούρας-2008]. Για τα επιθέματα που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο HLU η περιεκτικότητα σε ίνες ήταν $W_f=52.1\%$ κατά μέσο όρο, ενώ για τη μέθοδο VB $W_f=68.8\%$. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν για κάθε δοκίμιο, καθώς και η τυπική απόκλιση, σ και ο συντελεστής μεταβλητότητας, CV. Από τον πίνακα αυτόν βλέπουμε πως η διασπορά των μετρήσεων και για τις δύο μεθόδους επίστρωσης του επιθέματος είναι ικανοποιητική και είναι αρκετά ασφαλές να χρησιμοποιήσουμε τον μέσο όρο.

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα μετρήσεων για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα των επιθεμάτων.

	ΔΟΚΙΜΙΟ	W_f	Μέσος Όρος	σ	CV
HLU	SH-1	53.1%	52.1%	0.036	0.069
	SH-2	54.5%			
	SH-1A	50.2%			
	SH-2A	50.6%			
VB	SV-1	69.5%	68.8%	0.012	0.018
	SV-2	67.8%			
	SV-2A	69.1%			
	SV-1A	68.9%			

Λόγω της απόκλισης που έχουν οι τιμές αυτές από τις αντίστοιχες του Πίνακα 3.4, θα διαφέρει και το μέτρο ελαστικότητας. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε θεωρητικά βάσει της περιεκτικότητας σε ίνες που μετρήθηκε και των αρχικών ιδιοτήτων του Πίνακα 3.4. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε γι'αυτόν το σκοπό βασίστηκε στο «νόμο των αναμίξεων»:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \\ V_f &= W_f \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \\ V_m &= W_m \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_x = E_f \cdot W_f \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m \cdot W_m \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (3.4)$$

όπου:

E_x είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young του σύνθετου κατά τη διεύθυνση του μήκους

$E_f = 640000$ MPa, το μέτρο ελαστικότητας των ινών άνθρακα

$E_m = 3000$ MPa, το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας

V_f και V_m είναι οι περιεκτικότητες κατ' όγκο των ινών και της ρητίνης αντίστοιχα

W_f και W_m είναι οι περιεκτικότητες κατά βάρος των ινών και της ρητίνης αντίστοιχα

ρ_c είναι η πυκνότητα του σύνθετου επιθέματος

$\rho_f = 2.12$ g/cm³, η πυκνότητα των ινών άνθρακα

$\rho_m = 1.14$ g/cm³, η πυκνότητα της ρητίνης.

Οι τιμές των μεγεθών E_f , E_m , ρ_f και ρ_m ελήφθησαν από τα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστριών εταιρειών. Επομένως, το μέτρο ελαστικότητας E_x' , ενός επιθέματος με διαφορετική περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες άνθρακα από αυτή του Πίνακα 3.4 μπορεί να υπολογιστεί βάσει του γνωστού E_x του Πίνακα 3.4, από τον ακόλουθο λόγο:

$$\frac{E_x'}{E_x} = \frac{E_f \cdot W_f' \cdot \frac{\rho_c'}{\rho_f} + E_m \cdot W_m' \cdot \frac{\rho_c'}{\rho_m}}{E_f \cdot W_f \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} + E_m \cdot W_m \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m}} \quad (3.5)$$

Υποθέτοντας ότι $\rho_c = \rho_c'$ και γνωρίζοντας τις τιμές των E_x , W_f και $W_m = 1 - W_f$ (Πίνακας 3.4), και έχοντας μετρήσει τα W_f' και W_m' για τις δύο μεθόδους κατασκευής, καταλήγουμε στον υπολογισμό των τελικά επιτευχθέντων μέτρων ελαστικότητας για τις δύο μεθόδους κατασκευής. Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίστηκαν με την παραπάνω μέθοδο, ο μέσος όρος του πάχους του σύνθετου επιθέματος για τις δύο μεθόδους που προκύπτει από τον Πίνακα 3.2, και διαιρώντας με τον αριθμό των στρώσεων που επιλέξαμε για κάθε μέθοδο κατασκευής προκύπτει ο μέσος όρος του πάχους της στρώσης.

Πίνακας 3.7: Τελικά επιτευχθείσα γεωμετρία και μέτρο ελαστικότητας των επιθεμάτων.

Επίθεμα	E_p (MPa)	W_f (%)	t_p (mm)	t_{ply} (mm)
PW/HLU	43545	52.1	4.53	0.27
PW/VB	63008	68.8	4.10	0.26

3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα χαλύβδινα δοκίμια αρχικά κόπηκαν στις επιθυμητές διαστάσεις με υδροκοπή (water jet). Επιλέχτηκε αυτή η μέθοδος κοπής προς αποφυγή οποιασδήποτε θερμικής καταπόνησης του μετάλλου που θα είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία παραμενουσών τάσεων. Στην

κατεργασία με δέσμη νερού, το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου αφαιρείται με μηχανική πρόσκρουση μιας υψηλής ταχύτητας δέσμης νερού. Η κοπή με δέσμη νερού είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την κατεργασία μετάλλων και σύνθετων πολυμερικών υλικών, ενισχυμένων με ίνες, καθώς η θερμική φθορά του προς κατεργασία τεμαχίου αποφεύγεται σχεδόν πλήρως [Δ.Παντελής-2006].

Στη συνέχεια έγινε η προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμίων όπου θα τοποθετούνταν το συνθετικό επίθεμα, ώστε να δημιουργηθεί τραχύτητα στην επιφάνεια με σκοπό την καλύτερη συνάφεια μεταξύ κόλλας και μετάλλου. Ακολουθήθηκαν δύο μέθοδοι προετοιμασίας, με αμμοβολή της επιφάνειας (Σχήμα 3.3) και με χρήση αεροματσάκονου. Σε κάθε δοκίμιο αφού υπέστη αμμοβολή ή τη χρήση αεροματσάκονου, καθαρίστηκε η επιφάνειά του με ασετόν για την απομάκρυνση ρινισμάτων μετάλλου, σκόνης, κτλ. Κατόπιν, χαράχτηκαν και ανοίχτηκαν σε όλα τα δοκίμια οι οπές χρησιμοποιώντας φρέζα και τέλος οι εγκοπές με ηλεκτρική σέγα (Σχήμα 3.4).

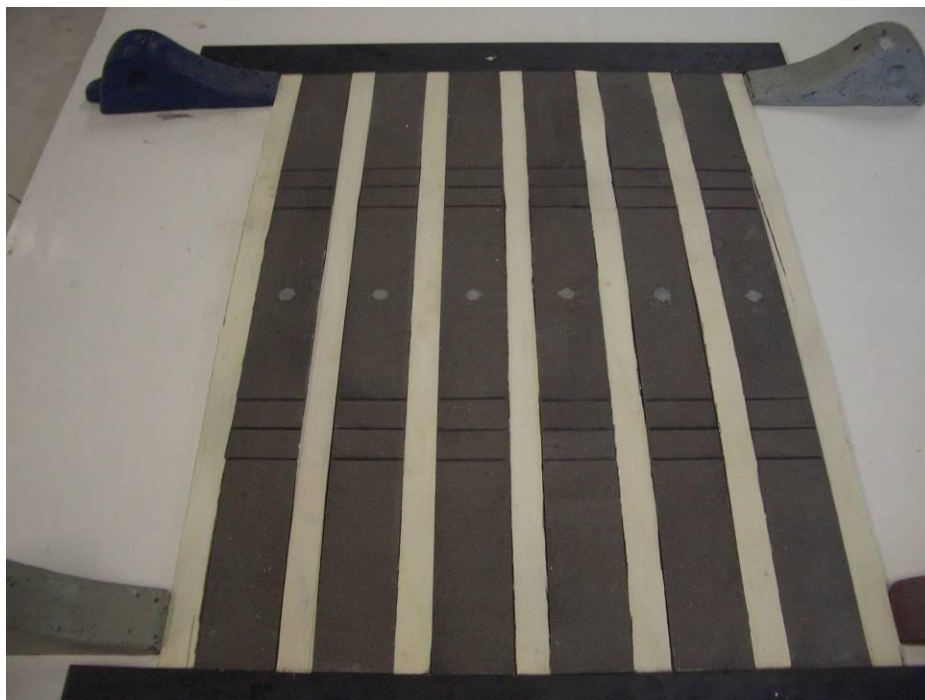


Σχήμα 3.3: Δοκίμιο μετά από αμμοβολή και άνοιγμα οπής.



Σχήμα 3.4: Οπή με τις εγκοπές.

Το επόμενο στάδιο ήταν η τοποθέτηση του επιθέματος πάνω στο μέταλλο. Στην 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 να επιτύχουμε ομοιομορφία των επιθεμάτων και για πρακτικούς λόγους (εξοικονόμηση χρόνου), 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 του μετάλλου και πλάτους 20 mm (Σχήμα 3.5). 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 διέρρηε η υγρή ρητίνη (εκεί οφείλεται και η τοποθέτηση κόντρα πλακέ στα άκρα του πρώτου και τελευταίου δοκιμίου).



Σχήμα 3.5: Επίστρωση δοκιμίων κατά ομάδες.

Εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι για την κατασκευή του επιθέματος; η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (Hand Lay-Up) και η μέθοδος επίστρωσης με σάκο κενού (Vacuum Bag).

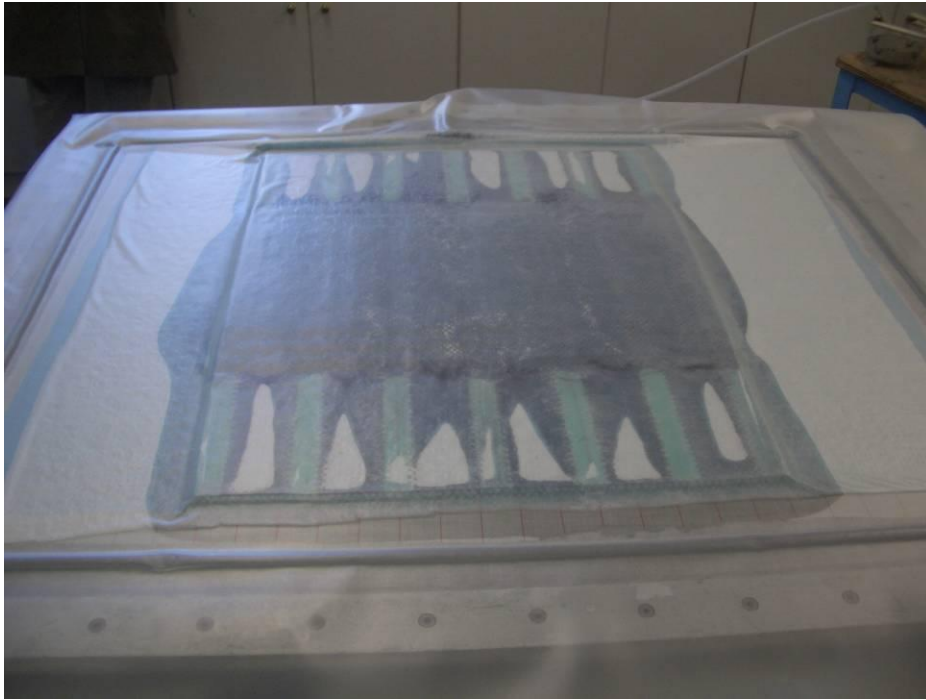
Στη μέθοδο Hand Lay-Up (HLU) αφού τοποθετήθηκαν τα μεταλλικά δοκίμια σε ομάδες των 6 επικαλύφθηκαν με μια στρώση ρητίνης η οποία λειτουργεί σαν κόλλα μεταξύ σύνθετου και μετάλλου. Στη συνέχεια μπαίνει μία στρώση υφάσματος η οποία διαβρέχεται από τη ρητίνη με τη βοήθεια ειδικού ρολλού. Με τη χρήση πινέλου απλώνεται νέα στρώση

ρητίνης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να τοποθετηθούν όλες οι στρώσεις του υφάσματος (Σχήμα 3.6). Τα δοκίμια αφήνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 50 ώρες ώστε να πολυμεριστεί πλήρως η ρητίνη.

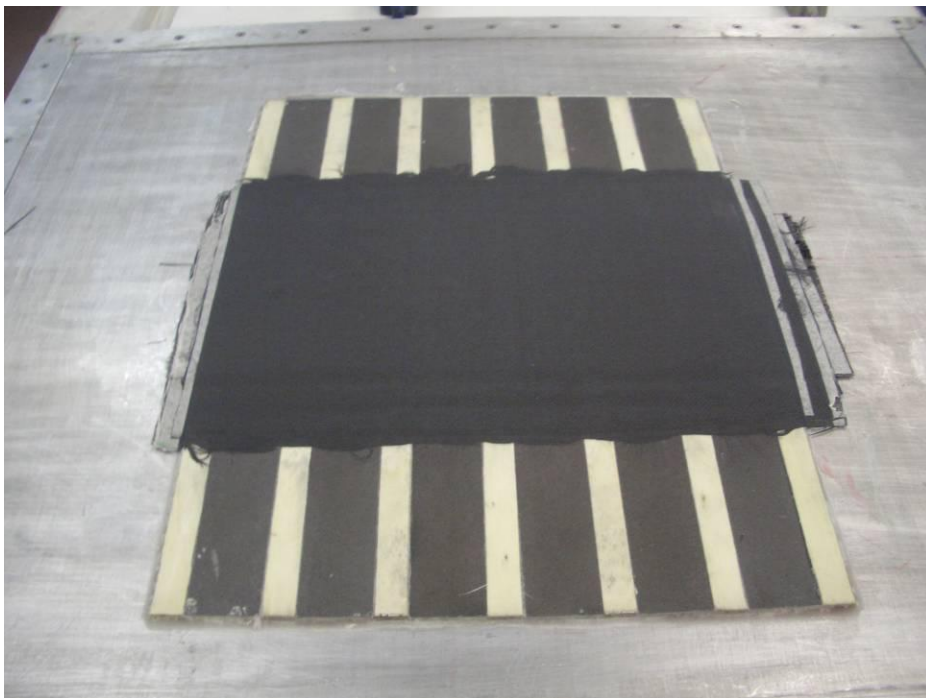


Σχήμα 3.6: Μέθοδος Hand Lay-Up.

Στην μέθοδο Vacuum Bag (VB) η επίστρωση γίνεται όπως ακριβώς στη μέθοδο HLU. Όμως το πολύστρωτο δεν αφήνεται να πολυμεριστεί στο περιβάλλον αλλά καλύπτεται αεροστεγώς και ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί αναρροφάται με αποτέλεσμα την εξωτερική άσκηση πίεσης στο πολύστρωτο. Τα δοκίμια, μετά την επίστρωση των επιθεμάτων, καλύφθηκαν κατά σειρά με ύφασμα αποκόλλησης, με διάτρητη μεμβράνη, με ύφασμα αναπνοής και τέλος με πλαστικό φιλμ κενού με τη βοήθεια του οποίου κλείστηκαν αεροστεγώς (Σχήμα 3.7). Με τη χρήση σπειροσωλήνα και αντλίας κενού αναρροφάται ο αέρας και δημιουργείται εξωτερική πίεση 0.6 bar. Αφήνονται έτσι τα δοκίμια για 50 ώρες μέχρι τον πλήρη πολυμερισμό της ρητίνης (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.7: Μέθοδος Vacuum Bag.



Σχήμα 3.8: Μέθοδος Vacuum Bag μετά τον πολυμερισμό της ρητίνης.

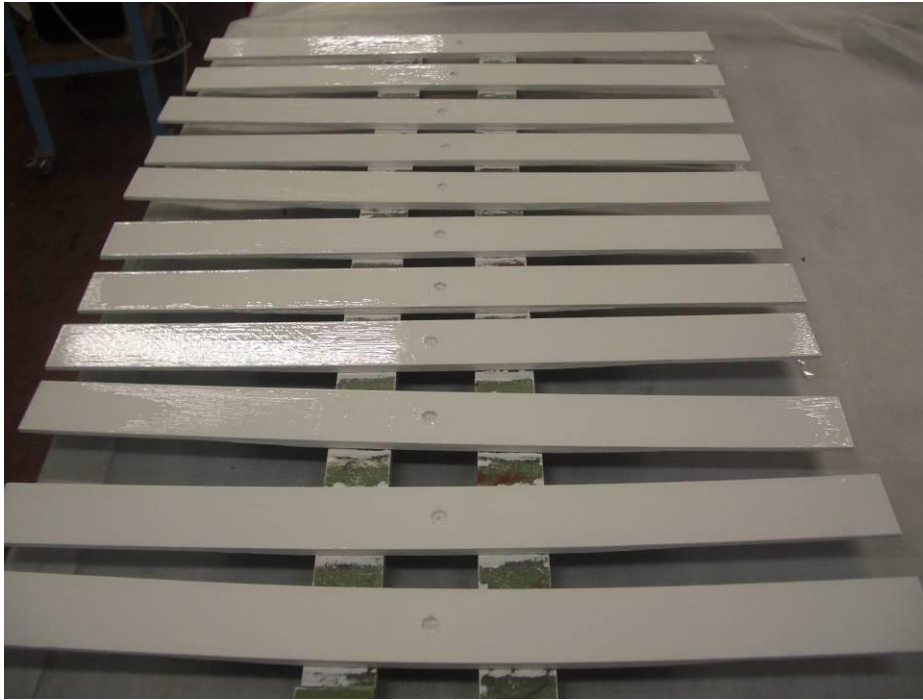
Και στις δύο μεθόδους κατασκευής έγινε επικάλυψη του πάγκου εργασίας αλλά και της πλευράς των δοκιμίων και των κόντρα πλακέ που ακουμπούσαν στον πάγκο όπως και των πλαϊνών τους πλευρών, με ειδικό αποκολλητικό κερί. Αν δεν γινόταν αυτό δεν θα ήταν δυνατή η εύκολη αποκόλλησή τους λόγω της ρητίνης η οποία κατά τη διαδικασία της επίστρωσης διαρρέει. Οι οπές για να προστατευθούν από την περρίσεια ρητίνης καλύφθηκαν με μαστιχοταινία.

3.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

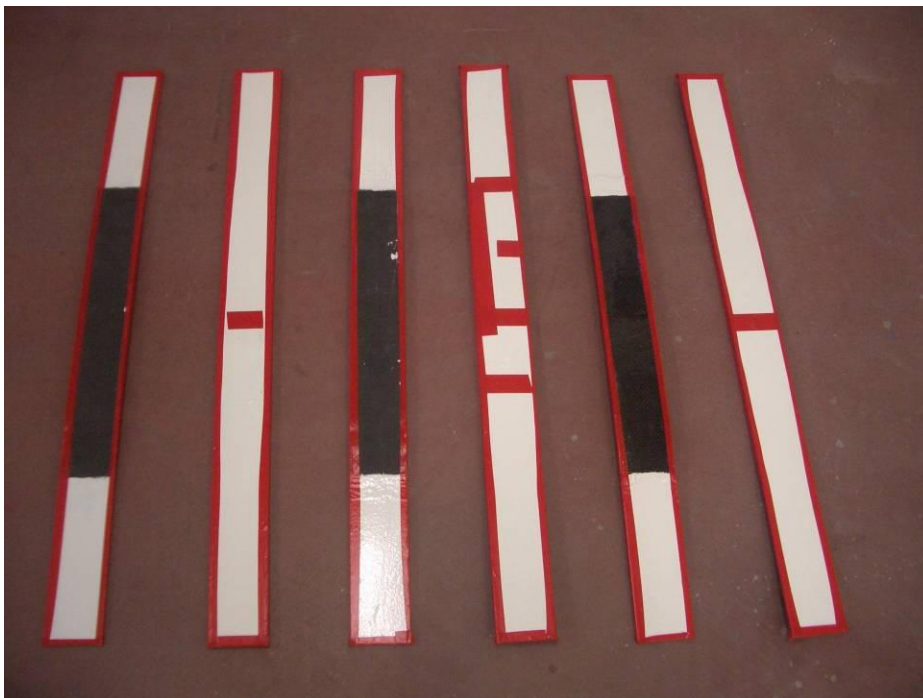
Με τη χρήση παχυμέτρου μετρήθηκαν οι ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων (Πίνακας 3.2). Σε όσα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο αλατονέφωσης καθαρίστηκε η επιφάνειά τους με ασετόν και στη συνέχεια βάφτηκαν με πινέλο. Το μοναδικό τμήμα των δοκιμίων που δεν βάφτηκε ήταν η επιφάνεια του σύνθετου. Αυτό έγινε γιατί σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση που θα είχε ο θάλαμος αλατονέφωσης στο σύνθετο αλλά και να προστατευθεί το μέταλλο από τη διάβρωση. Το μέταλλο πρώτα περάστηκε ένα χέρι αντισκωριακό αστάρι RUST PRIMER της BIBEXΡΩΜ (Σχήμα 3.9) και μετά ένα χέρι λευκή βαφή VIVEMETAL της BIBEXΡΩΜ (Σχήμα 3.10). Οι ακμές των δοκιμίων, η οπή και οι όποιες τυχόν ατέλειες της βαφής καλύφθηκαν με μονωτική ταινία βινυλίου 3M adhesive tape για να προστατευθούν από τυχόν διάβρωση, καθώς το στρώμα της βαφής σε αυτά τα σημεία ήταν αρκετά λεπτό (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.9: Βαφή με αστάρι (εμπρόσθια και οπίσθια όψη).



Σχήμα 3.10: Βαφή με μπογιά.



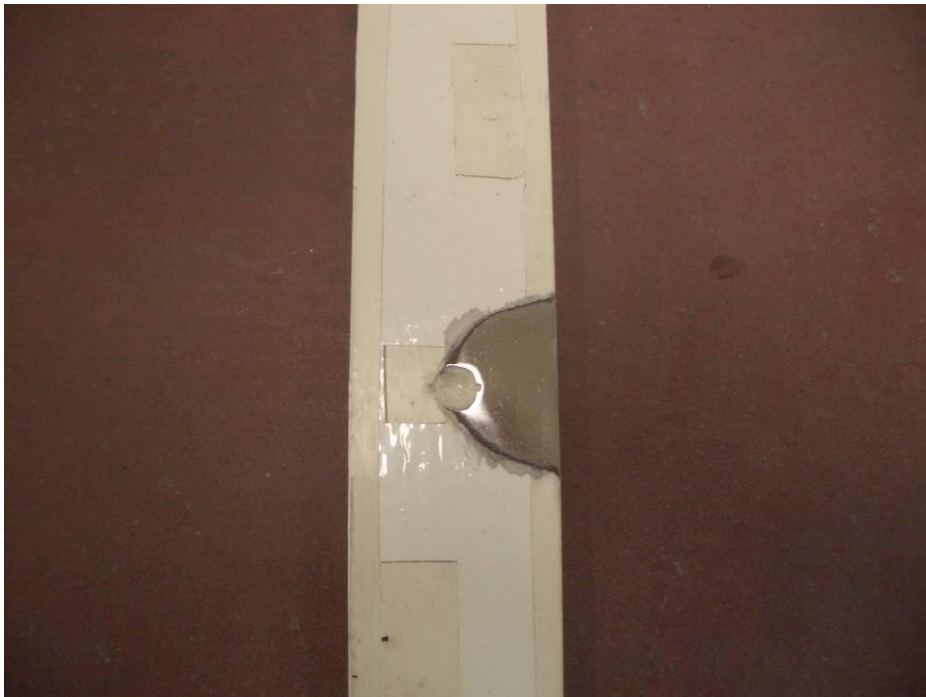
Σχήμα 3.11: Δοκίμια έτοιμα για τον θάλαμο αλατονέφωσης μετά την επικάλυψη με ταινία βινυλίου ακμών και ατελειών.

Σε όλα τα δοκίμια, πριν την τοποθέτησή τους στη μηχανή εφελκυσμού, ήταν απαραίτητο να γίνει λείανση της επιφάνειας για την αφαίρεση του στρώματος βαφής στις θέσεις που τοποθετήθηκαν τα strain gauges. Η λείανση γίνεται με ειδικό τριβείο με γυαλόχαρτα από καρβίδιο του πυριτίου (SiC), ξεκινώντας από το τραχύτερο προς το λιγότερο τραχύ (Σχήμα 3.12, 3.13, 3.14). Τα λειαντικά γυαλόχαρτα τοποθετούνται διαδοχικά στον περιστρεφόμενο

δίσκο. Μετά τη λείανση της επιφάνειας ακολούθησε ο καθαρισμός της με ασετόν και κολλήθηκαν τα strain gauges. Για να στεγνώσει η κόλλα των strain gauges χρειάζοντουσαν 24 ώρες.



Σχήμα 3.12: Χρήση ειδικού τριβείου.



Σχήμα 3.13: Επιφάνεια μετά τη λείανση.



Σχήμα 3.14: Λειαντικό μηχάνημα Struers Transpol-2.

3.6 ΘΑΛΑΜΟΣ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ

3.6.1 Δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης σε κλιματικούς θαλάμους

Η χρήση της μεθόδου της αλατονέφωσης εφαρμόζεται για περισσότερα από 100 χρόνια για τον έλεγχο της επιδεκτικότητας στη διάβρωση μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών, καθώς και για τον έλεγχο του βαθμού προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι δοκιμές εφαρμόζονται για τη σύγκριση της συμπεριφοράς μετάλλων και επικαλύψεων κατά την εφαρμογή συγκεκριμένου προτύπου. Στην επιστημονική κοινότητα γίνονται εκτεταμένες συζητήσεις σχετικά με την αξία των δοκιμών αυτών. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητο η προετοιμασία των δοκιμίων, του πειράματος, αλλά και η αποτίμηση των αποτελεσμάτων να εφαρμόζονται με ακρίβεια. Τότε είναι δυνατόν να ληφθούν μετρήσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια την εφαρμογή προτυποποιημένου «ποσού διάβρωσης» για τη σύγκριση της σχετικής συμπεριφοράς των υλικών ή και των επιστρωμάτων.

Για τη διεξαγωγή δοκιμών διάβρωσης σε επικαλύψεις προστασίας του χάλυβα, προτάθηκε για πρώτη φορά δοκιμή με ουδέτερο διάλυμα αλατονέφωσης στο πλαίσιο του προτύπου ASTM B117.

Πολλές βελτιώσεις και αναθεωρήσεις έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια τόσο ως προς τις δοκιμές αλατονέφωσης όσο και στους θαλάμους που χρησιμοποιούνται και στις διατάξεις. Οι πιο κοινά αποδεκτές μέθοδοι εφαρμογής δοκιμών αλατονέφωσης περιγράφονται με ακρίβεια στα πρότυπα:

- ASTM B117 “Standard method of salt spray (FOG) testing”
- BS368 “Standard test method for copper-accelerated acetic- salt spray (FOG) testing”

- ASTM G 85 “Standard practice for modified salt spray (FOG) testing”

Σημειώνεται ότι υπάρχουν δοκιμές διάβρωσης στις οποίες εφαρμόζονται συνθήκες υψηλής υγρασίας, όπου απιονισμένο νερό χρησιμοποιείται ως συστατικό της διάβρωσης και στις οποίες δεν περιλαμβάνεται άλας ως στοιχείο διάβρωσης (ASTM D1735, ASTM D2247, ASTM G 60).

Οι δοκιμές αλατονέφωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στις δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες και στις δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες.

«Στατικές» συνθήκες: Στις στατικές δοκιμές οι συνθήκες και η ατμόσφαιρα παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής: θερμοκρασία, πυκνότητα νέφους, pH του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Οι δοκιμές μπορεί να διαρκούν 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα για όλο το διάστημα έκθεσης. Στη συνέχεια τα δοκίμια απομακρύνονται από το θάλαμο για μελέτη και ανάλυση. Το πρότυπο ASTM B117 περιγράφει στατικές συνθήκες δοκιμής αλατονέφωσης. Η διαδικασία του προτύπου αυτού καθορίζει διαρκή έκθεση σε αλατονέφωση 5% σε θερμοκρασία 35°C. Στα τελευταία 70 χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις στο πρότυπο ASTM B 117. Ωστόσο παρά τις βελτιώσεις αποτελεί κοινό τόπο ότι τα αποτελέσματα δοκιμών αλατονέφωσης σε στατικές συνθήκες δεν ανταποκρίνονται στα φαινόμενα διάβρωσης που παρατηρούνται στο περιβάλλον λειτουργίας.

«Κυκλικές» συνθήκες: Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στο σχεδιασμό δοκιμών που προσομοιάζουν περισσότερο ρεαλιστικά την πραγματική έκθεση στο περιβάλλον και τις συνθήκες λειτουργίας. Με γνώμονα αυτό σχεδιάζονται νέες κυκλικές δοκιμές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές, τα δοκίμια υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη σειρά βημάτων συγκεκριμένου χρόνου, διαφορετικής ατμόσφαιρας, έως ότου ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος χρόνος έκθεσης ή αριθμός κύκλων. Ένα πλήρες σύνολο βημάτων συνιστά έναν κύκλο. Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν:

- Διαφορετικές θερμοκρασίες
- Μεταβαλλόμενα επίπεδα σχετικής υγρασίας RH (20-100%)
- Διάφορα διαβρωτικά συστατικά (ρυπαντές, ηλεκτρολύτες)

Οι δοκιμές κυκλικής διάβρωσης θεωρούνται από πολλούς περισσότερο ρεαλιστικές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές προκαλείται διάβρωση των υλικών κατά τρόπο που ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα από τους συμβατικούς τρόπους έκθεσης. Δεδομένου ότι στο περιβάλλον λειτουργίας ενός υλικού περιλαμβάνονται συνήθως υγρές και ξηρές συνθήκες, στόχος είναι οι εργαστηριακές δοκιμές να προσομοιάζουν τις φυσικές κυκλικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα της σύγχρονης έρευνας αποδεικνύουν ότι στις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης ο σχετικός ρυθμός διάβρωσης, η δομή και η μορφολογία που προκύπτει προσομοιάζουν το περιβάλλον λειτουργίας. Κατά τις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης, τα δοκίμια εκτίθενται σε διαφορετικό περιβάλλον σε επαναλαμβανόμενο κύκλο. Οι απλοί κύκλοι αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες συνθήκες αλατονέφωσης και ξήρανσης. Οι πιο σύγχρονες αυτόματες μέθοδοι περιλαμβάνουν κύκλους πολλών βημάτων, όπως, υγρασία ή συμπύκνωση μαζί με αλατονέφωση και ξήρανση.

Για τις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα που καθορίζουν με ακρίβεια τις συνθήκες του πειράματος :

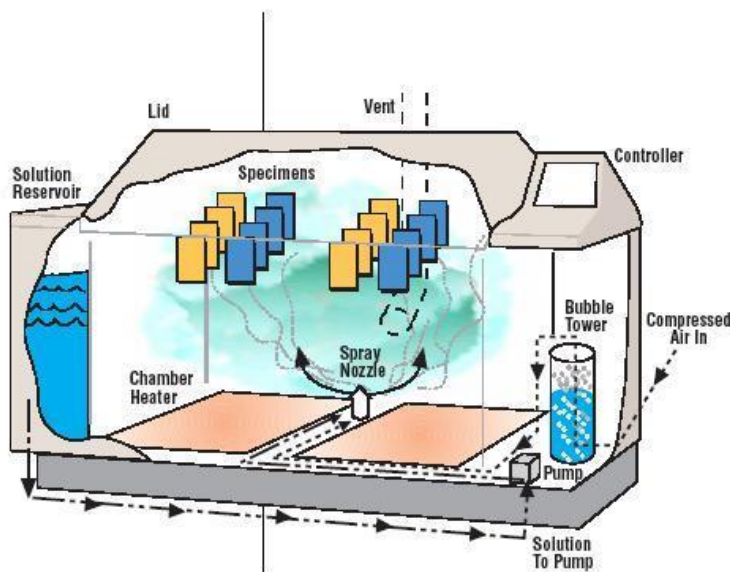
- ASTM G85 “Standard practice for modified salt spray (FOG) testing”
- ISO 14993 (2001) “ Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, “dry” and “wet” conditions”

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υιοθετήθηκε το πρότυπο ISO 14993 (2001) .

Οι συνθήκες αλατονέφωσης – ξήρανσης – υγρασίας στις οποίες εκτίθενται τα δοκίμια περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια :

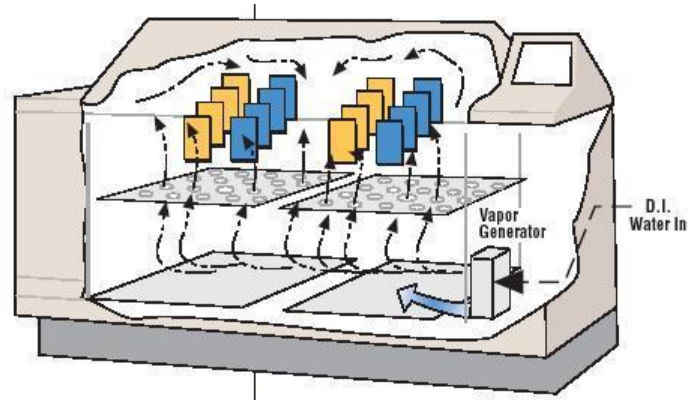
Αλατονέφωση (Σχ. 3.15): Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της αλατονέφωσης, ο θάλαμος λειτουργεί ως συμβατική διάταξη αλατονέφωσης:

- Ο συμπιεσμένος αέρας υγροποιείται περνώντας από τη στήλη φυσαλίδων (bubble tower) κατά τη διαδρομή του προς το ακροφύσιο ψεκασμού.
- Διαβρωτικό διάλυμα αντλείται από την εσωτερική δεξαμενή (reservoir) στο ακροφύσιο ψεκασμού, όπου αναμιγνύεται με το συμπιεσμένο αέρα.
- Το ακροφύσιο ψεκασμού ατμοποιεί το διάλυμα και τον αέρα, δημιουργώντας νέφος διάβρωσης.
- Οι θερμοστάτες του θαλάμου (chamber heaters) διατηρούν την προγραμματισμένη θερμοκρασία του θαλάμου.



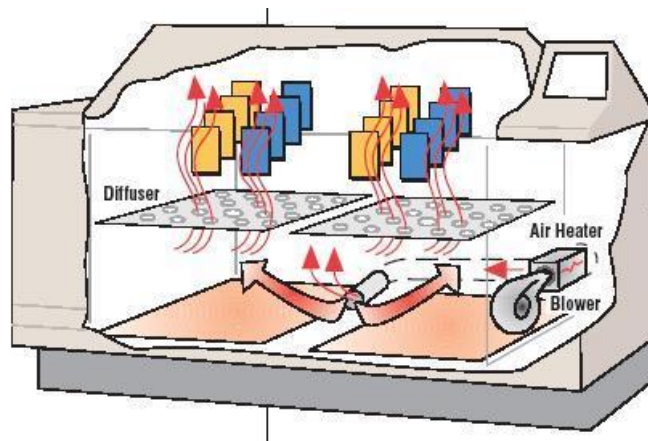
Σχήμα 3.15: Συνθήκες Αλατονέφωσης στον κλιματικό θάλαμο.

Ξήρανση (Σχ. 3.16): Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, ο συμπιεσμένος αέρας οδηγεί τον αέρα του δωματίου σε ένα θερμοστάτη αέρος στο θάλαμο. Αυτό δημιουργεί συνθήκες χαμηλής υγρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου. Η θερμοκρασία του θαλάμου ελέγχεται από τους θερμοστάτες του θαλάμου και το θερμοστάτη αέρος.



Σχήμα 3.16: Συνθήκες Ξήρανσης στον κλιματικό θάλαμο.

Υγρασία (Σχ. 3.17): Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αυτής, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας παρέχοντας ατμούς νερού στο θάλαμο.



Σχήμα 3.17: Συνθήκες Υγρασίας στον κλιματικό θάλαμο.

3.6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά θαλάμου

Ο θάλαμος αλατονέφωσης που χρησιμοποιήθηκε σ' αυτή τη διπλωματική είναι ο Q FOG CCT1100 (Σχήμα 3.18), της εταιρείας Q Panel και διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Ονομαστικό μέγεθος 1100 l
- Χωρητικότητα με υγρό 1103 l
- Χωρητικότητα χωρίς υγρό 857 l



Σχήμα 3.18: Θάλαμος αλατονέφωσης (Q FOG CCT 1100).

Ο θάλαμος αλατονέφωσης είναι αρκετά μεγάλης χωρητικότητας ώστε να διασφαλίζονται ομοιογενείς συνθήκες κατανομής συνθηκών θερμοκρασίας, υγρασίας και κατανομής ψεκασμού. Τα ανώτερα μέρη του θαλάμου σχεδιάζονται έτσι ώστε οι σταγόνες που σχηματίζονται από την αλατονέφωση στις επιφάνειές του να μην πέφτουν στα δείγματα.

Τα κυριότερα μέρη του θαλάμου είναι τα εξής :

Πίνακας ελέγχου: Οι συνθήκες δοκιμών ελέγχονται συνεχώς κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας.

Δοχείο διαλύματος άλατος: Τα 120 l εξασφαλίζουν αρκετό διάλυμα για να μπορεί να πραγματοποιηθεί αλατονέφωση έως και για 5 συνεχόμενες ημέρες.

Στήλη φυσαλίδων (Bubble tower): Ο σκοπός αυτής της διάταξης είναι ο κορεσμός του αέρα με υγρασία πριν να φτάσει το ακροφύσιο εκνέφωσης. Για το λόγο αυτό επιτυγχάνεται κορεσμός του αέρα σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές του θαλάμου. Η θερμοκρασία και ο κορεσμός ελέγχονται αυτόματα.

Γεννήτρια ατμού (Vapor generator): Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της υγρασίας, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας από ατμούς που παράγονται κατά τη θέρμανση νερού στο Vapor generator.

Συμπιεστής αέρα (Purge Blower) και Εναλλάκτης θερμότητας (Air Heater): Ο συμπιεστής αέρα ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για να φέρνει αέρα δωματίου στο θάλαμο. Όταν απαιτείται περιβάλλον υψηλότερο του εργαστηρίου, ο εναλλάκτης θερμότητας ενεργοποιείται και η ροή αέρος από τον συμπιεστή περνάει από τον ενεργοποιημένο εναλλάκτη θερμότητας στη διαδρομή του προς το θάλαμο.

Θερμικές πλάκες: Οι δύο πλάκες είναι τοποθετημένες στον πυθμένα του θαλάμου. Χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αλατονέφωσης. Επίσης ενεργοποιούνται, όποτε χρειάζεται, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για τη διατήρηση της προγραμματισμένης θερμοκρασίας θαλάμου.

3.6.3 Πρότυπο ISO 14993:2001

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η πειραματική διαδικασία έγινε με βάση την πρότυπη διαδικασία ISO 14993 (2001). Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο ISO 14993 αναφέρεται σε «Διάβρωση μετάλλων και κραμάτων – Επιταχυνόμενη δοκιμή που περιλαμβάνει κυκλική έκθεση σε συνθήκες αλατονέφωσης, ξήρανσης και υγρασίας». Στο πρότυπο αυτό περιγράφεται η διάταξη και η πειραματική διαδικασία δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης για τη συγκριτική εκτίμηση υλικών με ή χωρίς προστατευτικές επικαλύψεις σε εξωτερικό περιβάλλον με υψηλά ποσοστά αλάτων. Το πρότυπο αυτό εφαρμόζεται για μέταλλα και κράματα, μεταλλικά επιστρώματα (ανοδικά και καθοδικά), οργανικά επιστρώματα σε μεταλλικά υλικά κ.λ.π.

Το διάλυμα που χρησιμοποιείται είναι διάλυμα NaCl 5%. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ωστόσο χρησιμοποιήθηκε διάλυμα NaCl 3.5%, που αντιστοιχεί στην περιεκτικότητα του θαλασσινού νερού σε άλας NaCl. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, κάθε κύκλος περιλαμβάνει τρία βήματα : αλατονέφωση, ξήρανση, υγρασία. Ο συνολικός χρόνος κάθε κύκλου είναι 8 ώρες και αποτελείται από τρία βήματα : 2 ώρες αλατονέφωση, 4 ώρες συνθήκες ξήρανσης, 2 ώρες συνθήκες υγρασίας.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του ενισχυμένου με συνθετικό επίθεμα χάλυβα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τοποθετήθηκαν 12 δοκίμια στον κλιματικό θάλαμο. Αναλυτικότερα, οι συνθήκες περιγράφονται στον Πίνακα 3.8 που ακολουθεί :

Πίνακας 3.8: Συνθήκες θαλάμου αλατονέφωσης.

Συνθήκες αλατονέφωσης	2 ώρες
Θερμοκρασία	35°C±2°C
Διάλυμα άλατος	3.5% Διάλυμα NaCl
Παροχή διαλύματος	0.6 litres per hour
Συνθήκες Ξήρανσης	4 ώρες
Θερμοκρασία	60°C±2°C
Σχετική υγρασία	<30%RH
Συνθήκες Υγρασίας	2 ώρες
Θερμοκρασία	50°C±2°C
Σχετική υγρασία	>90%RH

Σημειώνεται ότι στους χρόνους αυτούς περιλαμβάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για να αποκτήσει το σύστημα την καθορισμένη θερμοκρασία σε κάθε μεταβολή.

3.6.4 Τοποθέτηση δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο για 10, 20, και 60 μέρες συμπληρώνοντας 30, 60 και 180 κύκλους αντίστοιχα (1 κύκλος=8 ώρες), σε ειδικές υποδοχές από αδρανές, μη μεταλλικό υλικό, υπό γωνία 45⁰ (Σχήμα 3.19). Τα δοκίμια που έπρεπε να παραμείνουν για το ίδιο χρονικό διάστημα στο θάλαμο δεν μπόρεσαν την ίδια μέρα, αλλά σε διαφορετικές ημέρες και διαφορετικές θέσεις. Με αυτόν τον τρόπο τα δοκίμια παραμένουν για τον ίδιο χρόνο στο θάλαμο αλλά σε διαφορετικές χρονικές περιόδους λειτουργίας του, ελέγχοντας

έτσι τυχόν αλλαγές στις συνθήκες που επικρατούν στον θάλαμο (διαβρωτικό περιβάλλον), εξάγοντας τα ανάλογα συμπεράσματα. Ο συνολικός χρόνος που χρησιμοποιήθηκε ο θάλαμος ήταν 71 ημέρες που αντιστοιχεί σε 1704 hours (213 cycles). Το αναλυτικό πρόγραμμα φαίνεται στον Πίνακα 3.9. Μεταξύ της δωδέκατης και δέκατης τέταρτης μέρας σταμάτησε η λειτουργία του θαλάμου λόγω διακοπής του ρεύματος γι' αυτό και φαίνεται στον πίνακα πως τα δοκίμια SH-5,7,8 και SV-5,7,8 έχουν μείνει 3 μέρες παραπάνω. Τα δοκίμια SH-4,6 και SV-4,6 έμειναν μία μέρα λιγότερη γιατί κανονικά η εξαγωγή τους συνέπιπτε με ημέρες αργίας και επειδή θέλαμε η έκθεση των δοκιμίων στην ατμόσφαιρα να είναι η μικρότερη δυνατή, από την εξαγωγή τους από τον θάλαμο μέχρι την εκτέλεση του πειράματος, προτιμήθηκε να εξαχθούν μία ημέρα νωρίτερα από το προκαθορισμένο.

Πίνακας 3.9: Χρονοδιάγραμμα των δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης.

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ	# ΗΜΕΡΑΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	# ΗΜΕΡΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ
SH-3	10	1	11
SH-4	10	22	32
SH-5	20	1	24
SH-6	20	22	42
SH-7	60	1	64
SH-8	60	11	74
SV-3	10	1	11
SV-4	10	22	32
SV-5	20	1	24
SV-6	20	22	42
SV-7	60	1	64
SV-8	60	11	74



Σχήμα 3.19: Δοκίμια μέσα στο θάλαμο αλατονέφωσης.

3.7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε όλα τα δοκίμια μετρήθηκε η αντοχή σε εφελκυσμό. Πιο συγκεκριμένα αυτό που μας ενδιέφερε ήταν το κατά πόσο επηρεάζεται το όριο διαρροής, δηλαδή η περιοχή ελαστικής συμπεριφοράς της χαλύβδινης ρωγματομένης πλάκας σε σχέση με τους παρακάτω παράγοντες:

- επίδραση επιθέματος,
- επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος στο επίθεμα,
- τρόπος προετοιμασίας της επιφάνειας του χάλυβα πριν την τοποθέτηση του επιθέματος.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην υδραυλική μηχανή εφελκυσμού MTS. Η υδραυλική μηχανή MTS που χρησιμοποιήθηκε είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002 [ISO 5893-2002]. Οι αρπάγες συγκράτησης των προσαρμογέων των δοκιμίων είναι υδραυλικές. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στις αρπάγες της μηχανής ώστε να είναι ευθυγραμμισμένα με τις ακμές των αρπαγών για την αποφυγή έκκεντρων φορτίσεων αλλά και το μήκος του δοκιμίου που πιάνεται σε κάθε αρπάγη να είναι 50 mm. Στα δοκίμια έγινε επιβολή επιμήκυνσης (displacement control) με σταθερό ρυθμό. Στα δοκίμια SR-1, SR-2, SH-2, SV-1 η επιβολή αυτή ασκήθηκε με ρυθμό 0.5 mm/min, ενώ σε όλα τα άλλα ο ρυθμός ήταν 1 mm/min. Οι μετρήσεις που παίρναμε από τη μηχανή ήταν το φορτίο F (kN) και η αντίστοιχη επιμήκυνση displacement (mm), με συχνότητα δειγματοληψίας 5 Hz. Όμως η επιμήκυνση που μετρούσε η μηχανή δεν είναι από την άκρη της αρπάγης ώστε η μέτρηση να αφορά μόνο το μήκος του δοκιμίου, αλλά από το έμβολό της, πράγμα το οποίο αλλοιώνει προφανώς τις μετρήσεις μας. Το πρόβλημα αυτό έγινε αντιληπτό μετά το πρώτο ζευγάρι πειραμάτων που αφορούσε τα δοκίμια SR-1, SR-2. Για να μετρήσουμε την πραγματική επιμήκυνση χρησιμοποιήσαμε αναλογικό ρολόι για τα δοκίμια SH-1, SH-2, SV-1, SV-2, SH-1A, SH-2A, SV-1A, SV-2A. Για τη μέτρηση της επιμήκυνσης των υπολοίπων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή συσκευή μέτρησης LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Το γεγονός ότι δεν μετρήθηκε η πραγματική επιμήκυνση των δύο δοκιμίων αναφοράς (SR-1, SR-2), δεν επηρεάζει τα συμπεράσματά μας διότι αυτό που θα εξετάσουμε είναι οι μεταβολές του ορίου διαρροής (ουσιαστικά αυτό που είναι διαφοροποιημένο στα SR-1, SR-2 σε σχέση με την πραγματικότητα είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young). Επιπλέον, για να μετρήσουμε την παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση του μήκους (άξονας x), στα δοκίμια τοποθετήθηκαν strain gauges στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 3.1. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκε η επιμήκυνση στο κέντρο του επιθέματος (SG-1), πάνω στον χάλυβα μακριά από το επίθεμα (SG-2) και στον χάλυβα στην περιοχή υψηλής συγκέντρωσης τάσης, δίπλα από την τρύπα (SG-3). Είναι προφανές ότι στα δοκίμια SR-1, SR-2 μετρήθηκε η επιμήκυνση στις θέσεις SG-2 και SG-3 μιας και δεν υπήρχε επίθεμα. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν strain gauges μήκους 10 mm. Σε όλα τα δοκίμια με επίθεμα εμφανίστηκε κάμψη λόγω ασύμμετρης διατομής. Το βέλος κάμψης το μετρήσαμε με χρήση LVDT.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε όλα τα δοκίμια ασκήθηκε εφελκυστικό φορτίο μέχρι να επέλθει η αστοχία τους. Ως αστοχία θεωρείται η αποκόλληση του επιθέματος, εκτός από τα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν είχαν επίθεμα και ως αστοχία θεωρούμε το πέρασμα στην πλαστική περιοχή. Ο τρόπος με τον οποίο αποκολλήθηκε το επίθεμα ήταν σε όλες τις περιπτώσεις ο ίδιος. Αφού το δοκίμιο είχε εισέλθει στην πλαστική περιοχή, ακολουθούσε η αποκόλληση ενός μικρού τμήματος η οποία ξεκινούσε από το ένα άκρο του επιθέματος και εξελισσόταν σχετικά αργά. Ξαφνικά, συνέβαινε η αποκόλληση και το επίθεμα σταματούσε πλέον να φέρει φορτίο. Το μήκος του αποκολληθέντος τμήματος ήταν κατά τι μεγαλύτερο από το μισό του. Μετά την αποκόλληση η ρωγμή δεν καλυπτόταν από το επίθεμα. Στην επιφάνεια του χάλυβα δεν υπήρχαν υπολείματα ρητίνης σε καμία από τις δύο περιπτώσεις προετοιμασίας της επιφάνειας (αμμοβολή και αεροματσάκονο, Σχήμα 4.1).

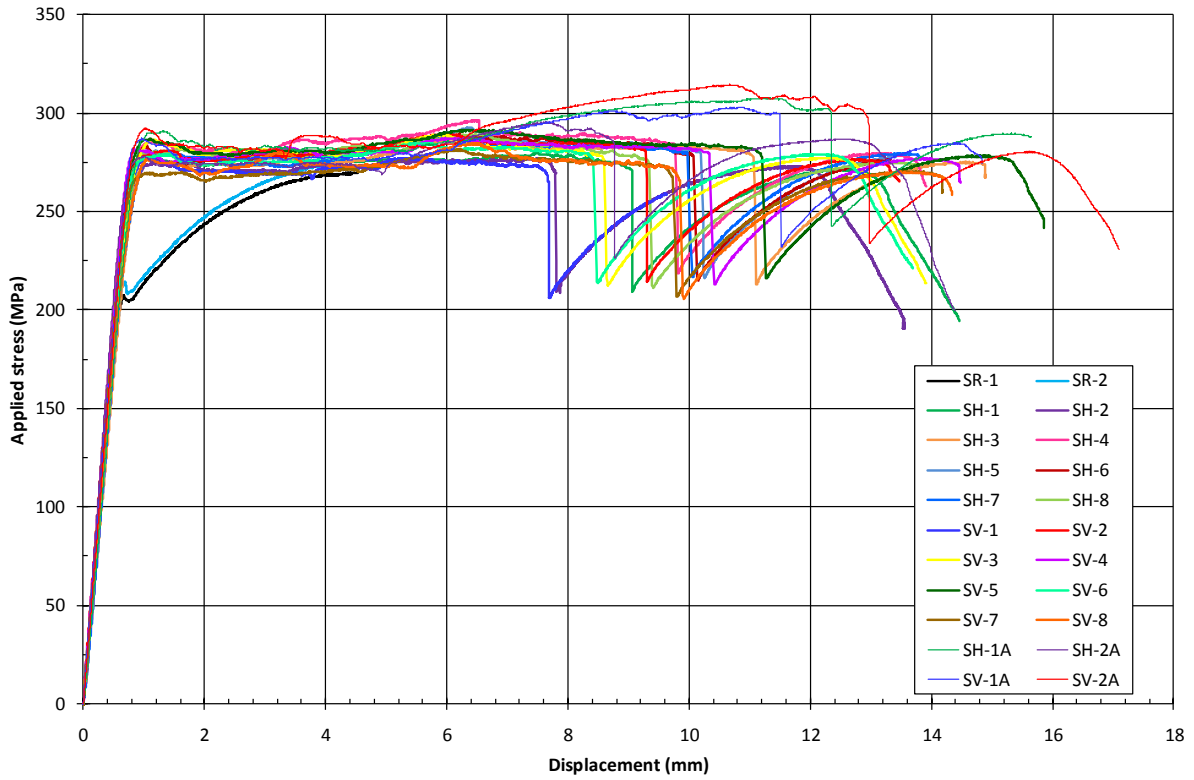


Σχήμα 4.1: Επιφάνεια του χάλυβα μετά την αποκόλληση του επιθέματος (προετοιμασία επιφάνειας με αμμοβολή, πάνω και αεροματσάκονο, κάτω).

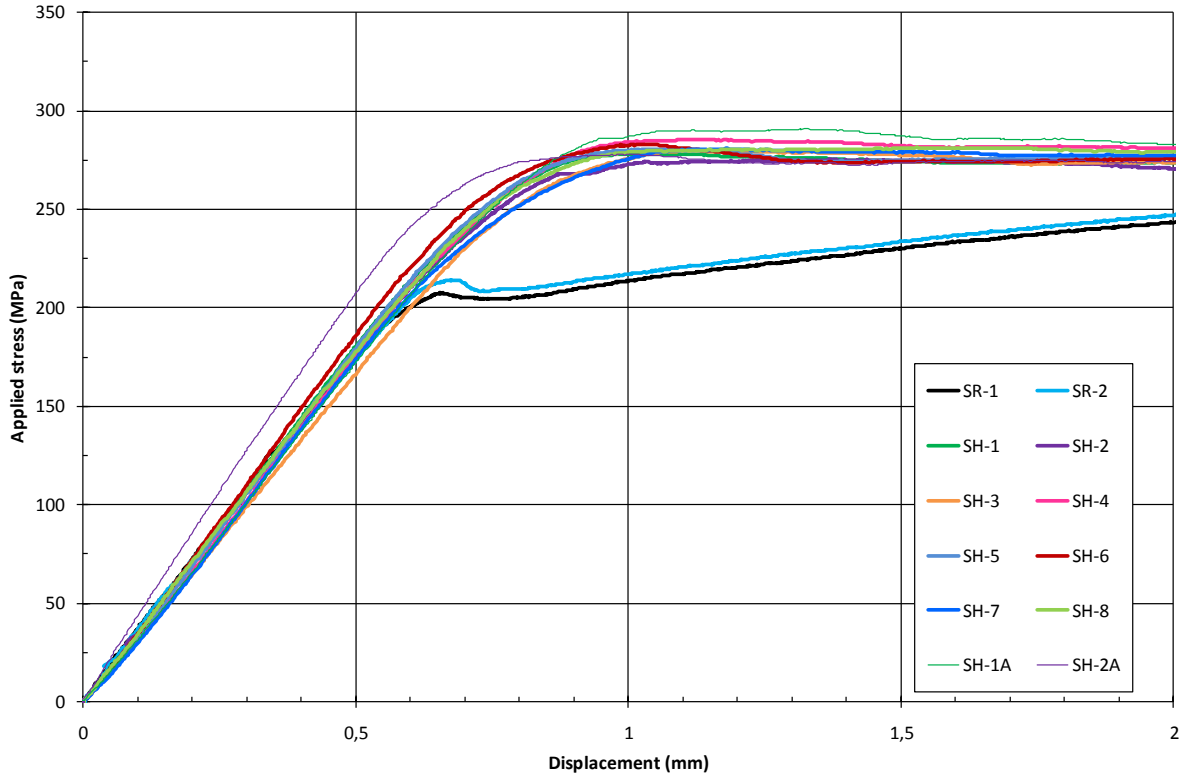
4.1 ΑΞΟΝΙΚΗ ΑΚΑΜΨΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ

Όλα τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Μια συνολική εικόνα συμπεριφοράς των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2, όπου φαίνεται η μεταβολή της αναπτυσσόμενης ομοιόμορφης τάσης στο χάλυβα συναρτήσει της επιβαλλόμενης επιμήκυνσης.

Η πρώτη ποιοτική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε από το Σχήμα 4.2 είναι πως η αξονική ακαμψία των δοκιμίων δεν παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή. Παρατηρείται μια μικρή αλλά ασήμαντη αύξηση της ακαμψίας των δοκιμίων με επίθεμα σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς η οποία οφείλεται προφανώς στην ύπαρξη του επιθέματος. Το γεγονός όμως ότι αυτή η αύξηση είναι μικρή οφείλεται στους εξής παράγοντες: το μέτρο ελαστικότητας των επιθεμάτων είναι συγκριτικά μικρό με αυτό του χάλυβα (βλ. Πίνακα 3.7), ο λόγος ακαμψίας που επιλέχτηκε είναι σχετικά μικρός ($SR=0.3$) και το επίθεμα καλύπτει μόνο ένα μέρος του χάλυβα. Τα Σχήματα 4.3 και 4.4 δείχνουν την αξονική ακαμψία των δοκιμίων στα οποία η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο HLU και

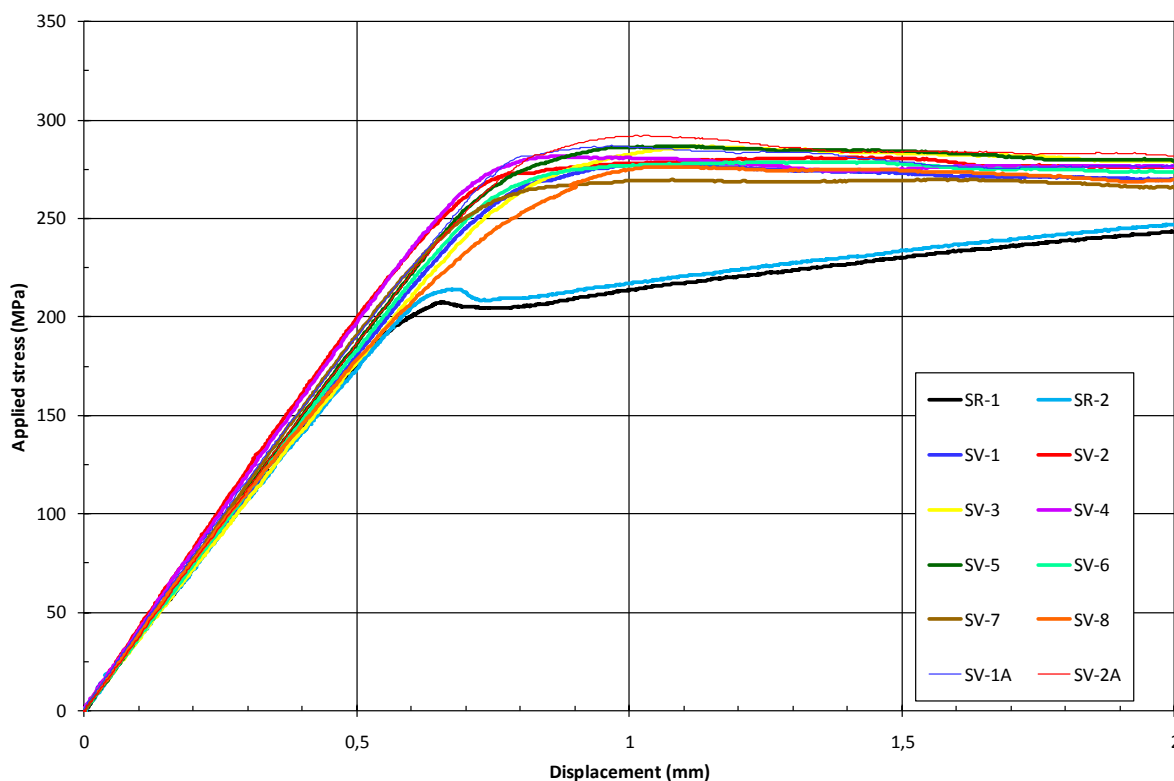


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης όλων των δοκιμίων.



Σχήμα 4.3: Αξονική ακαμψία δοκιμίων HLU.

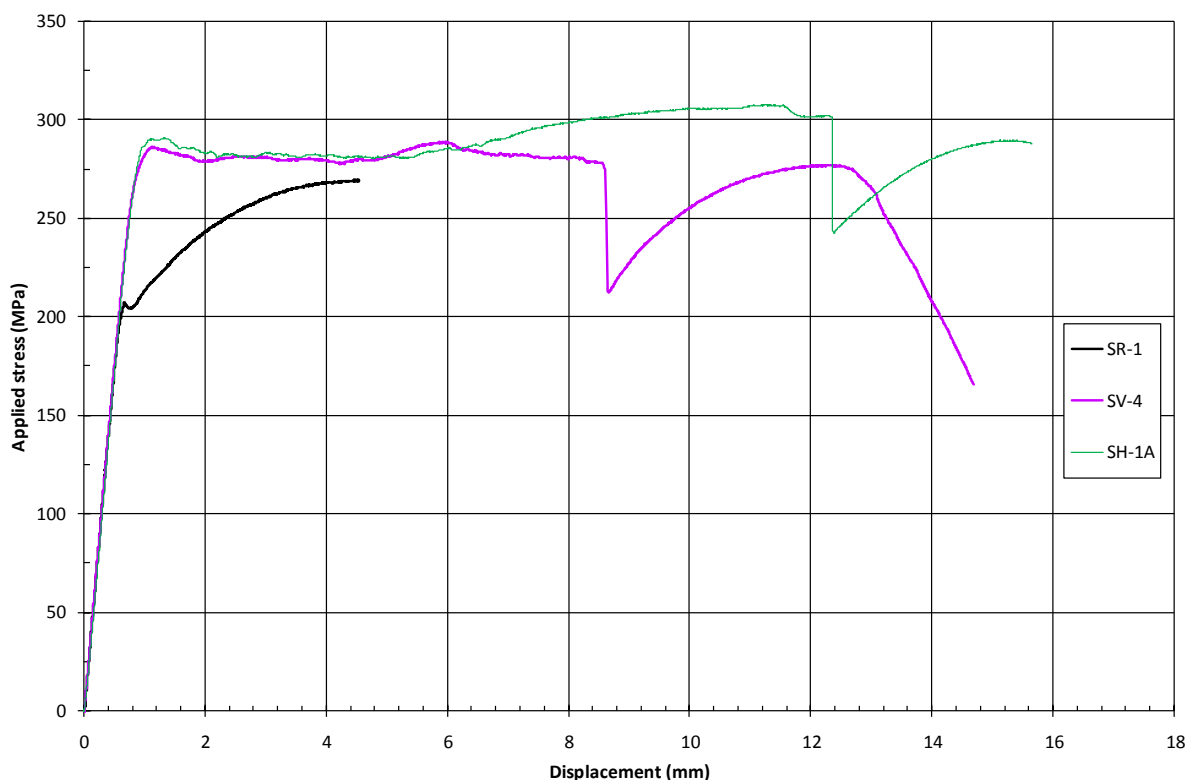
VB αντίστοιχα, συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς. Παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές η ακαμψία είναι λίγο μεγαλύτερη στα δοκίμια που η επίστρωση έγινε με τη μέθοδο VB. Αυτό οφείλεται στη διαφορά που εμφανίζουν οι δύο μέθοδοι επίστρωσης ως προς το μέτρο ελαστικότητας (βλ. Πίνακα 3.7). Το μόνο δοκίμιο του οποίου η συμπεριφορά παρεκκλίνει σε σχέση με τα υπόλοιπα είναι το SH-2A και ο λόγος θα εξηγηθεί στο εδάφιο 4.2.



Σχήμα 4.4: Αξονική ακαμψία δοκιμίων VB.

Η αμέσως επόμενη παρατήρηση που κάνουμε από το Σχήμα 4.2 είναι ότι ως προς τη συμπεριφορά, εμφανίζονται τρεις τυπικές ομάδες δοκιμίων. Η κάθε ομάδα συμπεριφέρεται παρόμοια. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα για κάθε μία από τις τρεις αυτές ομάδες. Το δοκίμιο SR-1 εκπροσωπεί τα δύο δοκίμια αναφοράς, το SV-4 εκπροσωπεί όλα τα δοκίμια με επίθεμα στα οποία η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή, ενώ το SH-1A εκπροσωπεί τα δοκίμια με επίθεμα στα οποία η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 η καμπύλη εφελκυσμού του δοκιμίου SR-1 ακολουθεί τη μορφή της τυπικής καμπύλης εφελκυσμού του χάλυβα, όπως και αναμενόταν. Αποτελείται από την γραμμική περιοχή όπου το δοκίμιο παραμορφώνεται ελαστικά και από την περιοχή κράτυνσης της οποίας η καμπύλη έχει παραβολική μορφή και το δοκίμιο παραμορφώνεται πλαστικά. Η μέγιστη τάση μέχρι την οποία το δοκίμιο παραμορφώνεται ελαστικά είναι η τάση διαρροής του δοκιμίου. Από την τάση αυτή και έπειτα ο χάλυβας διαρρεί και περνάει στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης όπου η τάση αυξάνεται μέχρι το σημείο μέγιστης τάσης.

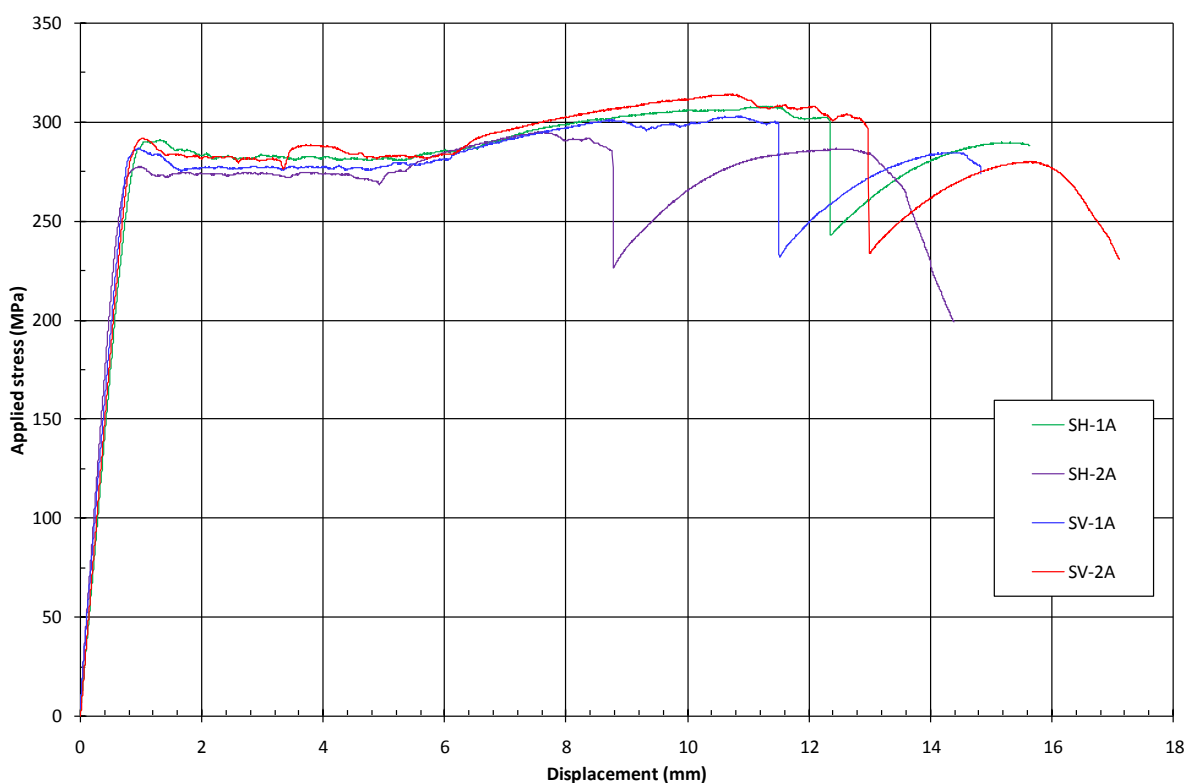


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης των τριών τυπικών δοκιμίων.

Στο δοκίμιο SV-4 εύκολα παρατηρούμε πως η τάση διαρροής του δοκιμίου είναι αυξημένη σε σχέση με το SR-1. Αυτή η συμπεριφορά εξηγείται από το γεγονός ότι εξαιτίας της ύπαρξης του επιθέματος, ο χάλυβας φορτίζεται λιγότερο για την ίδια επιβαλλόμενη φόρτιση, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται ελαστικά σε μεγαλύτερα φορτία. Όμως σε αντίθεση με το SR-1, βλέπουμε πως το δοκίμιο SV-4 δεν κρατύνεται. Μόλις το δοκίμιο διαρρεύσει και εισέλθει στην πλαστική περιοχή, η καμπύλη τάσης – επιμήκυνσης είναι σχεδόν οριζόντια, με την τιμή της τάσης να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα της τάσης διαρροής του δοκιμίου με μικρή απόκλιση από αυτή. Το δοκίμιο συνεχίζει να επιμηκύνεται στην πλαστική περιοχή μέχρι να επέλθει η αποκόλληση του επιθέματος. Η αποκόλληση του επιθέματος συνεπάγεται και ακαριαία πτώση του φορτίου, η οποία στο διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης σηματοδοτείται από την εμφάνιση του κάθετου τμήματος της καμπύλης. Αυτή η απότομη πτώση του φορτίου είναι λογική μιας και το επίθεμα δεν μεταφέρει πλέον κανένα φορτίο. Επίσης, πρέπει να υπενθυμίσουμε πως στα δοκίμια έγινε επιβολή επιμήκυνσης με σταθερό ρυθμό, που σημαίνει πως το αντίστοιχο φορτίο μπορεί να μεταβάλεται ανάλογα με τις συνθήκες. Άρα για να διατηρηθεί αυτός ο ρυθμός επιβολής επιμήκυνσης σταθερός και επειδή δεν υπάρχει το επίθεμα να μεταφέρει φορτία, λογικό είναι να έχουμε πτώση της τάσης. Αμέσως μετά την αποκόλληση του επιθέματος, το δοκίμιο συνεχίζει την πλαστική συμπεριφορά και ακολουθεί την τυπική συμπεριφορά των δοκιμίων αναφοράς, πράγμα που εξηγείται από την απουσία του επιθέματος, το οποίο πλέον δεν συνεισφέρει στην αντοχή του δοκιμίου. Από το Σχήμα 4.5 δεν είναι δυνατόν να συμπεράνουμε ποιο σημείο του δοκιμίου εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Αυτό θα σχολιαστεί παρακάτω με τη βοήθεια των strain gauges και της ΜΠΣ (βλ. εδάφιο 4.3 και Κεφάλαιο 5).

Η συμπεριφορά του δοκιμίου SH-1A είναι παρόμοια με αυτήν του SV-4. Η μόνη διαφορά είναι πως στο SH-1A, η καμπύλη τάσης - επιμήκυνσης στην πλαστική περιοχή από τη στιγμή που διαρρέει το δοκίμιο μέχρι και πριν την αποκόλληση του επιθέματος δεν είναι σχεδόν οριζόντια όπως στην περίπτωση του SV-4. Αρχίζει και αυτή σχεδόν οριζόντια, αλλά από ένα σημείο και έπειτα παρατηρείται μικρή αλλά εμφανής αύξηση των τάσεων μέχρι που επέρχεται η αποκόλληση του επιθέματος. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως αυτή η αύξηση της τάσης στα 4 δοκίμια που η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο, εμφανίζεται στην ίδια περιοχή, όταν δηλαδή η επιμήκυνση είναι από 5.4 mm έως 5.8 mm (Σχήμα 4.6).

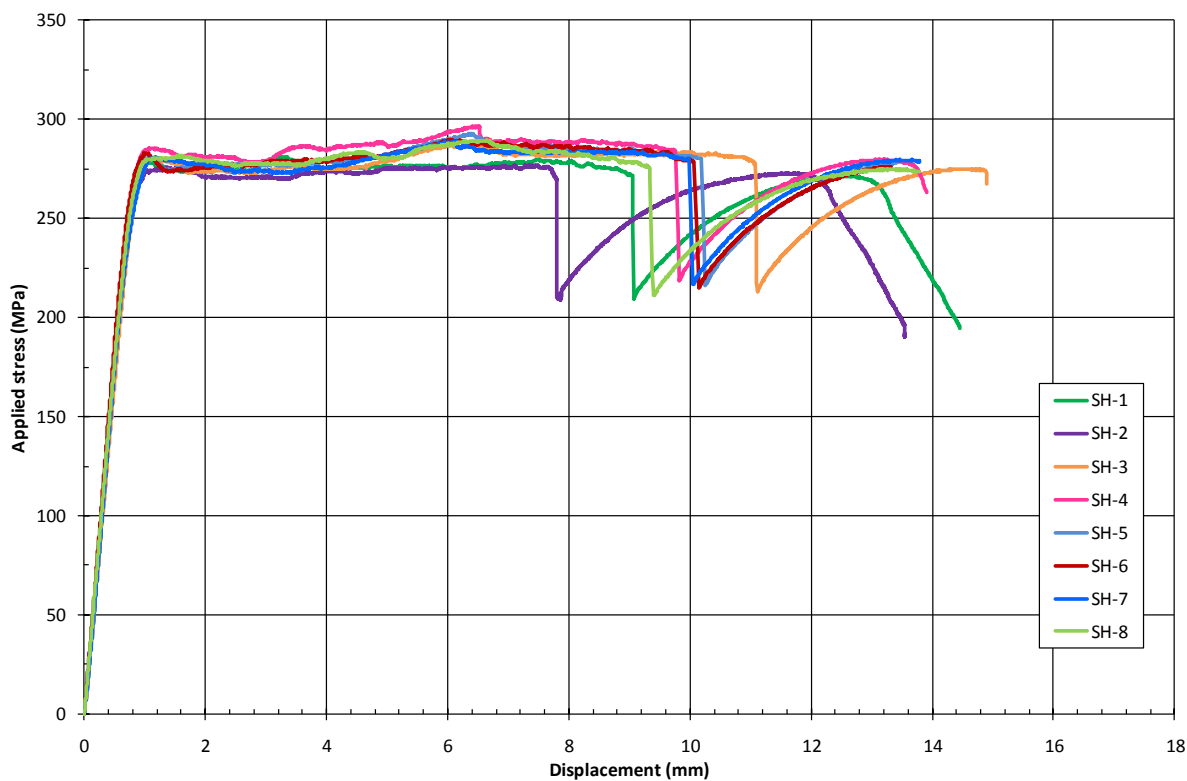
Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δοκίμια, οι αριθμητικές τιμές των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν. Τα μεγέθη αυτά είναι: η τάση διαρροής του δοκιμίου σ_y και η αντίστοιχη επιμήκυνσή του d_y , η τάση αποκόλλησης του επιθέματος σ_d και η αντίστοιχη επιμήκυνση d_d . Στα Σχήματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζεται η μεταβολή της αναπτυσσόμενης ομοιόμορφης τάσης στο χάλυβα συναρτήσει της επιβαλλόμενης επιμήκυνσης για όλα τα δοκίμια HLU και VB αντίστοιχα.



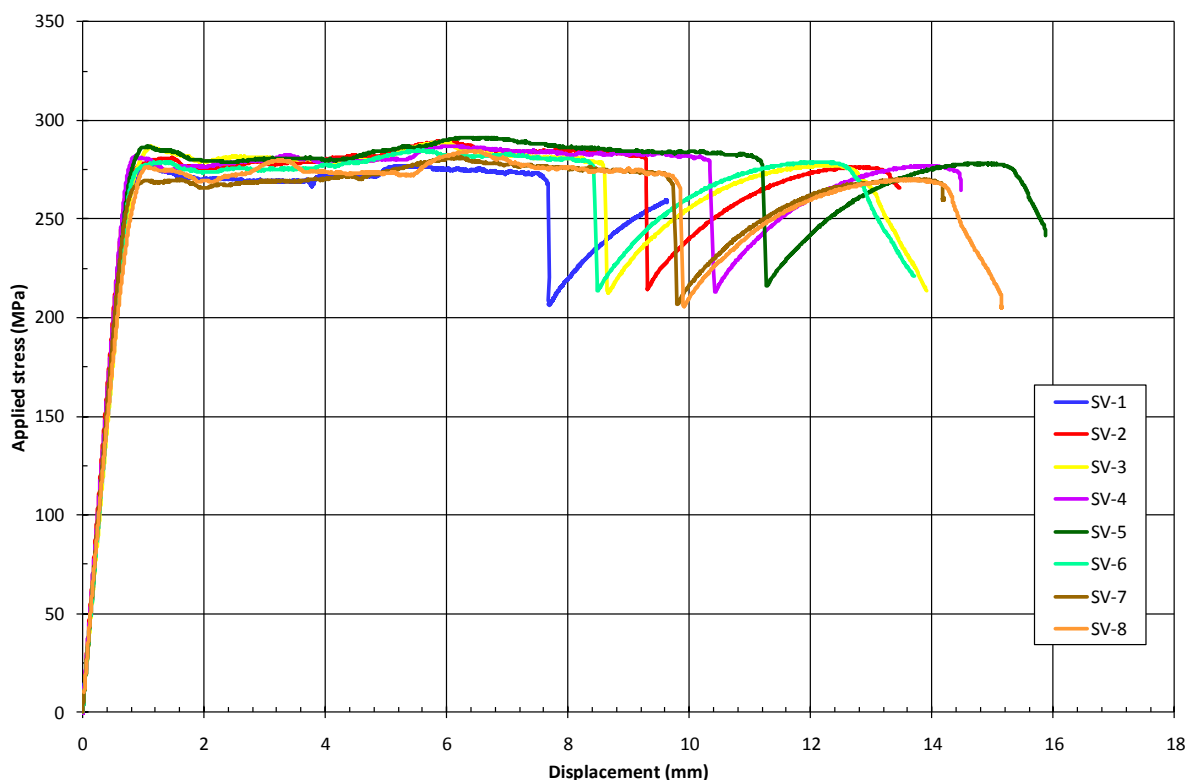
Σχήμα 4.6: Σημείο εκκίνησης αύξησης των τάσεων για τα δοκίμια SH-1A&2A και SV-1A&2A.

Πίνακας 4.1: Τιμές τάσης και επιμήκυνσης στα σημεία διαρροής του δοκιμίου και αποκόλλησης του επιθέματος.

Δοκίμιο	σ_y (MPa)	d_y (mm) ($\sigma=\sigma_y$)	σ_d (MPa)	d_d (mm)
SR-1	207	0.67	-	-
SR-2	214	0.69	-	-
SH-1	278	1.07	271	9.0
SH-2	274	1.03	273	7.7
SH-3	279	1.18	279	11.0
SH-4	284	0.99	284	9.7
SH-5	279	0.96	281	10.2
SH-6	281	0.95	279	10.0
SH-7	280	1.08	280	9.9
SH-8	278	0.96	276	9.3
SV-1	278	0.98	270	7.6
SV-2	280	1.10	280	9.3
SV-3	287	1.15	278	8.6
SV-4	282	0.86	280	10.3
SV-5	286	1.00	280	11.1
SV-6	276	1.05	278	8.4
SV-7	270	1.01	269	9.7
SV-8	276	1.02	269	9.8
SH-1A	290	1.09	302	12.3
SH-2A	280	0.98	287	8.7
SV-1A	286	0.95	300	11.5
SV-2A	292	1.00	299	12.9



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης για HLU δοκίμια.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης για VB δοκίμια.

Μελετώντας τον Πίνακα 4.1 αλλά και τα Σχήματα 4.2, 4.7, 4.8, οδηγούμαστε στα πρώτα συμπεράσματα σχετικά με τη συγκριτική συμπεριφορά των δοκιμών μεταξύ τους. Κατ' αρχάς είναι φανερό πως η ύπαρξη του επιθέματος οδηγεί σε μια αύξηση της ελαστικής περιοχής των δοκιμών με επίθεμα σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Μάλιστα, οι τιμές της τάσης διαρροής όλων των δοκιμών με επίθεμα δεν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση μεταξύ τους, όπως επίσης δεν φαίνεται να σχετίζονται με κάποιο τρόπο με τον χρόνο παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης ή με τη μέθοδο επίστρωσης του επιθέματος. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να συμπεράνουμε πως ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης και η μέθοδος επίστρωσης του επιθέματος δεν επηρεάζει την αύξηση της ελαστικής περιοχής.

Στους Πίνακες 4.2 και 4.3 φαίνεται η ποσοστιαία αύξηση της τάσης διαρροής του κάθε είδους δοκιμίου σε σχέση με τον μέσο όρο της τάσης διαρροής των δοκιμών αναφοράς, ο οποίος ισούται με 210.5 MPa, για κάθε μέθοδο επίστρωσης του επιθέματος (HLU και VB αντίστοιχα). Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται η ίδια αύξηση, για τα δοκίμια που η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο μαζί με τα αντίστοιχα δοκίμια (αυτά που δεν εισήχθησαν στον θάλαμο αλατονέφωσης) στα οποία η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή.

Πίνακας 4.2: Αύξηση τάσης διαρροής σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς (μέθοδος HLU).

Δοκίμιο	σ_y (MPa)	% Αύξηση
SH-1	278	32.07
SH-2	274	30.17
SH-3	279	32.54
SH-4	284	34.92
SH-5	279	32.54
SH-6	281	33.49
SH-7	280	33.02
SH-8	278	32.07

Πίνακας 4.3: Αύξηση τάσης διαρροής σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς (μέθοδος VB).

Δοκίμιο	σ_y (MPa)	% Αύξηση
SV-1	278	32.07
SV-2	280	33.02
SV-3	287	36.34
SV-4	282	33.97
SV-5	286	35.87
SV-6	276	31.12
SV-7	270	28.27
SV-8	276	31.12

Πίνακας 4.4: Αύξηση της τάσης διαρροής σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς (προετοιμασία επιφάνειας με αμμοβολή και αεροματσάκονο).

Δοκίμιο	σ_y (MPa)	% Αύξηση
SH-1	278	32.07
SH-2	274	30.17
SH-1A	290	37.77
SH-2A	280	33.02
SV-1	278	32.07
SV-2	280	33.02
SV-1A	286	35.87
SV-2A	292	38.72

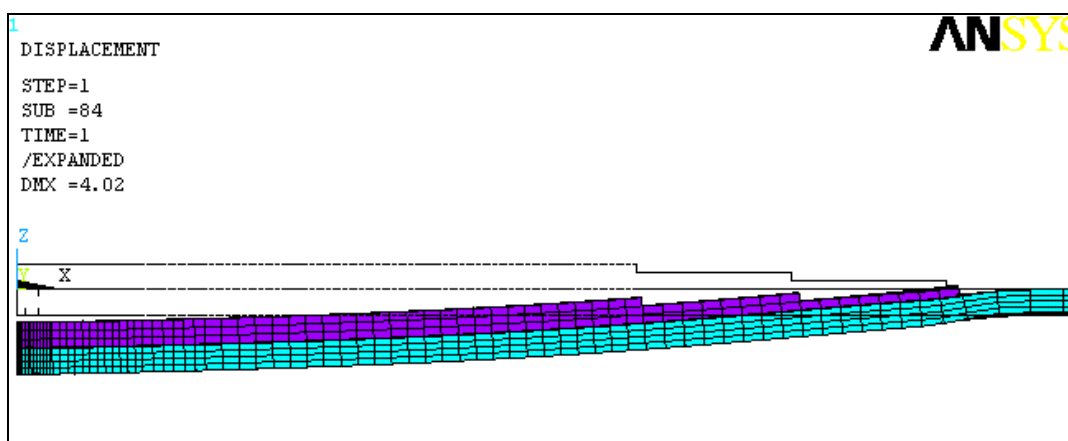
Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει πως η ύπαρξη και μόνο του επιθέματος οδηγεί σε μια αύξηση της τάσης διαρροής κατά το ένα τρίτο περίπου, της τάσης διαρροής των δοκιμίων αναφοράς. Επιπροσθέτως, παρατηρούμε πως τα δοκίμια στα οποία η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο εμφανίζουν μία ελαφριά υπεροχή σε σχέση με τα

δοκίμια που η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή. Λόγω της μεγάλης τραχύτητας που δημιουργείται στην επιφάνεια του χάλυβα κατά την προετοιμασία της επιφάνειας με αεροματσάκονο, η πρόσφυση μεταξύ χάλυβα και επιθέματος είναι καλύτερη απ' ότι στην περίπτωση που η προετοιμασία έγινε με αμμοβολή. Σε αυτό το γεγονός ενδεχομένως να οφείλεται η ελαφρώς μεγαλύτερη αύξηση της τάσης διαρροής που παρουσίασαν αυτά τα δοκίμια συγκριτικά με εκείνα των οποίων η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή.

Όσον αφορά την τάση αποκόλλησης και την αντίστοιχη επιμήκυνση, καταλαβαίνουμε από τον Πίνακα 4.1 πως ο θάλαμος αλατονέφωσης και η μέθοδος επίστρωσης του επιθέματος δεν επηρεάζει τα δοκίμια με τρόπο τέτοιο ώστε να μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα. Το πιο πιθανό σενάριο είναι πως οι παραπάνω παράγοντες δεν επηρεάζουν τα δοκίμια και οι αιτίες που καθορίζουν το πότε θα γίνει η αποκόλληση του επιθέματος εμπίπτουν στον κλάδο της μικρομηχανικής. Εξετάζοντας τα δοκίμια στα οποία η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο, βλέπουμε πως τα τρία από τα τέσσερα (SH-1A, SV-1A, SV-2A) παρουσιάζουν παρόμοια πειραματικά αποτελέσματα. Η τάση αποκόλλησης είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτή των αντίστοιχων δοκιμίων που η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή, όπως επίσης υψηλότερη είναι και η αντίστοιχη επιμήκυνση. Εξαιρεση αποτελεί το δοκίμιο SH-2A, του οποίου τα πειραματικά αποτελέσματα και η συμπεριφορά αποκλίνουν εν γένει από τα υπόλοιπα, όπως θα δούμε και παρακάτω.

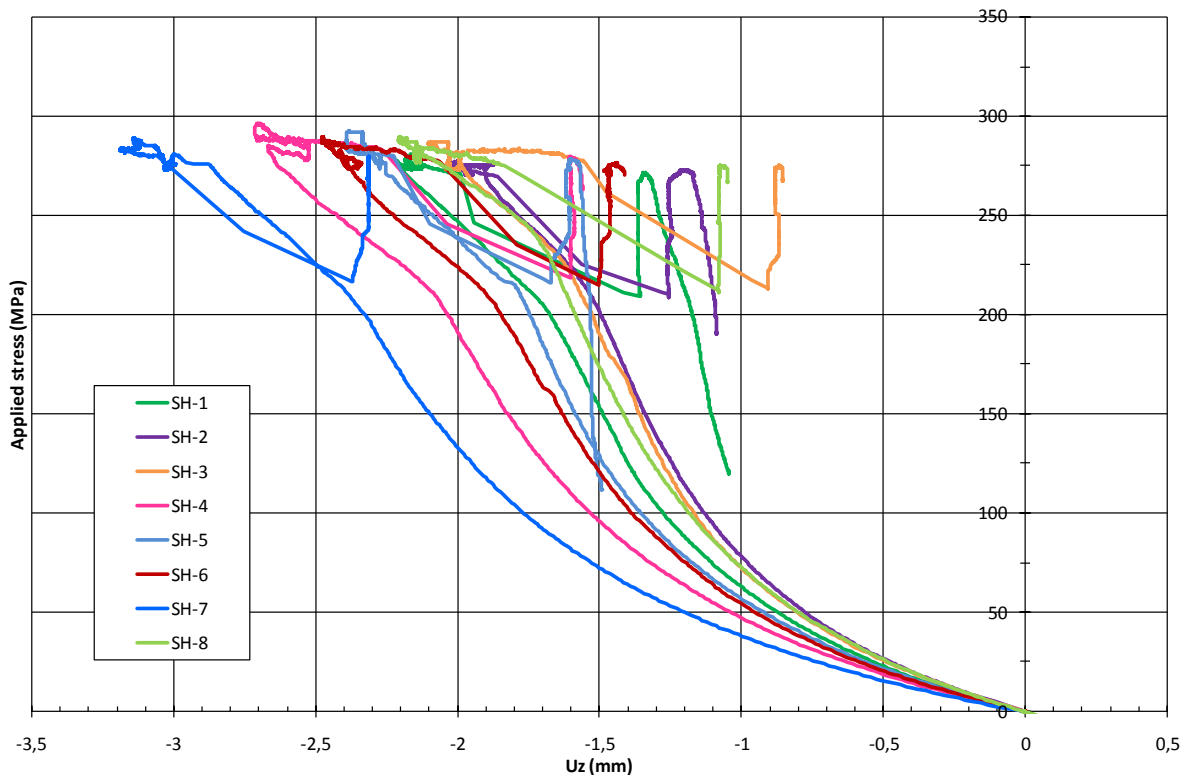
4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. εδάφιο 3.6), όλα τα δοκίμια κατά τη διάρκεια επιβολής του εφελκυστικού φορτίου παρουσίασαν κάμψη προς την αντίθετη πλευρά από αυτή που είχε τοποθετηθεί το επίθεμα. Αυτό συνέβη λόγω της ασύμμετρης διατομής που έχουν τα δοκίμια με επίθεμα. Το μέτρο του βέλους κάμψης εξαρτάται προφανώς από το πάχος του επιθέματος, δηλαδή από το μέγεθος της ασυμμετρίας που παρουσιάζει η διατομή. Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται η παραμορφωμένη κατάσταση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, όπου είναι εμφανής η κάμψη αυτή. Το μαύρο περίγραμμα υποδηλώνει τη μη παραμορφωμένη κατάσταση του δοκιμίου.

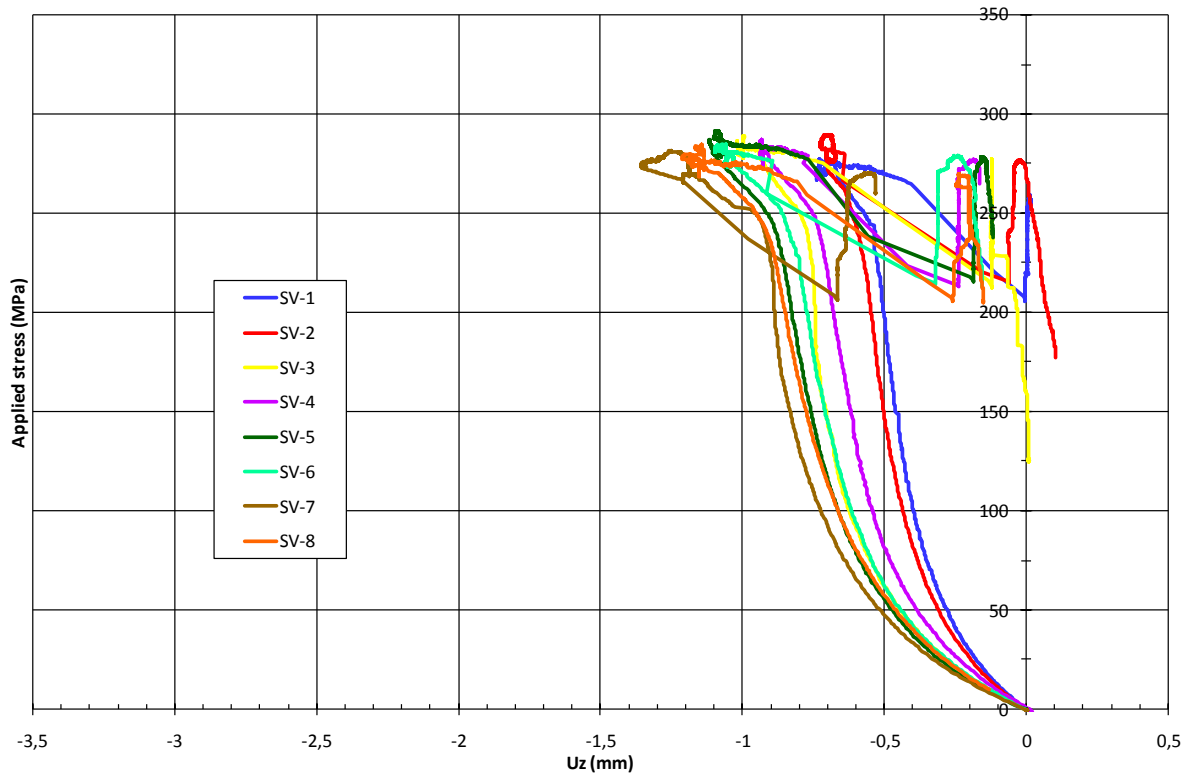


Σχήμα 4.9: Κάμψη δοκιμίου λόγω ασύμμετρης διατομής.

Στα Σχήματα 4.10 και 4.11 παρουσιάζεται η μεταβολή του βέλους κάμψης u_z , συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης, για τα δοκίμια που η μέθοδος επίστρωσης του επιθέματος ήταν HLU και VB αντίστοιχα. Στα δοκίμια αυτά η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή. Ως θετική λαμβάνεται η μετατόπιση του βέλους κάμψης u_z προς την πλευρά του επιθέματος. Βλέπουμε από τα δύο σχήματα πως η κάμψη είναι σαφώς μεγαλύτερη στα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο HLU, πράγμα απολύτως φυσιολογικό και αναμενόμενο, από τη στιγμή που το πάχος του επιθέματος στα δοκίμια αυτά είναι μεγαλύτερο από εκείνο των δοκιμίων που εφαρμόστηκε η μέθοδος VB (βλ. Πίνακα 3.7). Ο μηχανισμός όμως αύξησης του βέλους κάμψης σε σχέση με την τάση φαίνεται από τα διαγράμματα πως είναι και στις δύο περιπτώσεις ο ίδιος. Στην αρχή και για μικρές τιμές επιβαλλόμενου φορτίου, ο ρυθμός αύξησης του βέλους κάμψης είναι μεγαλύτερος απ' ό,τι στη συνέχεια, όπου ο ρυθμός αυτός μειώνεται. Τέλος, ακολουθεί μία μικρή περιοχή, λίγο πριν φτάσουμε στην τάση διαρροής του κάθε δοκιμίου, όπου ο ρυθμός αύξησης του βέλους κάμψης αυξάνεται και πάλι. Η απότομη πτώση τάσης που στα διαγράμματα σηματοδοτείται από μία γραμμική περιοχή, σημαίνει την αποκόλληση του επιθέματος. Μπορούμε επίσης να δούμε πως ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης δεν επηρεάζει την κάμψη των δοκιμίων.

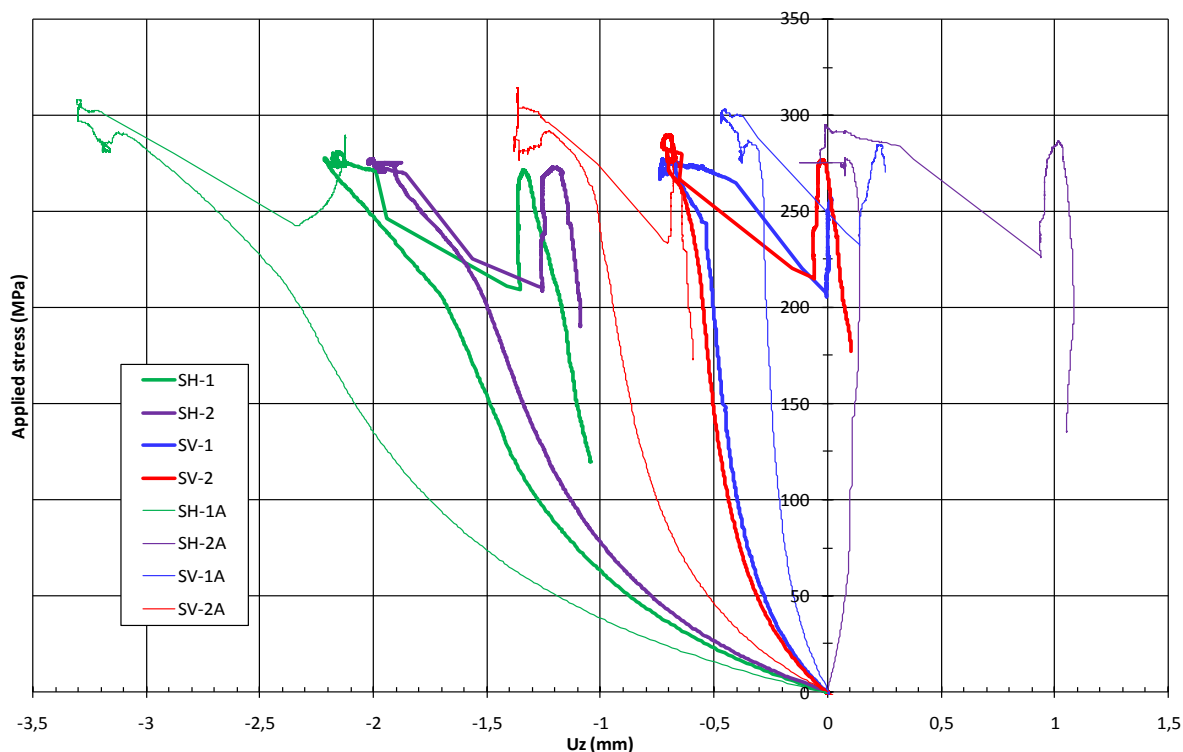


Σχήμα 4.10: Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης για HLU δοκίμια.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης για VB δοκίμια.

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η μεταβολή του βέλους κάμψης u_z , συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης, για τα δοκίμια που η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο, συγκριτικά με τα αντίστοιχα δοκίμια που η προετοιμασία έγινε με αμμοβολή. Όπως βλέπουμε η συμπεριφορά των δοκιμίων δεν επηρεάζεται από τη μέθοδο προετοιμασίας της επιφάνειας, αλλά εξαρτάται από τη μέθοδο επίστρωσης του επιθέματος (και αυτό γιατί διαφορετική μέθοδος σημαίνει διαφορετικό πάχος επιθέματος). Από το διάγραμμα αυτό εξηγείται και η αποκλίνουσα συμπεριφορά του δοκιμίου SH-2A. Όπως φαίνεται παρουσιάζει θετικό βέλος κάμψης, σε αντίθεση με όλα τα υπόλοιπα δοκίμια. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η χαλύβδινη πλάκα του δοκιμίου αυτού παρουσιάζε ήδη μια αρχική κάμψη με τα κοίλα προς την πλευρά του επιθέματος. Η καμπυλότητα αυτή δημιουργήθηκε κατά τη διαδικασία της προετοιμασίας της επιφάνειας με το αεροματσάκονο και οφείλεται στην ενδεχομένως πιο βίαιη χρήση του αεροματσάκονου στην συγκεκριμένη χαλύβδινη πλάκα.

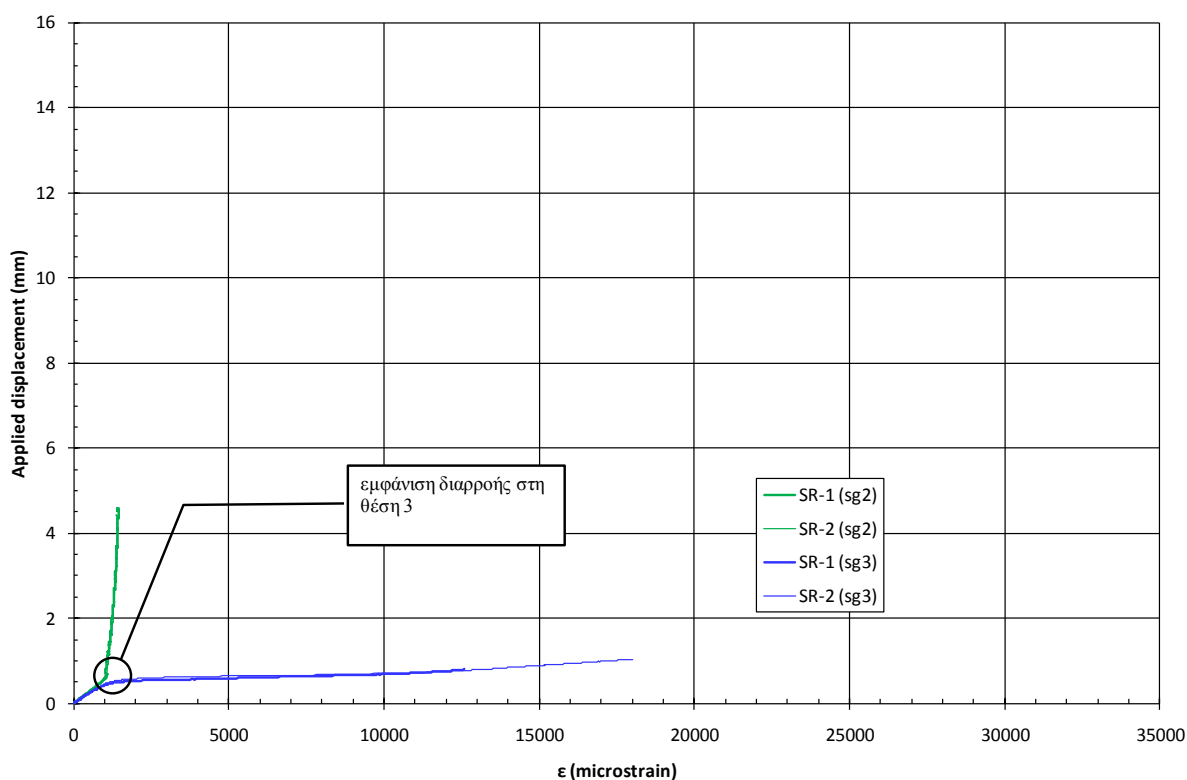


Σχήμα 4.12: Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης για δοκίμια που η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε και με τις δύο μεθόδους (αμμοβολή, αεροματσάκονο).

4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Σε όλα τα δοκίμια με επίθεμα τοποθετήθηκαν strain gauges σε τρεις θέσεις (βλ. Σχήμα 3.1). Στα δοκίμια αναφοράς, αφού δεν υπάρχει επίθεμα, μετρήθηκε η παραμόρφωση μόνο στις θέσεις 2 (μακριά από τη ρωγμή) και 3 (δίπλα στη ρωγμή). Η συνδυασμένη μελέτη των μετρήσεων που μας έδωσαν τα strain gauges μας επιτρέπει να κατανοήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά των δοκιμίων. Επειδή στα δοκίμια ασκήθηκε επιμήκυνση με σταθερό ρυθμό, τα διαγράμματα όπου θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις των strain gauges θα είναι συναρτήσει της επιβαλλόμενης επιμήκυνσης, πράγμα που μας δίνει τη δυνατότητα να αντιληφθούμε τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου και να εξάγουμε τα ανάλογα συμπεράσματα.

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η παραμόρφωση ϵ , συναρτήσει της επιβαλλόμενης επιμήκυνσης στις θέσεις 2 και 3, των δύο δοκιμίων αναφοράς, SR-1&2. Βλέπουμε πως η παραμόρφωση και στις δύο θέσεις αυξάνεται αρχικά με τον ίδιο τρόπο, μέχρι το σημείο που η παραμόρφωση στη θέση 3 αυξάνεται απότομα. Συμπεριφορά αναμενόμενη, αφού η θέση 3 βρίσκεται στο ίδιο εγκάρσιο επίπεδο με τη ρωγμή, όπου η διατομή του χάλυβα είναι η ελάχιστη (δηλαδή η τάση είναι μέγιστη). Άρα και η διαρροή θα εμφανιστεί στην περιοχή δίπλα από τη ρωγμή. Από αυτό το σημείο και έπειτα η παραμόρφωση στη θέση 2 μένει σχεδόν σταθερή και σε χαμηλές τιμές. Μάλιστα, η παραμόρφωση στη θέση αυτή παραμένει μέσα στην ελαστική περιοχή (< 2000 microstrain). Χαρακτηριστικό είναι πως τα πειραματικά αποτελέσματα των δύο δοκιμίων αναφοράς σχεδόν ταυτίζονται, επιβεβαιώνοντας την ορθότητα της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στις θέσεις 2, 3 για τα δοκίμια SR-1&2.

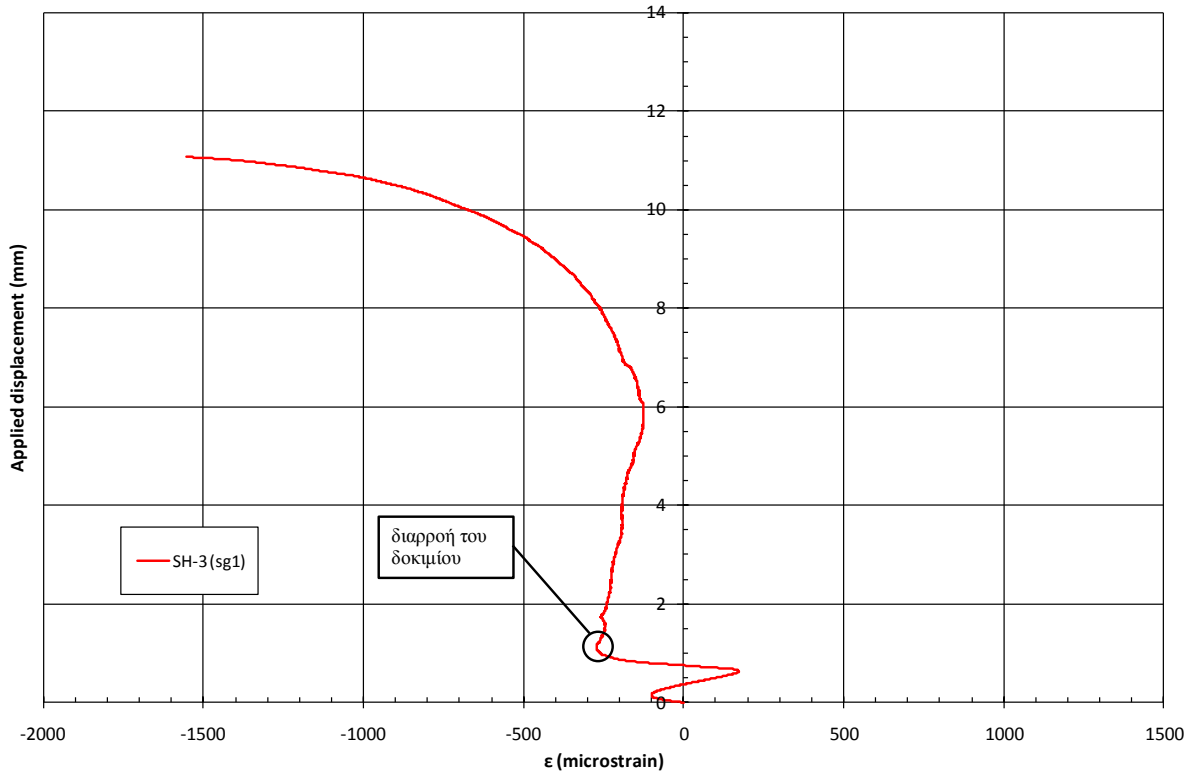
Από τις μετρήσεις που πήραμε από τα strain gauges φάνηκε, όπως θα δούμε και παρακάτω, πως ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά των δοκιμών στις θέσεις όπου μετρήσαμε τις παραμορφώσεις. Όμως οι δύο μέθοδοι κατασκευής (HLU και VB) και οι δύο μέθοδοι προετοιμασίας της επιφάνειας (αμμοβολή και αεροματσάκονο), επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινίσουμε πως η παραμόρφωση σε κάθε σημείο, οφείλεται σε δύο συνιστώσες, μία εφελκυστική λόγω του εφελκυστικού φορτίου που ασκούμε στο δοκίμιο και μία εφελκυστική ή θλιπτική (ανάλογα με τη θέση) λόγω του φαινομένου της κάμψης (βλ. εδάφιο 4.2). Στη θέση 1, λόγω της κάμψης και μόνο, το φορτίο είναι θλιπτικό, ενώ στις θέσεις 2 και 3 εφελκυστικό.

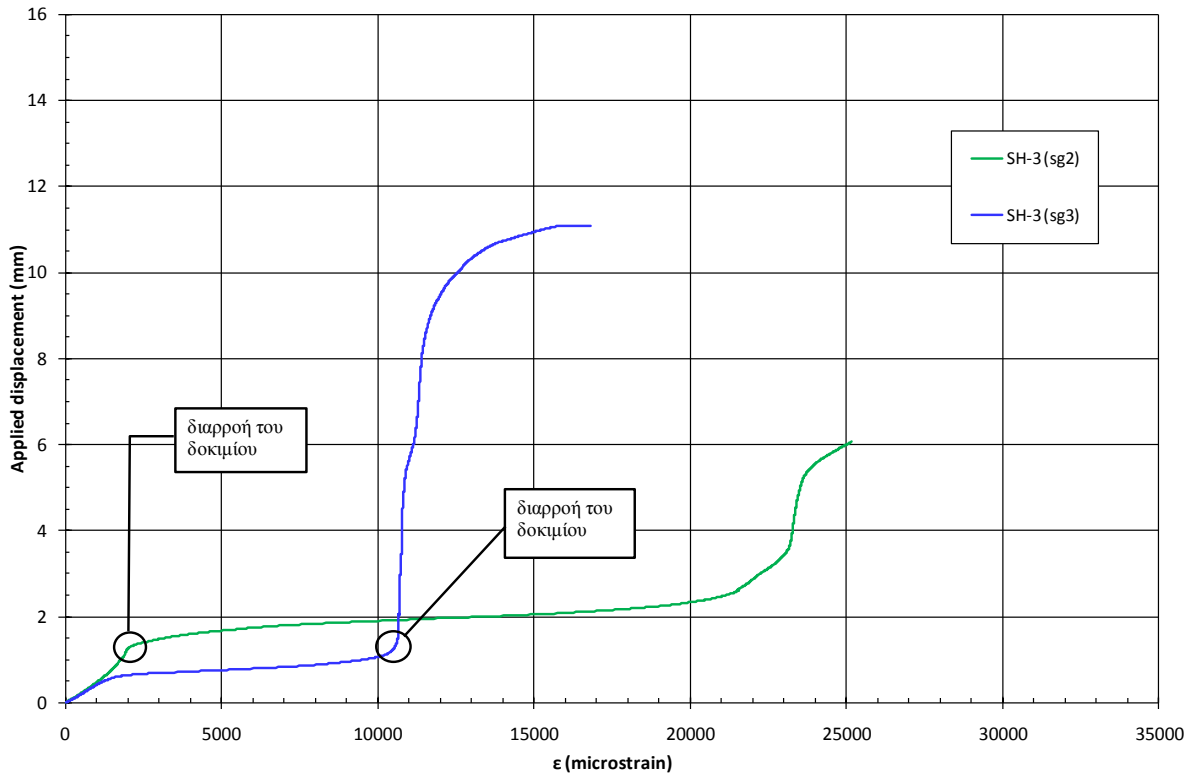
Στα Σχήματα 4.14 και 4.15 παρουσιάζονται τα διαγράμματα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στις θέσεις 1 (πάνω στο κέντρο του επιθέματος) και 2,3 αντίστοιχα, για το δοκίμιο SH-3, το οποίο είναι ένα τυπικό δοκίμιο που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο HLU και η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή. Όλα τα υπόλοιπα δοκίμια αυτής της μεθόδου παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14, βρίσκεται στη μεριά των θλιπτικών παραμορφώσεων. Βλέπουμε πως η παραμόρφωση στη θέση 1, αρχικά, όταν ο ρυθμός αύξησης του βέλους κάμψης είναι μεγάλος (βλ. εδάφιο 4.2, Σχήμα 4.10), είναι θλιπτική. Όταν ο ρυθμός αυτός μειώνεται, η εφελκυστική συνιστώσα υπερισχύει, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραμόρφωσης. Αυτή την περιοχή ακολουθεί μια απότομη αύξηση της

θλιπτικής συνιστώσας, που αρχίζει από τα 0.6 mm επιμήκυνσης περίπου, μέχρι το σημείο διαρροής του δοκιμίου (1.18 mm). Η απότομη και με γρήγορο ρυθμό αύξηση της θλιπτικής παραμόρφωσης, εν μέρει οφείλεται στην αύξηση του ρυθμού αύξησης του βέλους κάμψης λίγο πριν την τάση διαρροής του δοκιμίου. Όμως είναι αρκετά μεγάλη για να ευθύνεται μόνο η κάμψη στην υπερίσχυση της θλιπτικής έναντι της εφελκυστικής συνιστώσας. Παρατηρώντας το Σχήμα 4.15, βλέπουμε πως στη θέση 3, από τα 0.6 mm επιμήκυνσης περίπου και μέχρι το σημείο όπου έχει περάσει το δοκίμιο στη διαρροή, έχουμε σημαντική αύξηση της παραμόρφωσης, η οποία συμβαίνει με πολύ γρήγορο ρυθμό. Από το γεγονός αυτό μπορούμε να υποθέσουμε πως η μεγάλη παραμόρφωση στη θέση 3 αλλά και γενικότερα της κάτω επιφάνειας του χάλυβα συμβάλει στην περαιτέρω αύξηση των θλιπτικών φορτίων στην επιφάνεια του επιθέματος, του ήδη καμπτόμενου δοκιμίου. Η παραμόρφωση στη θέση 1, μετά το σημείο διαρροής παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι τα 5.8 mm επιμήκυνσης περίπου. Από αυτό το σημείο και έπειτα, η θλιπτική παραμόρφωση μεγαλώνει με αυξανόμενο ρυθμό μέχρι την αποκόλληση του επιθέματος, η οποία σηματοδοτείται από το τέλος της καμπύλης. Και σε αυτή την περίπτωση, η αύξηση της θλιπτικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του επιθέματος συμπίπτει χρονικά με την αύξηση της παραμόρφωσης στη θέση 3. Στα 5.8 mm περίπου, η παραμόρφωση στη θέση 3 μεγαλώνει με αυξανόμενο ρυθμό, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τη θλιπτική παραμόρφωση στην επιφάνεια του επιθέματος. Αυτή η συμπεριφορά έχει να κάνει προφανώς με τη σταδιακή αποκόλληση του επιθέματος. Καθώς αποκολλάται το επίθεμα, μεταφέρει λιγότερα εφελκυστικά φορτία ενώ τα θλιπτικά φορτία λόγω κάμψης παραμένουν σταθερά, με αποτέλεσμα την αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων. Παράλληλα, τα εφελκυστικά φορτία, τα οποία δεν δύναται να μεταφέρει πλέον το αποκολληθέν τμήμα του επιθέματος, περνάνε στον χάλυβα και γι' αυτό παρατηρείται αύξηση της παραμόρφωσης στις θέσεις 2 και 3.

Η ύπαρξη του επιθέματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.15, προκαλεί την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων μακριά από το επίθεμα, στη θέση 2. Αρχικά (πριν από τη διαρροή του δοκιμίου), αναπτύσσεται σχετικά μεγάλη παραμόρφωση στη θέση 3 και η επιφάνεια κοντά στη θέση αυτή έχει περάσει στην πλαστική περιοχή, πράγμα που οφείλεται κυρίως στις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω κάμψης. Όταν η παραμόρφωση στη θέση 3 σταματάει, βλέπουμε πως αυξάνεται ραγδαία στη θέση 2, ενώ το δοκίμιο έχει ήδη περάσει στη διαρροή. Μπορούμε να υποθέσουμε πως το δοκίμιο διαρρέει στην περιοχή μακριά από το επίθεμα επειδή οι παραμορφώσεις εκεί είναι πολύ μεγάλες, αλλά και γιατί η διαρροή θα ξεκινήσει από την πλευρά της θέσης 2 και η διεύθυνση διάδοσής της θα είναι κατά το πάχος του δοκιμίου το οποίο είναι μόλις 4 mm, άρα η διάδοση θα γίνει σχετικά γρήγορα. Αυτή η υπόθεση εξηγεί και το γιατί στα διαγράμματα τάσης – επιμήκυνσης δεν υπάρχει περιοχή κράτυνσης από τη στιγμή που τα δοκίμια εισέρχονται στην πλαστική περιοχή. Μέρος της ευθύνης για τη μεγάλη παραμόρφωση στη θέση 2, φέρει και το γεγονός ότι η θέση αυτή βρίσκεται στην πλευρά του δοκιμίου όπου η συνιστώσα της παραμόρφωσης λόγω κάμψης είναι εφελκυστική, άρα η συγκέντρωση τάσεων εκεί, θα είναι υψηλότερη.



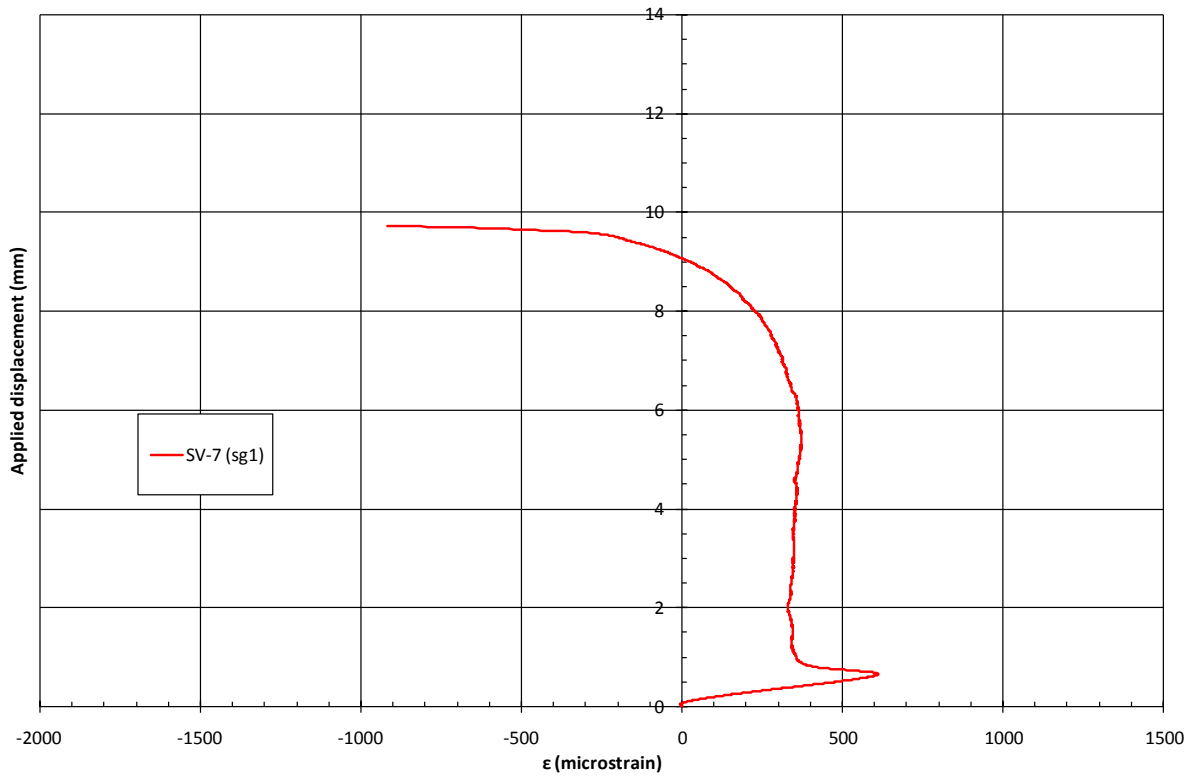
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 1 για το δοκίμιο SH-3.



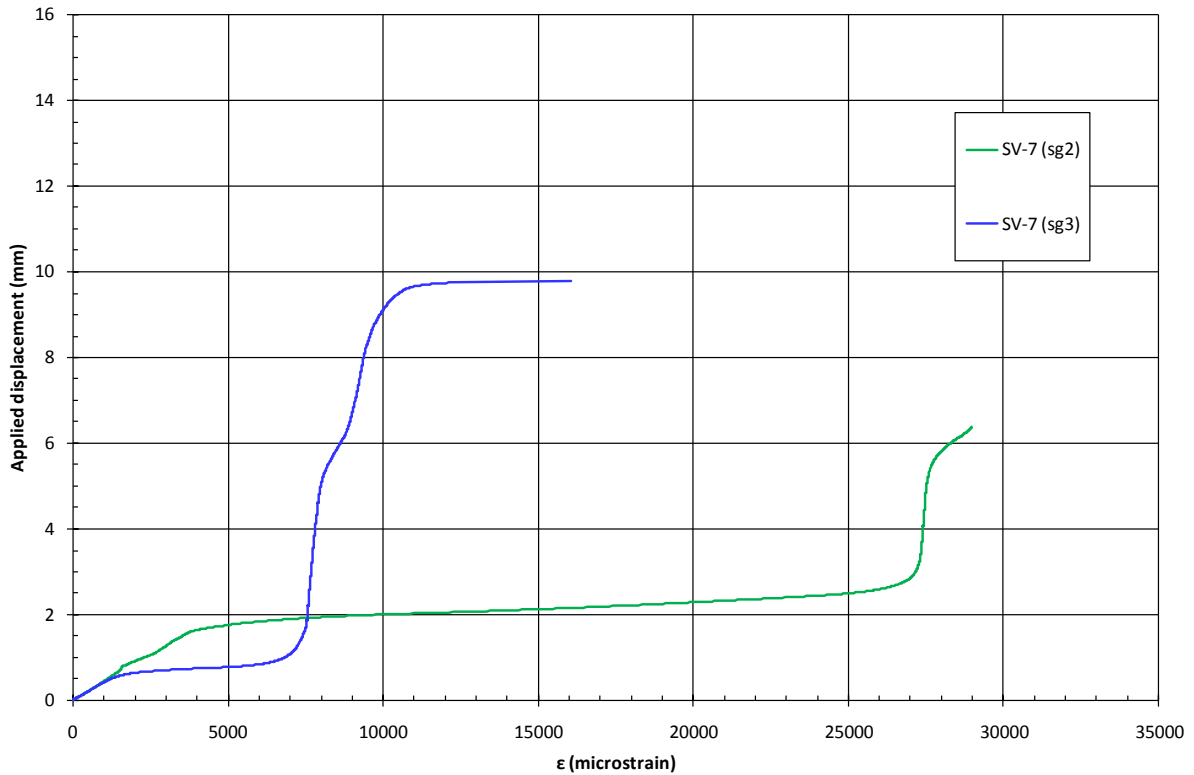
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στις θέσεις 2, 3 για το δοκίμιο SH-3.

Από ένα σημείο και μετά η παραμόρφωση στη θέση 3 μεγαλώνει ξανά. Αυτό συμβαίνει όταν αρχίζει η σταδιακή αποκόλληση του επιθέματος. Η χαλύβδινη πλάκα πρέπει να μεταφέρει μεγαλύτερα φορτία με αποτέλεσμα την περαιτέρω παραμόρφωση στη θέση 3. Ολοένα και μεγαλύτερο μέρος της διατομής του δοκιμίου κοντά στη ρωγμή εισέρχεται στην πλαστική περιοχή μέχρι την αποκόλληση του επιθέματος (τέλος καμπύλης), με αυξανόμενο ρυθμό. Σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς, διαπιστώνουμε τη σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων στην περιοχή μακριά από το επίθεμα (θέση 2) και την καθυστέρηση εξέλιξης των παραμορφώσεων στην περιοχή δίπλα από τη ρωγμή. Σαν συμπέρασμα λοιπόν, προκύπτει πως η ύπαρξη του επιθέματος «ανακουφίζει» την ελατωματική περιοχή και μεταφέρει την περιοχή υψηλής συγκέντρωσης τάσεων μακριά από τη ρωγμή.

Τα δοκίμια στα οποία ακολουθήθηκε η μέθοδος επίστρωσης VB, συμπεριφέρθηκαν και αυτά παρόμοια μεταξύ τους. Στα Σχήματα 4.16 και 4.17 παρουσιάζεται η παραμόρφωση στις θέσεις 1 και 2,3 αντίστοιχα, συναρτήσει της επιβαλλόμενης επιμήκυνσης για το δοκίμιο SV-7, το οποίο είναι τυπικό της ομάδας αυτής. Η μόνη διαφορά που παρουσιάζει το δοκίμιο αυτό ως προς τη συμπεριφορά, σε σχέση με το τυπικό δοκίμιο HLU (SH-3), εμφανίζεται στη θέση 1 (Σχήμα 4.16). Το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης βρίσκεται στην εφελκυστική πλευρά των παραμορφώσεων. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο μικρό βέλος κάμψης των δοκιμίων VB. Το μικρό βέλος κάμψης πρέπει να είναι και ο λόγος που δεν υπερισχύει αρχικά η θλιπτική συνιστώσα της παραμόρφωσης. Παρ' όλα αυτά ο αυξητικός ρυθμός αύξησης του βέλους κάμψης πριν από τη διαρροή του δοκιμίου οδηγεί σε μείωση της παραμόρφωσης, μέχρι που σχεδόν σταθεροποιείται από τη στιγμή που διαρρέει το δοκίμιο και μετά. Στις θέσεις 2 και 3, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.16, το δοκίμιο συμπεριφέρεται όπως και το SH-3.

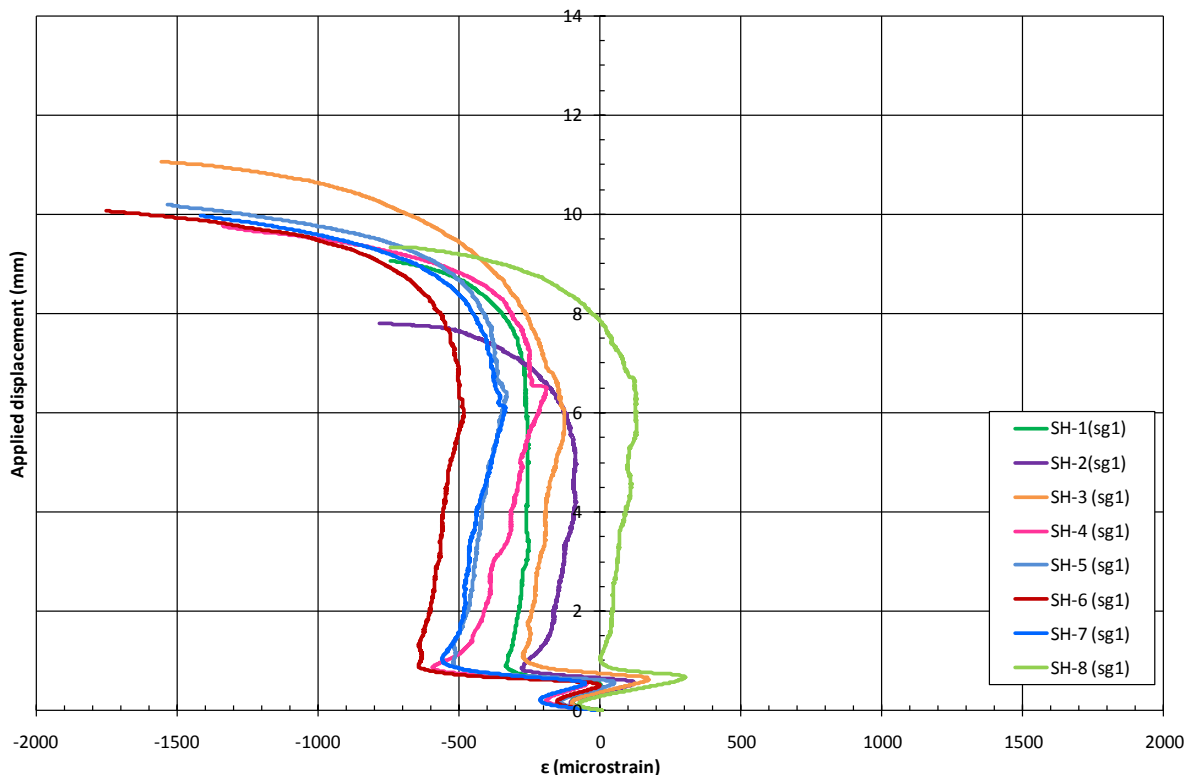


4.16: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 1 για το δοκίμιο SV-7.

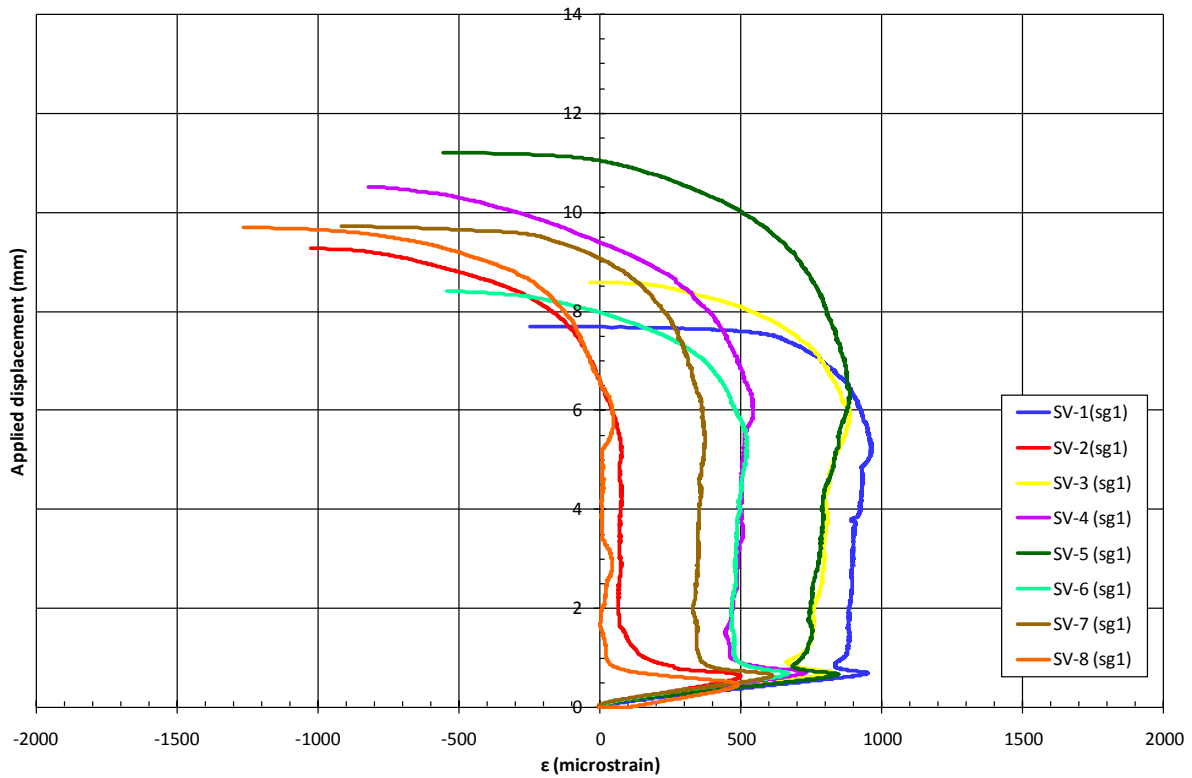


Σχήμα 4.17: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στις θέσεις 2, 3 για το δοκίμιο SV-7.

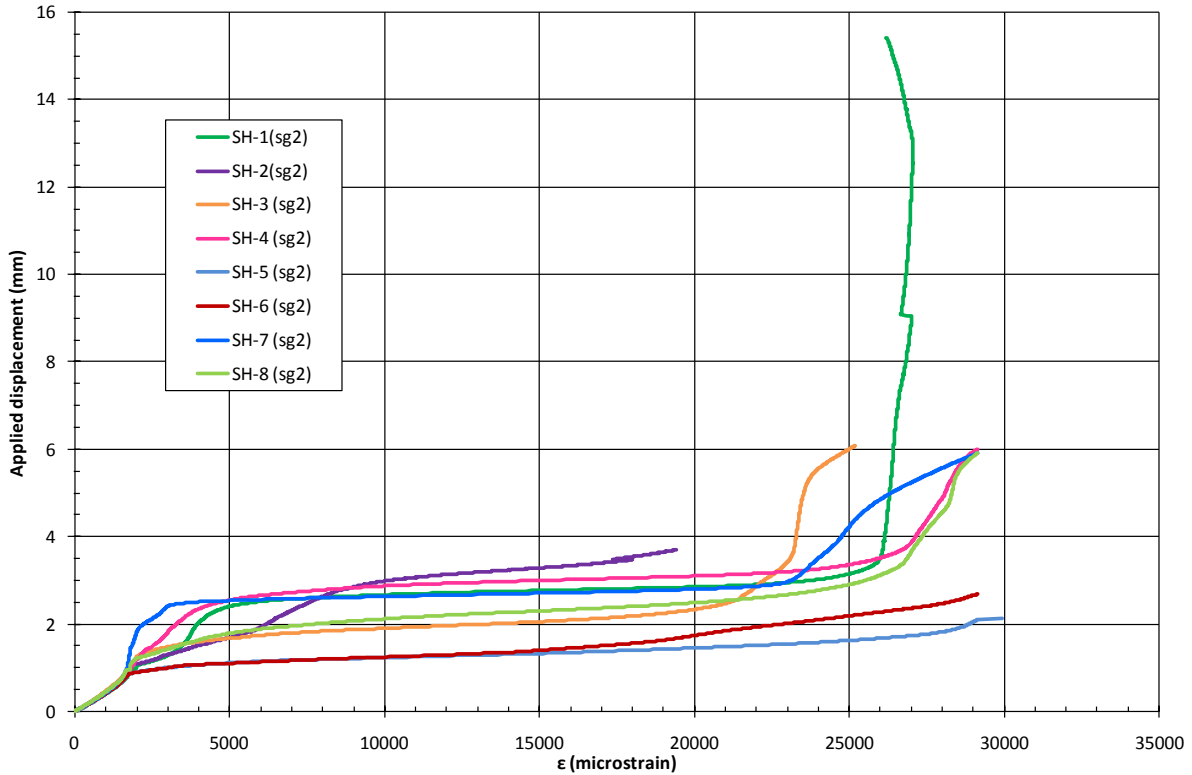
Στα Σχήματα 4.18 και 4.19 παρουσιάζεται η παραμόρφωση στη θέση 1, συναρτήσει της επιβαλλόμενης επιμήκυνσης, για όλα τα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο HLU και VB, αντίστοιχα. Σε όλα τα δοκίμια αυτά, η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα αυτά, τα δοκίμια σε καθεμία των περιπτώσεων συμπεριφέρονται παρόμοια. Επίσης δεν μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το αν ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης επηρεάζει τα δοκίμια με κάποιο τρόπο. Το δοκίμιο SH-8 είναι το μόνο από τα HLU δοκίμια, που το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης του βρίσκεται στην εφελκυστική πλευρά των παραμορφώσεων. Στα Σχήματα 4.20 και 4.21, φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη θέση 2. Η αύξηση των παραμορφώσεων στα δοκίμια SV-1 και SV-3 (Σχήμα 4.21), φαίνεται πως καθυστερεί σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Τέλος, στα Σχήματα 4.22 και 4.23, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη θέση 3. Αυτό που παρατηρούμε μεταξύ των δύο διαγραμμάτων, είναι πως η αρχική παραμόρφωση που εμφανίζεται στη θέση 3 (πριν αυτή σταματήσει και περάσει στη θέση 2), είναι μικρότερη στα δοκίμια VB, σε σχέση με τα δοκίμια HLU. Αυτό προφανώς οφείλεται στο ότι η κάμψη που εμφανίζεται λόγω ασύμμετρης διατομής, είναι μικρότερη στα δοκίμια VB. Από τις μετρήσεις που μας έδωσαν τα strain gauges σε όλες τις θέσεις, δεν υπάρχει κάποια σαφής ένδειξη πως ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης επηρεάζει τα δοκίμια με τρόπο τέτοιο ώστε να εξάγουμε συμπεράσματα και το πιο πιθανό συμπέρασμα είναι πως δεν τα επηρεάζει καθόλου.



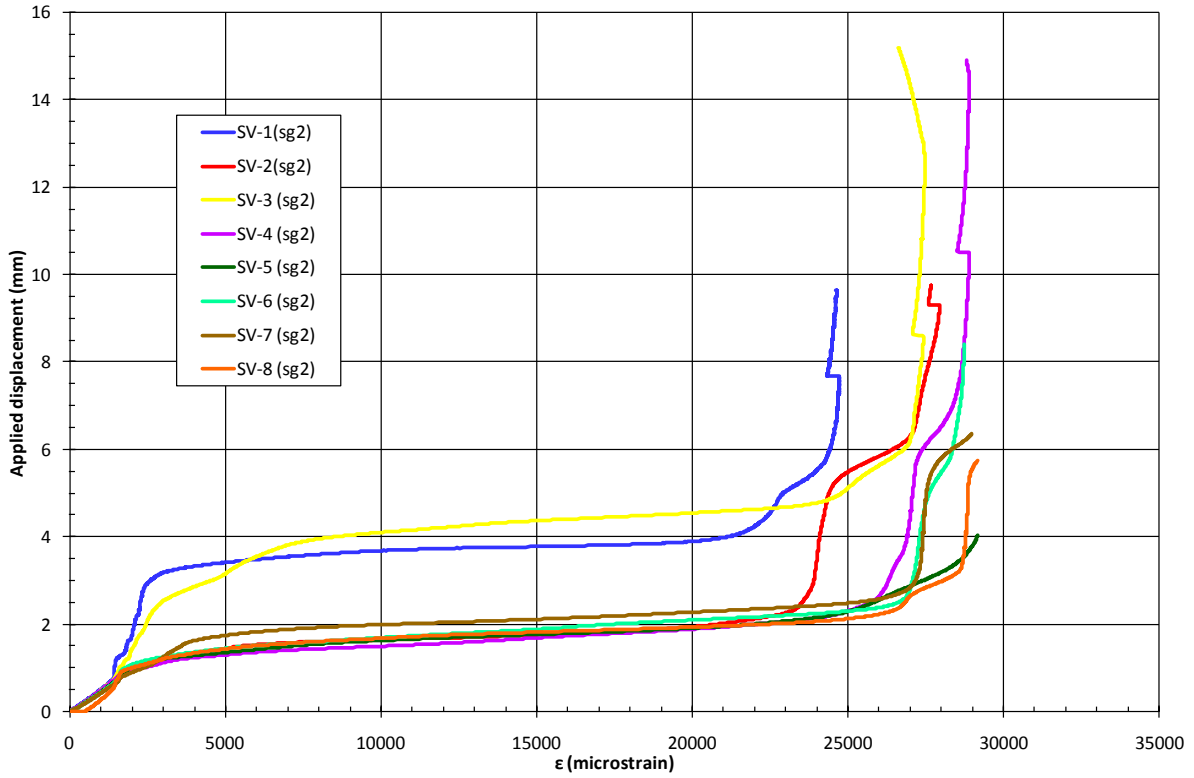
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 1 για τα δοκίμια HLU.



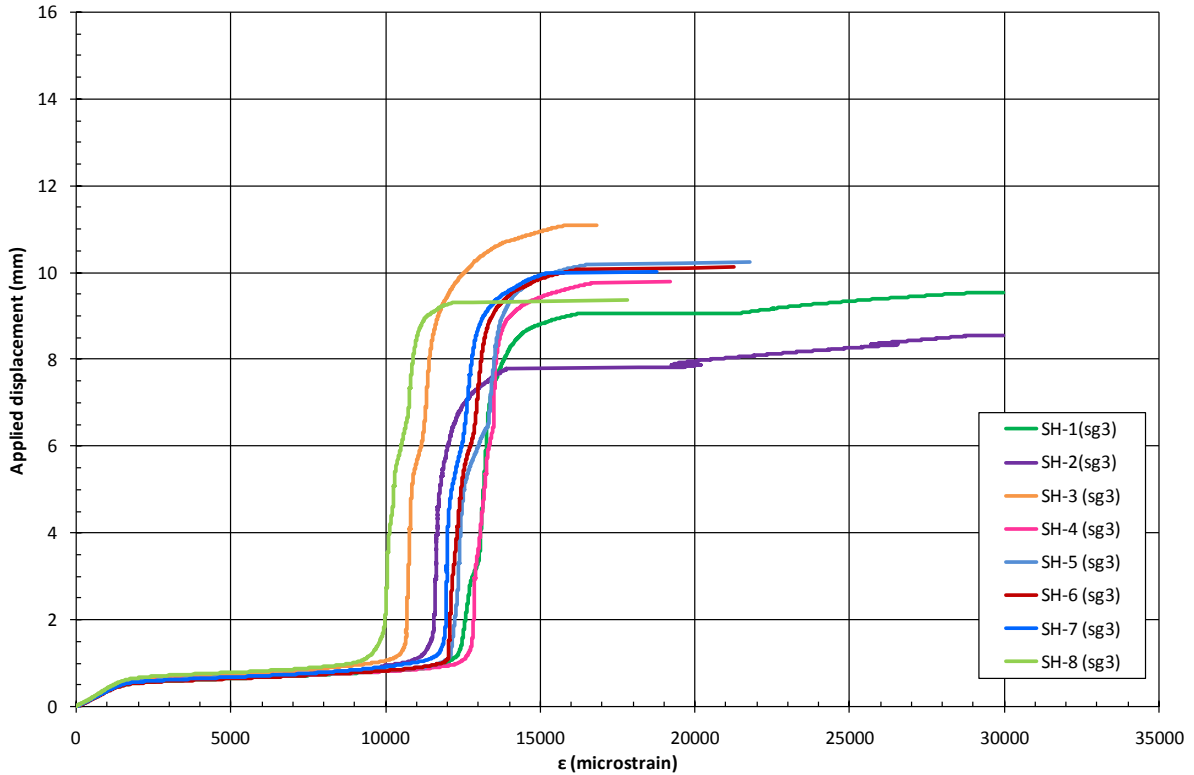
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 1 για τα δοκίμια VB.



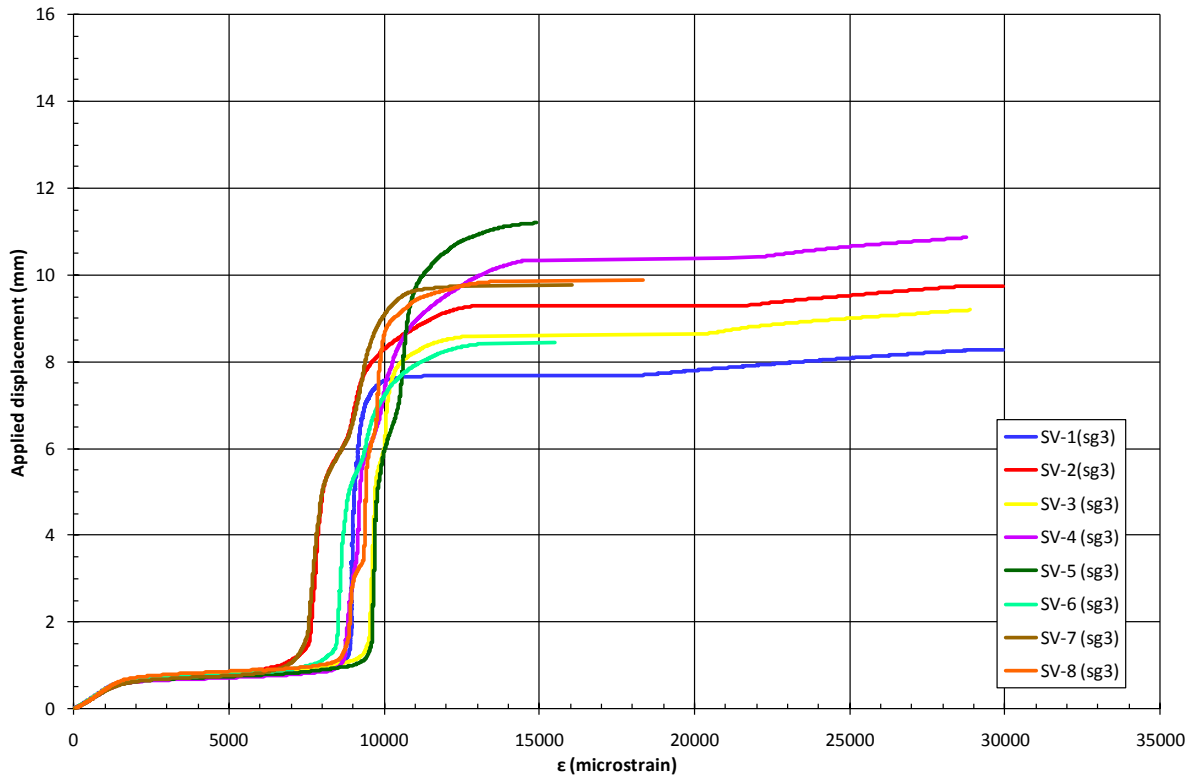
Σχήμα 4.20: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 2 για τα δοκίμια HLU.



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 2 για τα δοκίμια VB.

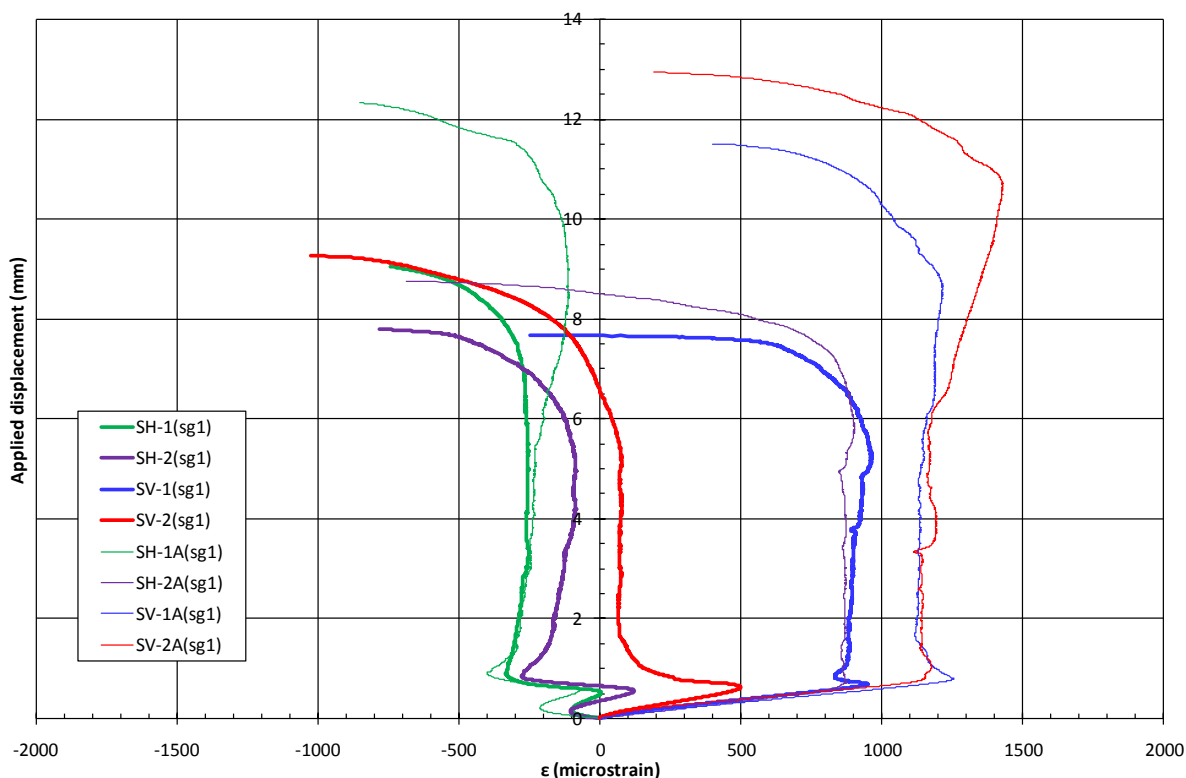


Σχήμα 4.22: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 3 για τα δοκίμια HLU.



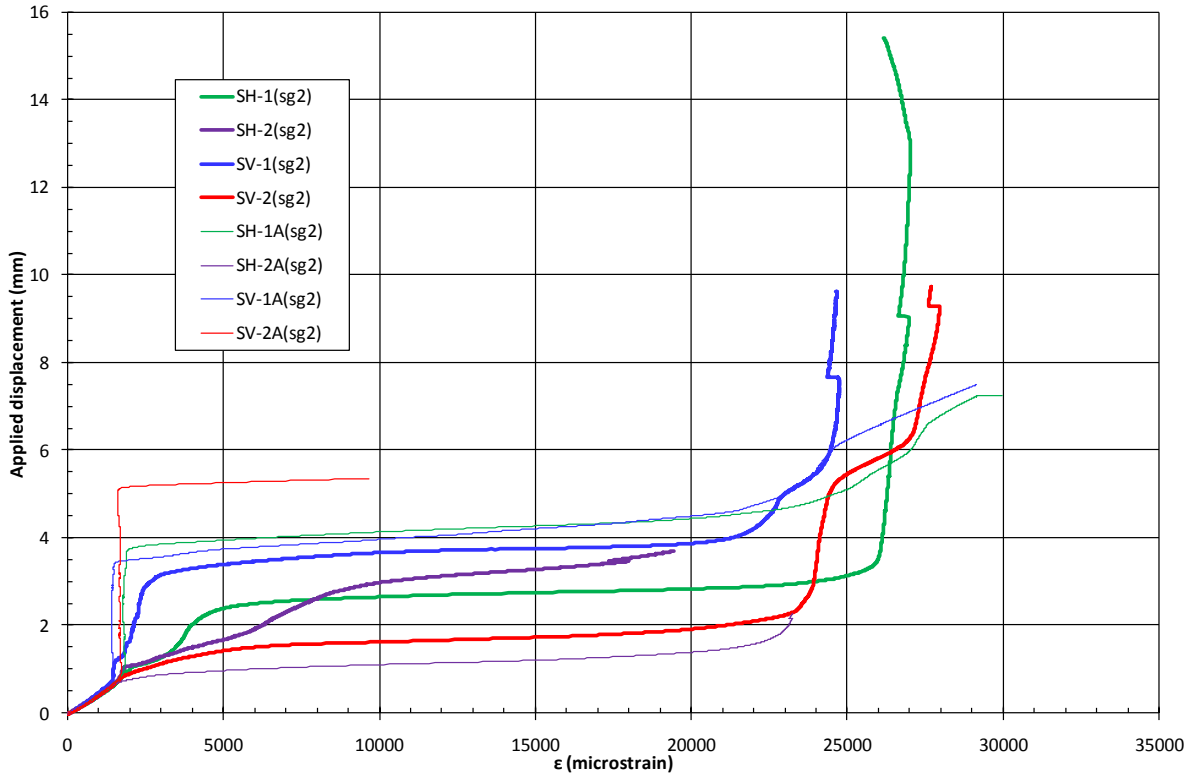
Σχήμα 4.23: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 3 για τα δοκίμια VB.

Τα δοκίμια των οποίων η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο παρουσιάζουν κάποιες διαφορές σε σχέση με τα αντίστοιχα που η προετοιμασία έγινε με αμμοβολή. Το Σχήμα 4.24 είναι συγκριτικό διάγραμμα των δύο μεθόδων και φαίνεται η παραμόρφωση στη θέση 1 συναρτήσει της επιμήκυνσης. Με εξαίρεση το SH-2A, η συμπεριφορά των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκε αεροματσάκονο είναι ανάλογη της μεθόδου επίστρωσης του επιθέματος. Αυτό που είναι σαφές από το διάγραμμα, είναι πως η πρόσφυση μεταξύ ρητίνης και χάλυβα είναι καλύτερη στην περίπτωση του αεροματσάκονου γι' αυτό και η αποκόλληση του επιθέματος (τέλος καμπύλης) καθυστερεί.

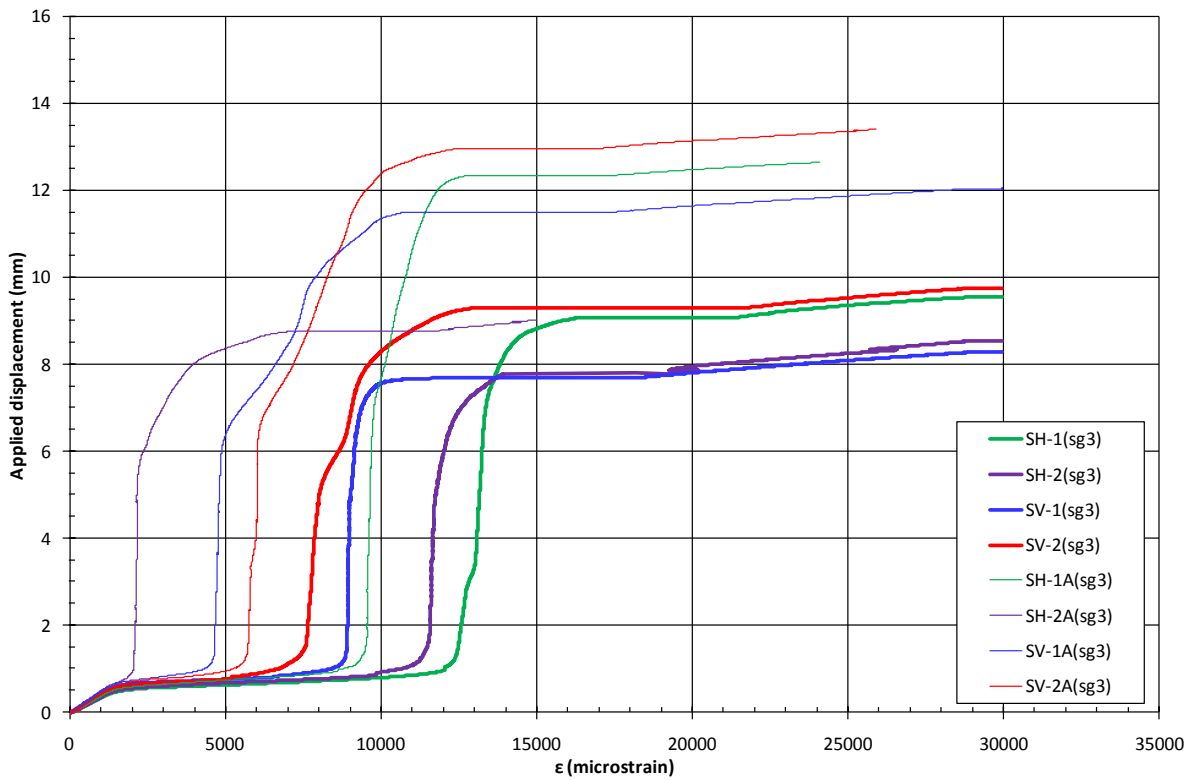


Σχήμα 4.24: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 1 για τις δύο μεθόδους προετοιμασίας της επιφάνειας.

Στα Σχήματα 4.25 και 4.26 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αντίστοιχα συγκριτικά διαγράμματα για τις θέσεις 2 και 3, αντίστοιχα. Η σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από το Σχήμα 4.25 είναι πως στην περίπτωση του αεροματσάκονου, μετά τη διαρροή του δοκιμίου, η παραμόρφωση στη θέση 2 παραμένει σταθερή για σημαντικό διάστημα, μέχρι που αυξάνεται απότομα. Αυτό σημαίνει πως το δοκίμιο έχει διαρρεύσει αλλού αρχικά και μετά περνάει στην πλαστική περιοχή και η θέση 2. Στη θέση 3 (Σχήμα 4.26), τα δοκίμια με αεροματσάκονο συμπεριφέρονται ποιοτικά όπως και τα δοκίμια με αμμοβολή. Όμως παρατηρούμε πως η αρχική παραμόρφωση, πριν αυτή σταματήσει για κάποιο διάστημα, είναι εμφανώς μικρότερη όταν εξετάζουμε τα αντίστοιχα δοκίμια (SH-1A με SH-1, SV-1A&2A με SV-1&2). Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί αν το βέλος κάμψης ήταν μικρότερο στα δοκίμια που εμφανίζουν μικρότερη παραμόρφωση. Όμως κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Στα δοκίμια SH-1A και SV-2A, η κάμψη είναι εμφανώς μεγαλύτερη από τα SH-1 και SV-1&2, αντίστοιχα. Από τα παραπάνω λοιπόν, συμπεραίνουμε πως η προετοιμασία της επιφάνειας με αεροματσάκονο αλλάζει το μηχανισμό που συμπεριφέρονται τα δοκίμια σε σχέση με εκείνα που η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή επιβαρύνοντας λιγότερο την περιοχή γύρω από τη ρωγμή.



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 2 για τις δύο μεθόδους προετοιμασίας της επιφάνειας.



Σχήμα 4.26: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 3 για τις δύο μεθόδους προετοιμασίας της επιφάνειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

5.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Οι πειραματικές δοκιμές που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας μοντελοποιήθηκαν με τη χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method). Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ANSYS 11.0 και η γενική μέθοδος που ακολουθήθηκε για την αριθμητική μοντελοποίηση περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2. Σκοπός ήταν η ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων και η εφαρμογή της ΜΠΣ σε αυτά, ώστε τα αριθμητικά αποτελέσματα που θα προκύψουν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Η παραμονή των δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης, άρα και η επίδραση αυτού στις μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος, δεν ήταν δυνατόν να μοντελοποιηθεί καθώς δεν είναι γνωστός ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται το επίθεμα. Γι' αυτό και δεν κατασκευάστηκε κανένα μοντέλο που να αντιστοιχεί στα δοκίμια που εισήχθησαν στο θάλαμο αλατονέφωσης. Επίσης, η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας δεν λήφθηκε υπ' όψιν για τη δημιουργία των αριθμητικών μοντέλων, καθότι δεν είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί η τραχύτητα της επιφάνειας. Ως εκ τούτου κατασκευάστηκαν 3 αριθμητικά μοντέλα. Ένα μοντέλο που αντιστοιχεί στα δύο δοκίμια αναφοράς (SR-1&2), ένα που αντιστοιχεί στα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο HLU (SH-1&2, SH-1A&2A) και ένα μοντέλο για τα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο VB (SV-1&2, SV-1A&2A).

Οι διαστάσεις του κάθε μοντέλου προέκυψαν από τον μέσο όρο των μετρηθέντων διαστάσεων των αντίστοιχων δοκιμίων. Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται για κάθε ένα μοντέλο που κατασκευάστηκε οι διαστάσεις που λήφθησαν υπ' όψιν. Οι διαστάσεις που δεν εμφανίζονται στον Πίνακα 5.1 έχουν τις ονομαστικές τους τιμές (βλ. εδάφιο 3.2). Οι μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος για τις δύο διαφορετικές μεθόδους επίστρωσης, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Με E συμβολίζεται το μέτρο ελαστικότητας, ν είναι ο λόγος Poisson και G το μέτρο διάτμησης. Οι δείκτες x , y και z συμβολίζουν τις διευθύνσεις του μήκους, πλάτους και πάχους, αντίστοιχα. Οι τιμές με πλάγια γραφή έχουν υπολογιστεί με τη μέθοδο που περιγράφεται στο εδάφιο 3.3, ενώ όλες οι υπόλοιπες πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα λήφθηκε ίσο με 184 GPa, το όριο διαρροής σ_0 ίσο με 280.8 MPa, ο λόγος Poisson ίσος με 0.30 και το μέτρο κράτνωσης ίσο με 500 MPa. Για το κολλητικό μέσο το μέτρο ελαστικότητας ήταν 4500 MPa και ο λόγος Poisson ίσος με 0.25. Στον Πίνακα 5.3 φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα και της κόλλας που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση. Το επίθεμα κατά τη μοντελοποίησή του χωρίστηκε σε τρεις ομάδες κατά τη διεύθυνση του πάχους, κάθε μία εκ των οποίων είχε μήκος 300 mm, 250 mm και 200 mm. Το πάχος της κάθε ομάδας ήταν ίσο με το 1/3 του πάχους του επιθέματος t_p . Το πάχος του

κολλητικού μέσου θεωρήθηκε ίσο με 0.1 mm και κάλυπτε όλη την διεπιφάνεια μεταξύ της χαλύβδινης πλάκας και της πρώτης στρώσης του επιθέματος. Πάνω από την οπή δεν υπήρχε κολλητικό μέσο.

Πίνακας 5.1: Διαστάσεις των τριών μοντέλων που κατασκευάστηκαν.

Μοντέλο	Πάχος χάλυβα t_s (mm)	Πάχος επιθέματος t_p (mm)	Πλάτος $W_s=W_p$ (mm)
Αναφοράς	4.18	-	50.25
HLU	4.16	4.42	50.19
VB	4.18	4.06	50.18

Πίνακας 5.2: Μηχανικές ιδιότητες επιθεμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση.

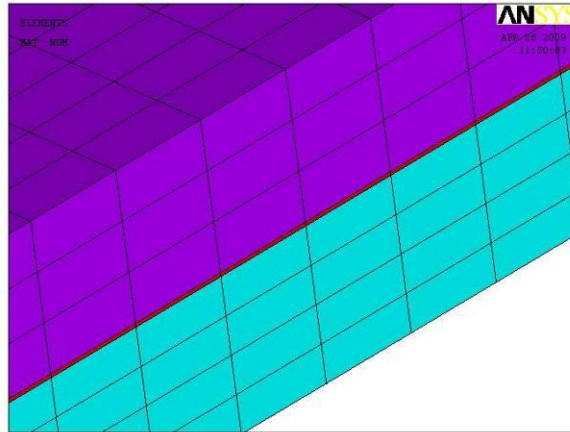
Επίθεμα	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy} (MPa)	G_{xz} (MPa)	G_{yz} (MPa)
HLU	43545	43545	5000	0.30	0.30	0.02	2400	2400	1600
VB	63008	63008	5000	0.30	0.30	0.02	2400	2400	1600

Πίνακας 5.3: Μηχανικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση.

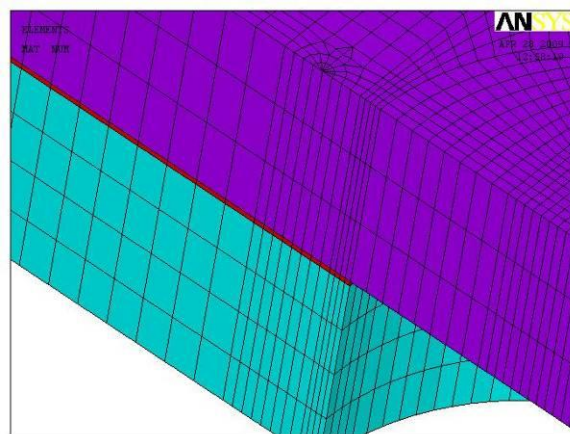
Υλικό	E (MPa)	ν	Μέτρο κράτυνασης (MPa)	σ_o (MPa)
Χάλυβας	184000	0.3	500	280.8
Κόλλα	4500	0.25	-	-

Σε όλα τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο εικοσακομβικό στοιχείο SOLID95 σε συνδυασμό με το βοηθητικό διδιάστατο οκτακομβικό στοιχείο PLANE82. Κατά τη διεύθυνση του πάχους (άξονας z), χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα στοιχεία για τη μοντελοποίηση της χαλύβδινης πλάκας, ένα στοιχείο για τη μοντελοποίηση της κόλλας και τρία στοιχεία για τη μοντελοποίηση του σύνθετου επιθέματος, ένα για κάθε μία από τις τρεις ομάδες στρώσεων με διαφορετικό μήκος (Σχήμα 5.1). Γύρω από το μέτωπο της ρωγμής έγινε χρήση των ιδιόμορφων στοιχείων SOLID95 καθ' όλο το πάχος του μοντέλου (Σχήμα 2.7 και 5.2). Στην περιοχή κοντά στην ρωγμή η διακριτοποίηση του καννάβου ήταν αρκετά πιο πυκνή, καθώς εκεί επιζητούσαμε μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

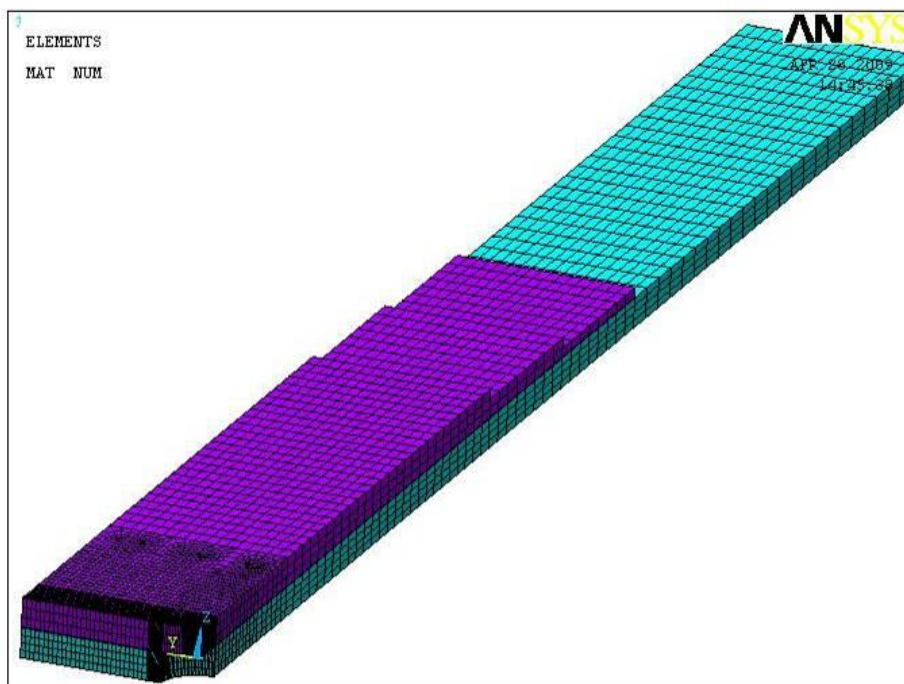
Εξαιτίας της συμμετρίας που παρουσιάζει η κατασκευή μοντελοποιήθηκε το ¼ αυτής. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται το μοντέλο ενός δοκιμίου με επίθεμα. Σε όλο το επίπεδο x-z τέθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας. Στο επίπεδο y-z ορίστηκαν συνθήκες συμμετρίας σε όλη την επιφάνεια του επιθέματος, ενώ στην επιφάνεια του χάλυβα και του κολλητικού μέσου ορίστηκαν εκτός της περιοχής της ρωγμής.



Σχήμα 5.1: Αριθμός στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους.



Σχήμα 5.2: Χρήση ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από το μέτωπο της ρωγμής.

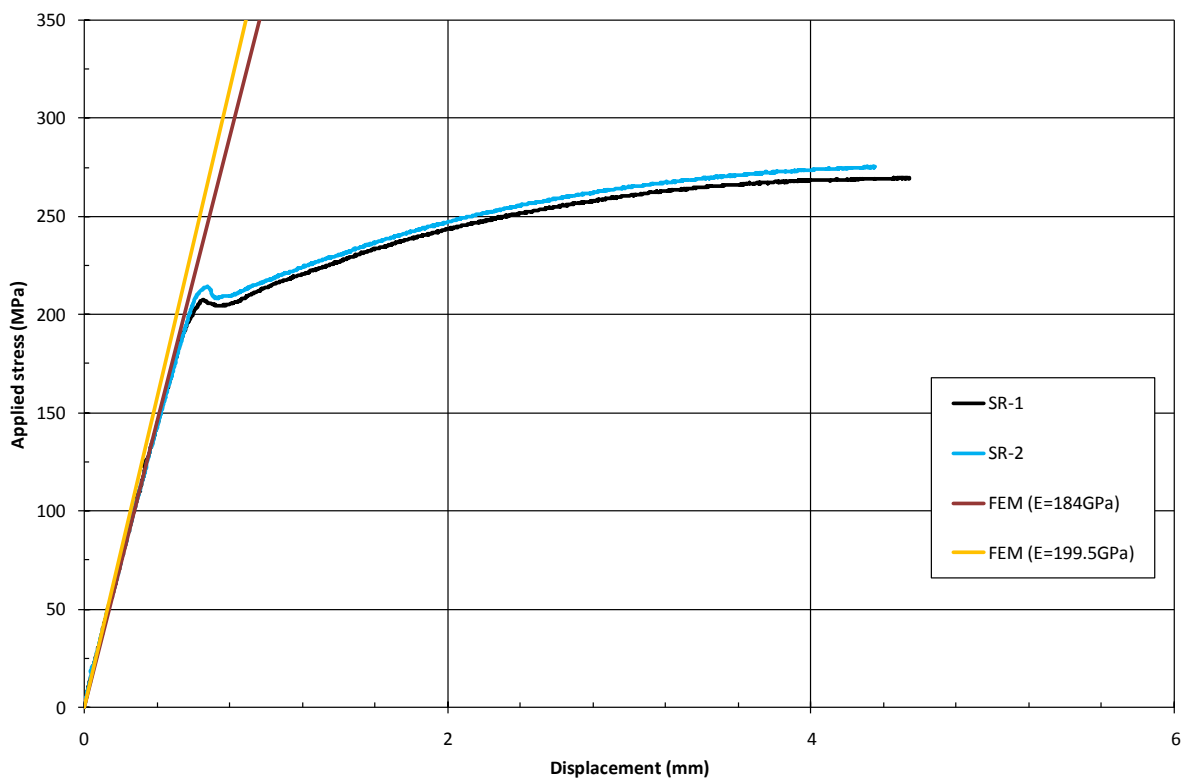


Σχήμα 5.3: Μοντέλο του 1/4 ενός δοκιμίου με επίθεμα.

Στις πειραματικές δοκιμές είχαμε επιβολή επιμήκυνσης με σταθερό ρυθμό στα δοκίμια. Ο ίδιος τύπος φόρτισης (επιβολή επιμήκυνσης) ασκήθηκε και στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, στο ελεύθερο άκρο τους. Η συνοριακή συνθήκη που τέθηκε στην επιφάνεια του ελεύθερου άκρου είναι μηδενική μετατόπιση ως προς τον άξονα z. Το γεγονός ότι ασκήθηκε ομοιόμορφη επιμήκυνση καθ' όλη την επιφάνεια του ελεύθερου άκρου των μοντέλων συνεπάγεται πως η επιφάνεια αυτή παραμένει επίπεδη και παράλληλη προς το επίπεδο y-z κατά τη φόρτιση, πράγμα που συνάδει με τις πειραματικές δοκιμές.

Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε πως η μοντελοποίηση των δοκιμών με επίθεμα δεν περιλαμβάνει κάποιου είδους αστοχία υλικού. Αυτό σημαίνει πως το επίθεμα, η κόλλα και η χαλύβδινη πλάκα είναι τέλεια ενωμένα μεταξύ τους. Γι' αυτό τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με τα πειραματικά μόνο για όσο τα υλικά είναι τέλεια ενωμένα μεταξύ τους, άρα οποιαδήποτε σύγκριση μετά από έστω και μερική αστοχία υλικών είναι ανούσια.

Τέλος θα πρέπει να διευκρινίσουμε για το χάλυβα ότι ενώ το μέτρο ελαστικότητας είχε προκύψει 199.5 GPa ύστερα από πειραματική μέτρηση (βλ. εδάφιο 3.3), επελέγη 184 GPa στην αριθμητική μοντελοποίηση. Αυτό συνέβη γιατί όπως φαίνεται και στο διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης των δοκιμών αναφοράς (Σχήμα 5.4), τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης με χρήση της ΜΠΣ (FEM) για τα δοκίμια αναφοράς μας έδειχναν πως υπάρχει απόκλιση μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων για $E=199.5$ GPa και των πειραματικών, όσον αφορά την ελαστική περιοχή του χάλυβα. Να υπενθυμίσουμε πως η γραμμική ανάλυση μπορεί να μοντελοποιήσει με ακρίβεια μόνο την ελαστική συμπεριφορά

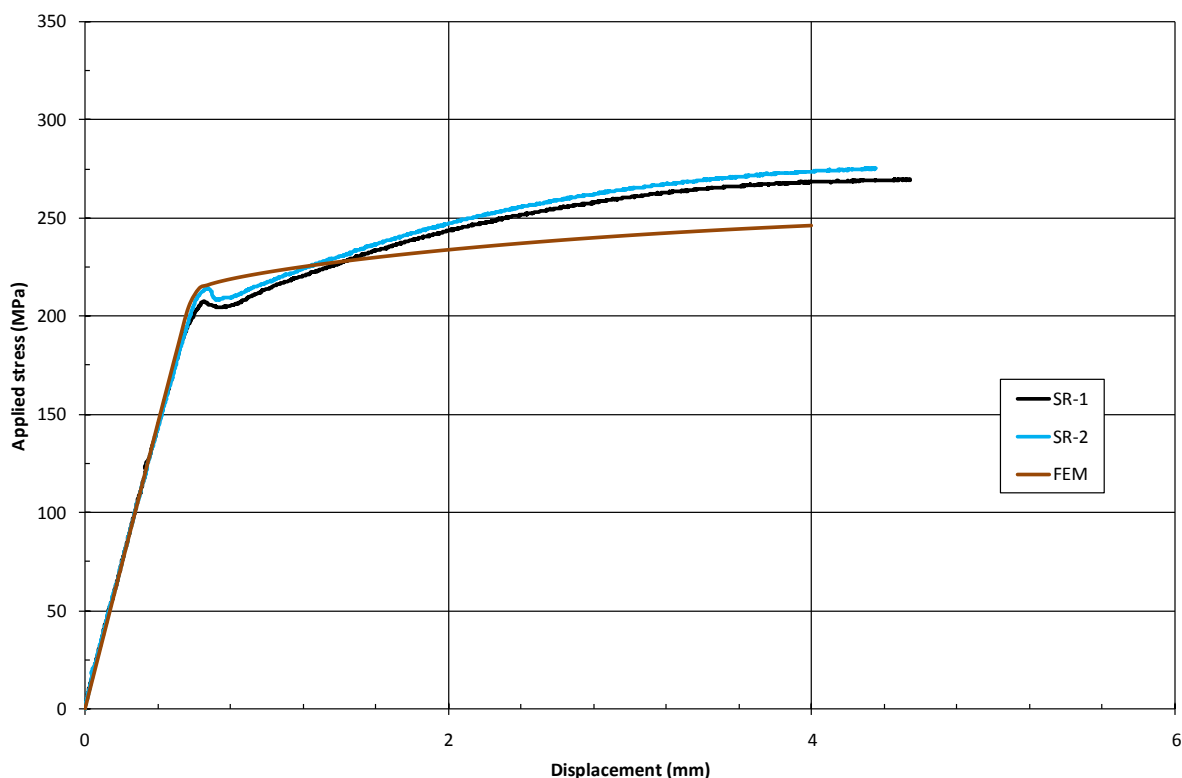


Σχήμα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για τα δοκίμια αναφοράς.

του χάλυβα. Τέτοια διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων δεν δικαιολογείται και το πιο πιθανό είναι πως η δοκιμή εφελκυσμού που έγινε στο χάλυβα να μας έδωσε λάθος αποτελέσματα. Αυτό ενδεχομένως συνέβη γιατί δεν ακολουθήθηκε κάποιος πρότυπος διεθνής κανονισμός δοκιμής εφελκυσμού, όπως είναι ο ASTM E111-61 για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας [Ανδριανόπουλος, Ν.-1991]. Έτσι, ύστερα από παραμετρική μελέτη και έχοντας ως στόχο την ταύτιση της ελαστικής περιοχής των δοκιμών αναφοράς στο διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης με την καμπύλη που προκύπτει από την γραμμική ανάλυση με ΜΠΣ, προέκυψε μέτρο ελαστικότητας ίσο με 184 GPa (Σχήμα 5.4).

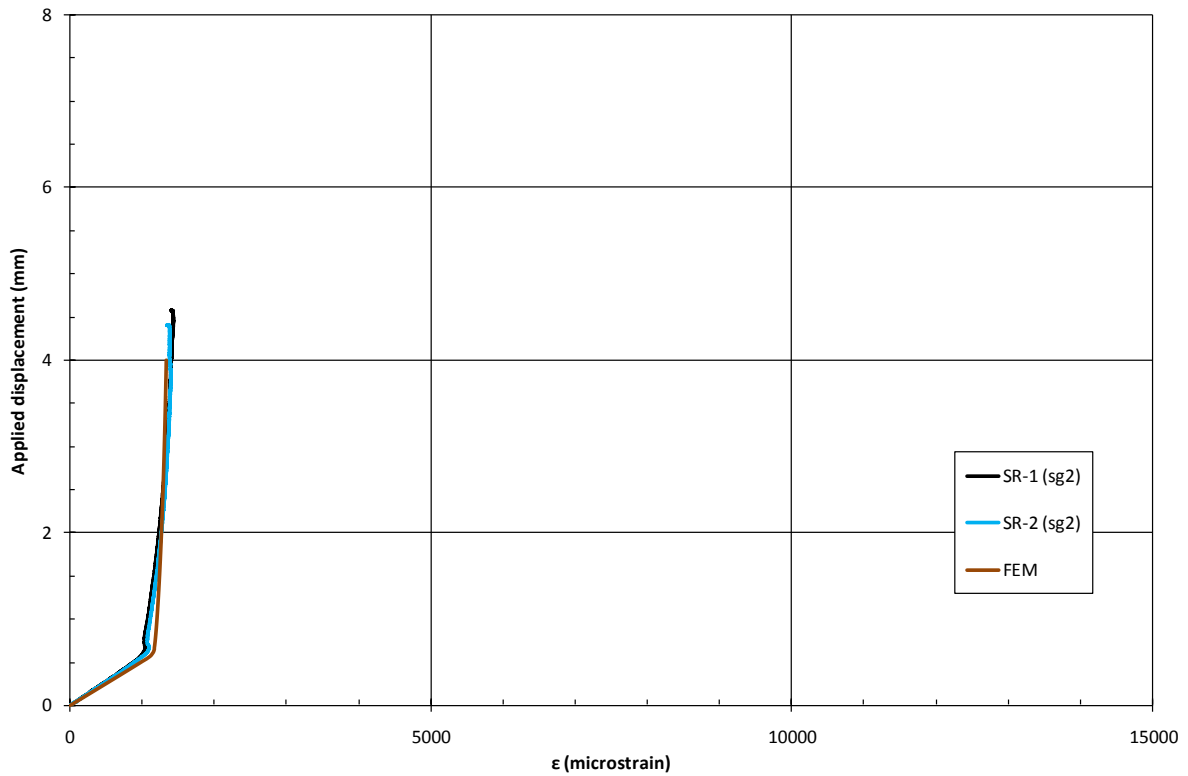
5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει τις καμπύλες τάσης – επιμήκυνσης για τα δοκίμια αναφοράς SR-1&2 συγκριτικά με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα (καμπύλη FEM). Όπως βλέπουμε τα αποτελέσματα στην ελαστική περιοχή ταυτίζονται, ενώ οι διαφορές που παρουσιάζονται στην πλαστική περιοχή οφείλονται στην απλοποιημένη μοντελοποίηση της χαλύβδινης πλάκας, η οποία θεωρήθηκε ως ελαστοπλαστική. Στα Σχήματα 5.6 και 5.7

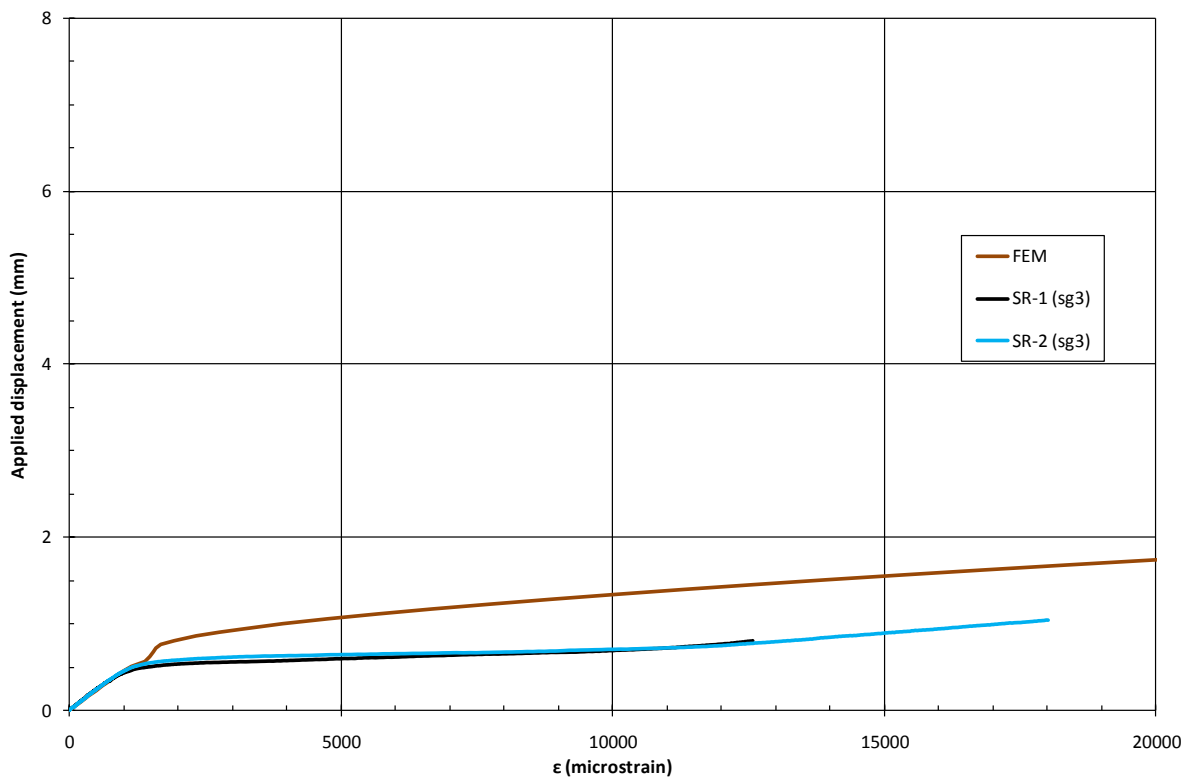


Σχήμα 5.5: Διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης για τα δοκίμια αναφοράς SR-1&2.

παρουσιάζονται τα διαγράμματα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στις θέσεις 2 και 3 αντίστοιχα, για τα δοκίμια αναφοράς. Η σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων είναι αρκετά καλή. Η συμπεριφορά των δοκιμών έχει μοντελοποιηθεί με ακρίβεια στην ελαστική περιοχή, ενώ οι διαφορές που παρατηρούνται στην πλαστική περιοχή οφείλονται στην απλοποιημένη μοντελοποίηση του χάλυβα και στο γεγονός ότι τα



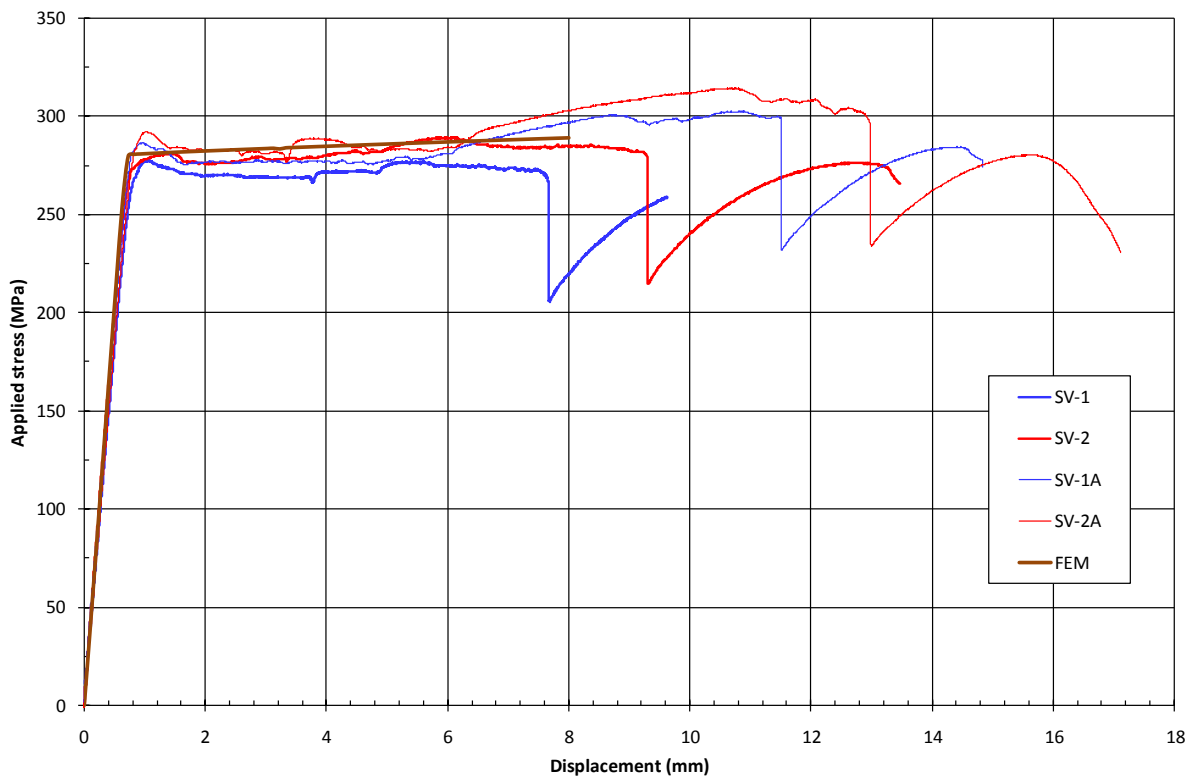
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 2 για τα δοκίμια SR-1&2.



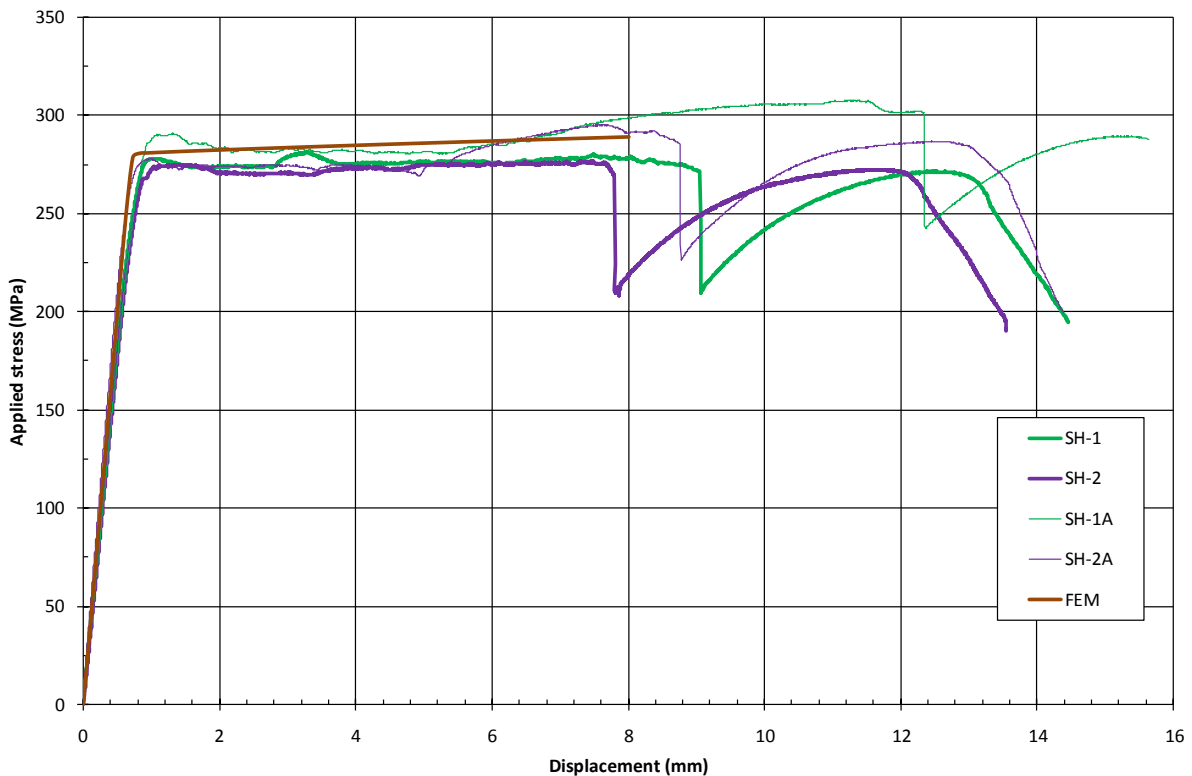
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 3 για τα δοκίμια SR-1&2.

αριθμητικά αποτελέσματα προέκυψαν από το μέσο όρο των τιμών για το μήκος των 10 mm που είχαν τα strain gauges.

Στα Σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης – επιμήκυνσης για τα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο VB και HLU, αντίστοιχα. Βλέπουμε πως και στις δύο περιπτώσεις η μοντελοποίηση με ΜΠΣ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ελαστική περιοχή. Η κλίση της γραμμικής περιοχής της καμπύλης FEM είναι ταυτόσημη με αυτή των πειραματικών αποτελεσμάτων ενώ η τάση διαρροής που προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα προσεγγίζει με πολύ καλή ακρίβεια τις τιμές που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές. Στην πλαστική περιοχή, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκλίνουν ικανοποιητικά με τα πειραματικά. Δείχνουν πως η τάση κυμαίνεται στα ίδια περίπου επίπεδα με την τάση διαρροής, για όσο δεν υπάρχει έστω και μερική αστοχία υλικών (αστοχία κόλλας άρα και αποκόλληση επιθέματος).

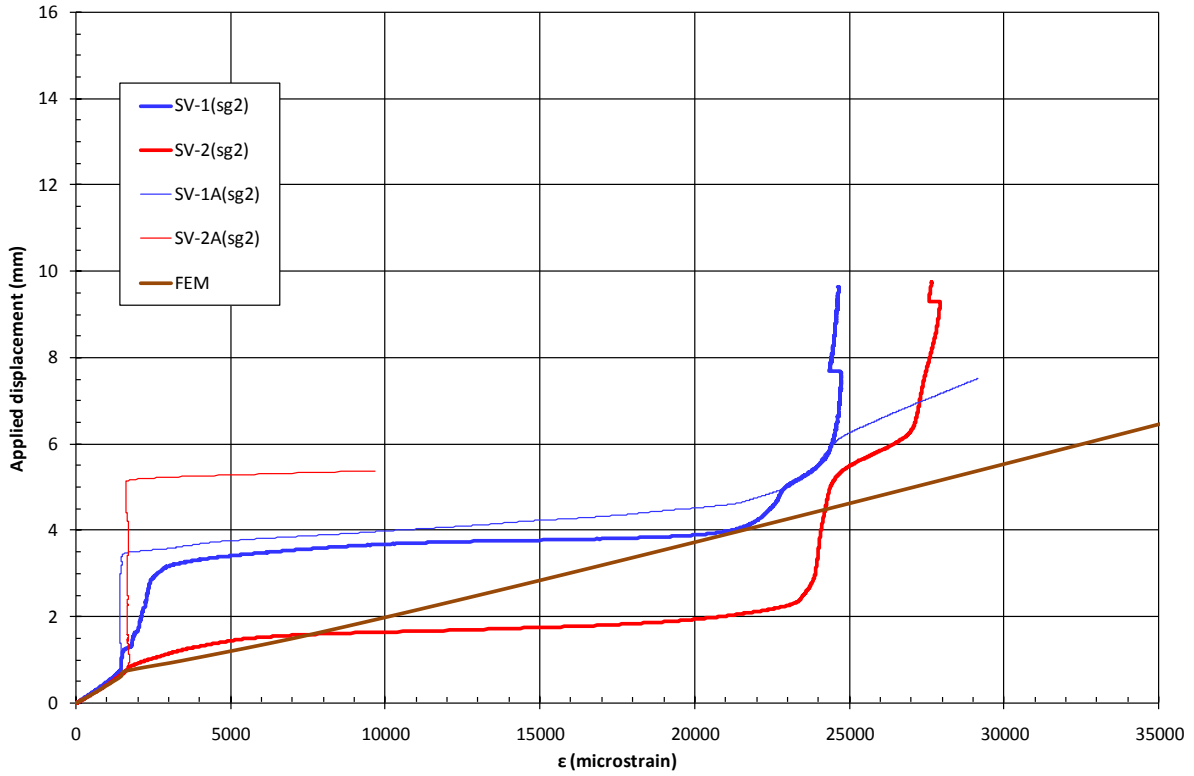


Σχήμα 5.8: Διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης για τα δοκίμια SV-1&2 και SV-1A&2A.

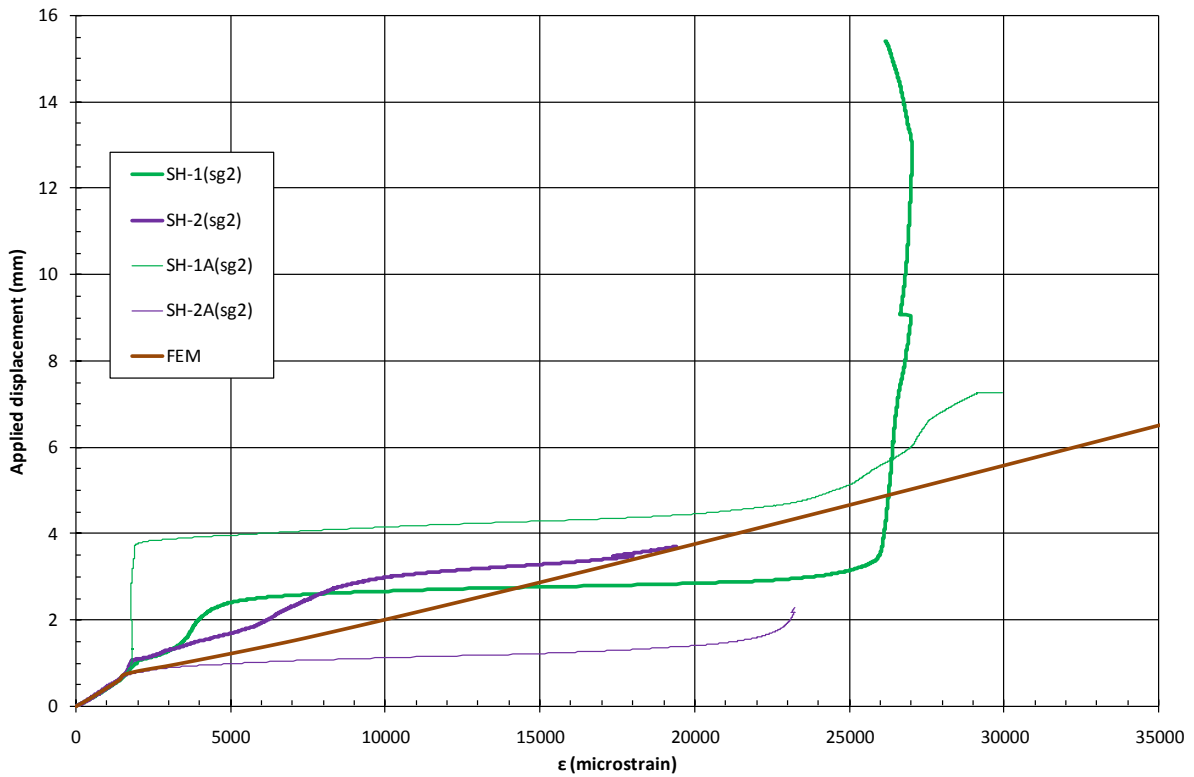


Σχήμα 5.9: Διάγραμμα τάσης – επιμήκυνσης για τα δοκίμια SH-1&2 και SH-1A&2A.

Στα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζεται η παραμόρφωση συναρτήσει της επιμήκυνσης στη θέση 2 για τα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο VB και HLU, αντίστοιχα. Η μοντελοποίηση στην ελαστική περιοχή είναι και σε αυτήν την περίπτωση ακριβής. Βλέπουμε όμως πως στην πλαστική περιοχή υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται πως η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας επηρεάζει την ποιοτική συμπεριφορά των δοκιμίων στη θέση 2 σε μεγάλο βαθμό. Άρα μπορούμε να πούμε πως ένας σημαντικός παράγοντας για τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι παραμορφώσεις μακριά από το επίθεμα είναι η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας. Μπορούμε λοιπόν να υποθέσουμε πως από τη στιγμή που δεν συμπεριελήφθη στη μοντελοποίηση αυτός ο παράγοντας είναι λογικό τα αριθμητικά αποτελέσματα να διαφέρουν από τα πειραματικά.

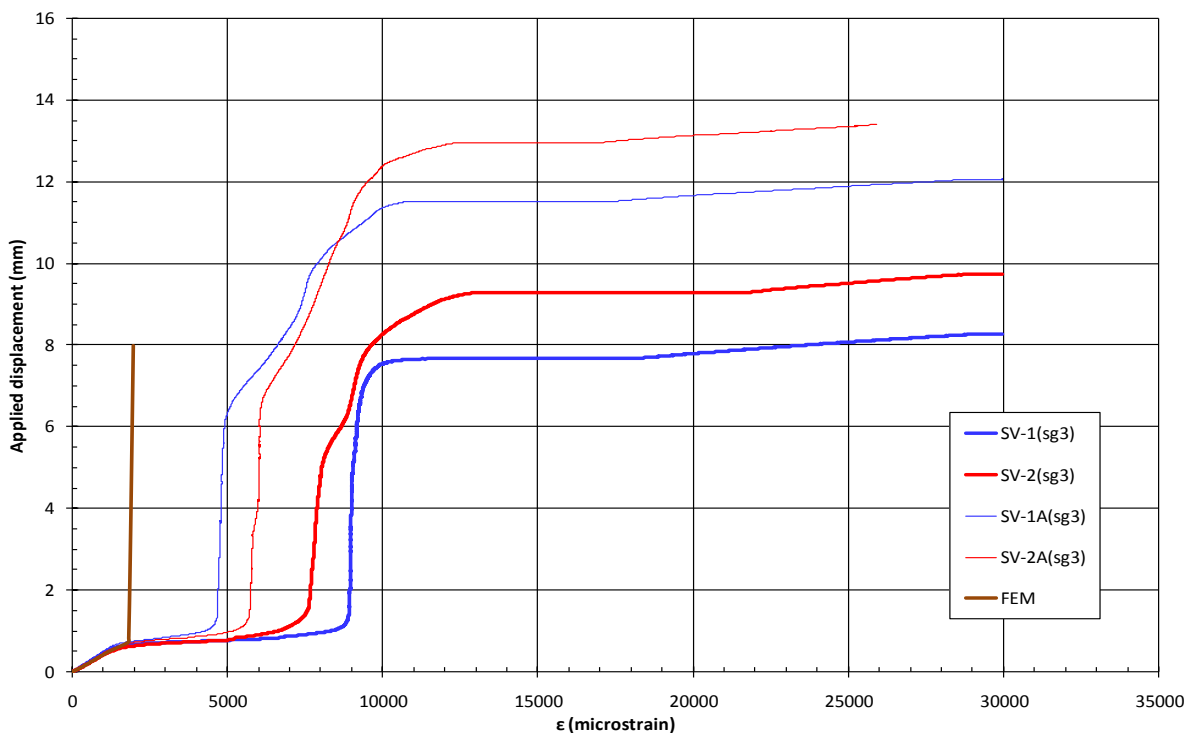


Σχήμα 5.10: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 2 για τα δοκίμια SV-1&2 και SV-1A&2A.

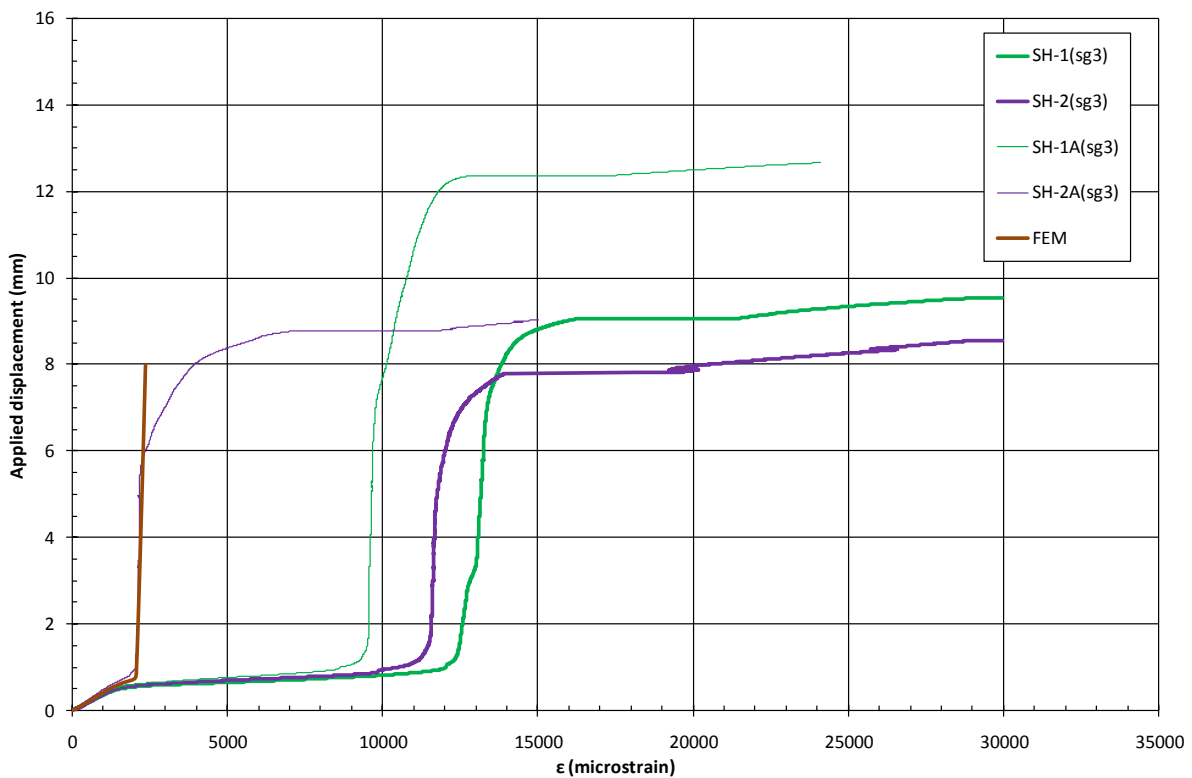


Σχήμα 5.11: Διάγραμμα επιμήκυνσης - παραμόρφωσης στη θέση 2 για τα δοκίμια SH-1&2 και SH-1A&2A.

Στα Σχήματα 5.12 και 5.13 παρουσιάζεται η παραμόρφωση συναρτήσει της επιμήκυνσης στη θέση 3 για τα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο VB και HLU, αντίστοιχα. Για άλλη μία φορά έχουμε ταύτιση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων στην ελαστική περιοχή. Το γεγονός ότι δεν έχουμε αριθμητική σύγκλιση στην πλαστική περιοχή πρέπει να οφείλεται στο ότι δεν έχει μοντελοποιηθεί η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας. Ήδη έχουμε καταλήξει στο συμπέρασμα πως αφού εμφανιστεί μια αρχική παραμόρφωση στη θέση 3, αυτή θα σταματήσει να εξελίσσεται νωρίτερα όταν η προετοιμασία της επιφάνειας έχει γίνει με αεροματσάκονο απ' ότι όταν έχει γίνει με αμμοβολή (βλ. εδάφιο 4.3). Άρα η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν στη μοντελοποίηση, με αποτέλεσμα τα αριθμητικά αποτελέσματα να μη συγκλίνουν με τα πειραματικά. Παρ' όλα αυτά με τη ΜΠΣ έχει μοντελοποιηθεί με ακριβεία η ποιοτική εξέλιξη των παραμορφώσεων, αφού το δοκίμιο εισέλθει στην πλαστική περιοχή. Η ΜΠΣ μας δείχνει πως μετά από μια αρχική παραμόρφωση που εμφανίζεται στη θέση 3 αυτή σταματάει να εξελίσσεται πριν το δοκίμιο εισέλθει στην πλαστική περιοχή, πράγμα το οποίο συνέβη και στις πειραματικές δοκιμές. Επίσης, το γεγονός ότι έχουμε επανεκκίνηση των παραμορφώσεων από ένα σημείο και μετά στα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ η ΜΠΣ δεν δείχνει κάτι τέτοιο, ενισχύει την υπόθεση που διατυπώθηκε στο εδάφιο 4.3 ότι η επανεκκίνηση αυτή εμφανίζεται όταν αρχίζει η μερική αποκόλληση του επιθέματος (η αστοχία υλικού δεν έχει μοντελοποιηθεί). Τέλος, η αριθμητική μοντελοποίηση μας δείχνει πως η παραμόρφωση στη θέση 3 βρίσκεται μέσα στα όρια της ελαστικής περιοχής, πράγμα το οποίο δεν συνάδει με τα πειραματικά αποτελέσματα.

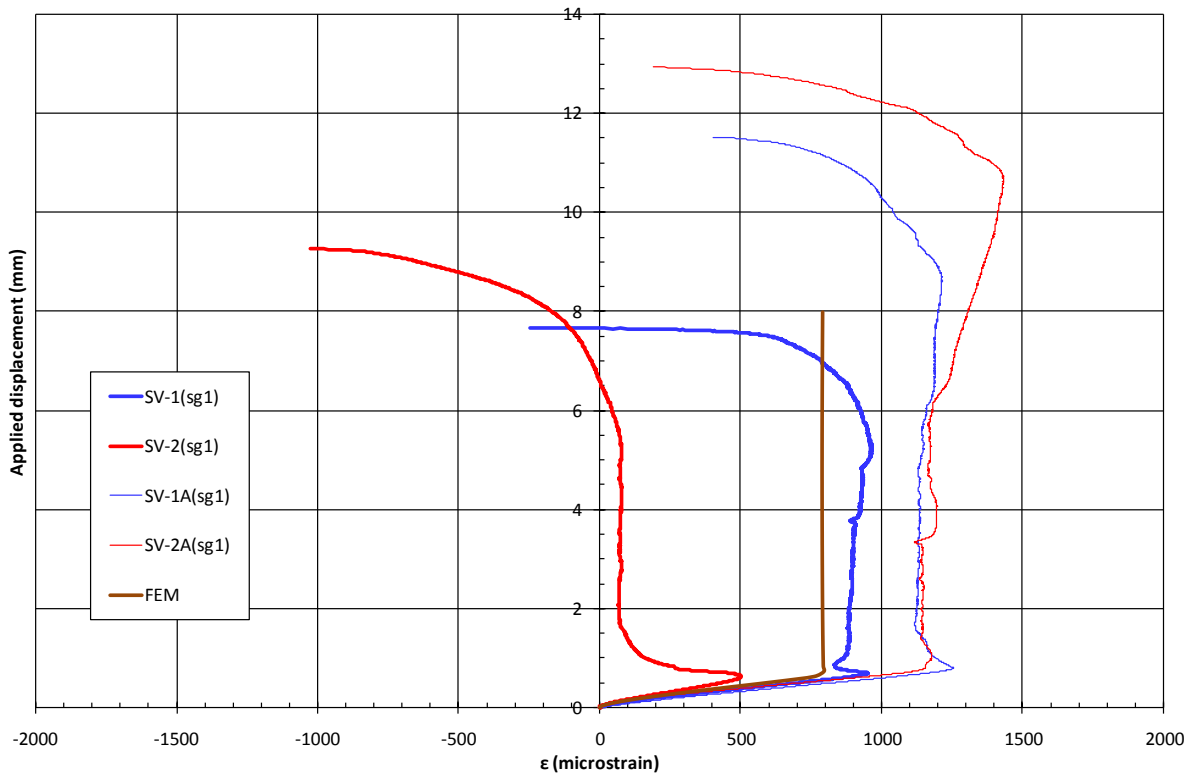


Σχήμα 5.12: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 3 για τα δοκίμια SV-1&2 και SV-1A&2A.

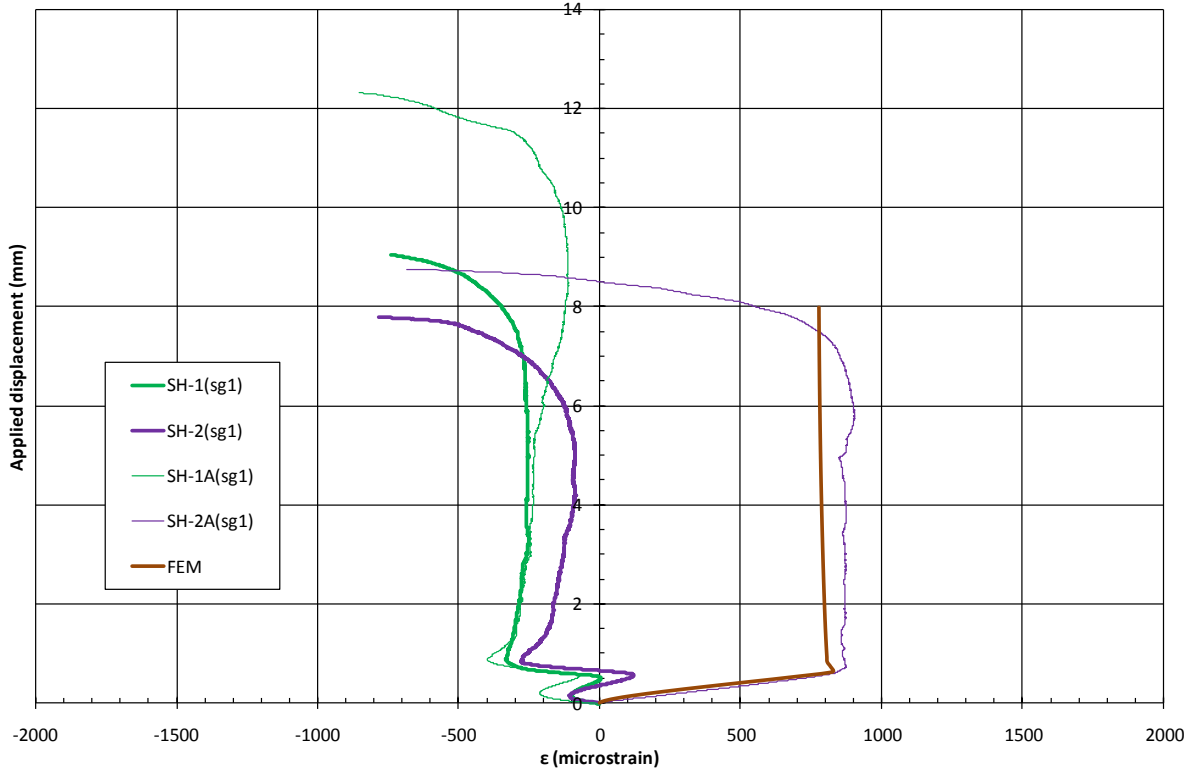


Σχήμα 5.13: Διάγραμμα επιμήκυνσης - παραμόρφωσης στη θέση 3 για τα δοκίμια SH-1&2 και SH-1A&2A.

Στα Σχήματα 5.14 και 5.15 παρουσιάζεται η παραμόρφωση συναρτήσει της επιμήκυνσης στη θέση 1 για τα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο VB και HLU, αντίστοιχα. Στη μοντελοποίηση των δοκιμίων VB, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκλίνουν με τα πειραματικά στην αρχική γραμμική περιοχή πριν τη διαρροή του δοκιμίου. Μετά, η ΜΠΣ μας δείχνει πως η παραμόρφωση παραμένει σταθερή πριν αρχίσει η αποκόλληση του επιθέματος, πράγμα το οποίο συμβαίνει και στις πειραματικές δοκιμές. Όμως η ΜΠΣ δεν εμφανίζει τη μείωση των παραμορφώσεων που λαμβάνει χώρα πριν τη σταθεροποίηση αυτών, όπως επίσης υπάρχει απόκλιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων στην αριθμητική τιμή για την οποία η παραμόρφωση παραμένει σταθερή. Στην περίπτωση των δοκιμίων HLU βλέπουμε πως τα πειραματικά αποτελέσματα διαφέρουν κατά πολύ από τα αριθμητικά, με εξαίρεση το δοκίμιο SH-2A (βλ. εδάφιο 4.3). Αυτό δεν συνέβη γιατί η μοντελοποίηση είναι λανθασμένη. Πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι οι χαλύβδινες πλάκες παρουσίαζαν μία μικρή αλλά παρατηρήσιμη αρχική κάμψη προς τη πλευρά του επιθέματος (τα κοίλα προς την αντίθετη πλευρά από αυτή του επιθέματος). Η κάμψη αυτή σχεδόν εξαλείφθηκε στα δοκίμια VB λόγω της άσκησης εξωτερικής πίεσης κατά τη διαδικασία επίστρωσης του επιθέματος, όμως στα δοκίμια HLU παρέμεινε. Το βέλος κάμψης λοιπόν, που παρουσίασαν τα δοκίμια HLU οφείλεται σε δύο παράγοντες: στην ασύμμετρη διατομή των δοκιμίων και στην αρχική κάμψη των δοκιμίων προς τη μεριά του επιθέματος. Με την επιβολή εφελκυστικού φορτίου στα δοκίμια, καθέναν από τους δύο παράγοντες που προαναφέρθηκαν ευθύνεται για την εμφάνιση δύο βελών



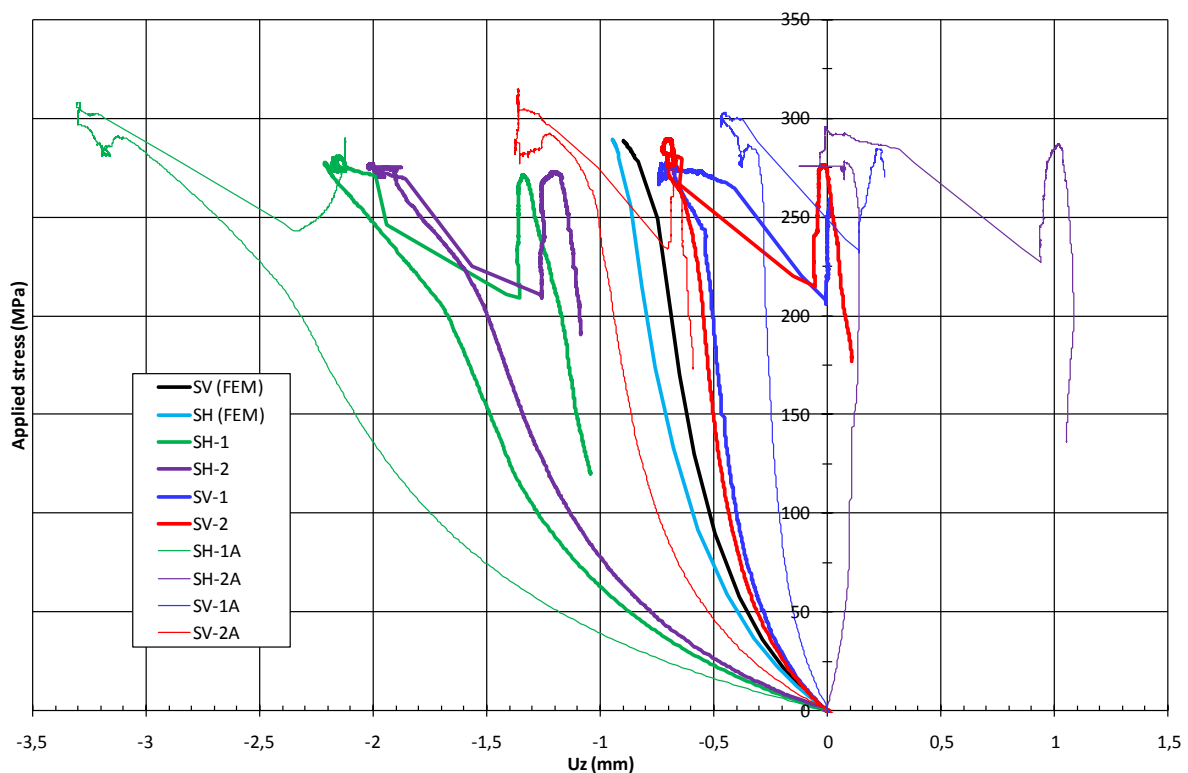
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα επιμήκυνσης – παραμόρφωσης στη θέση 1 για τα δοκίμια SV-1&2 και SV-1A&2A.



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα επιμήκυνσης - παραμόρφωσης στη θέση 1 για τα δοκίμια SH-1&2 και SH-1A&2A.

κάμψης τα οποία είναι ομόρροπα μεταξύ τους (αντίθετα για την περίπτωση του SH-2A). Άρα η διαφορά στο βέλος κάμψης μεταξύ των δοκιμίων που εφαρμόστηκε η μέθοδος HLU και των δοκιμίων που εφαρμόστηκε η μέθοδος VB δεν οφείλεται μόνο στο διαφορετικό πάχος επιθέματος. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται να μας το επιβεβαιώσει και η ΜΠΣ τα αποτελέσματα της οποίας δείχνουν μια διαφορά στο βέλος κάμψης μεταξύ των δύο μεθόδων που οφείλεται αποκλειστικά στο διαφορετικό πάχος επιθέματος (αφού η αρχική κάμψη δεν έχει μοντελοποιηθεί), όχι όμως τόσο μεγάλη όσο δείχνουν τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Σχήμα 5.16).

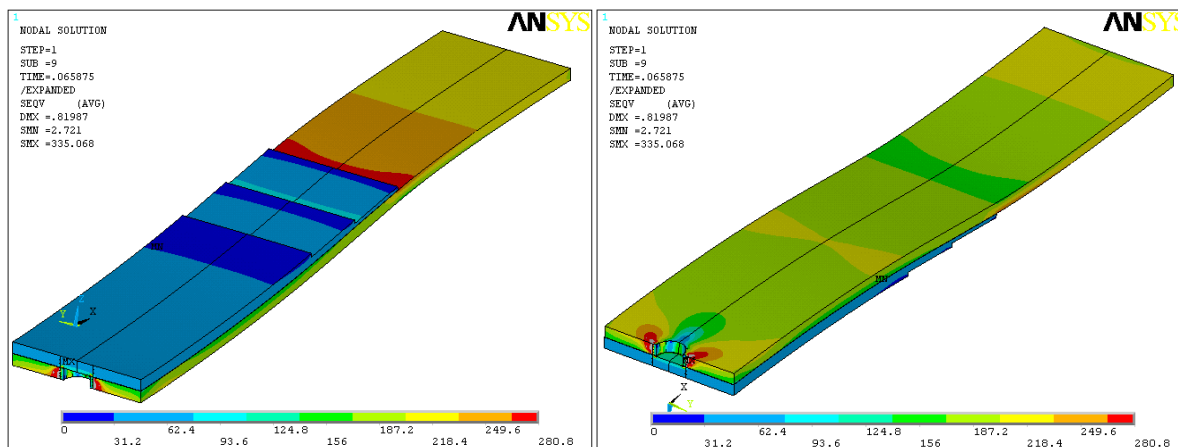
Σαν συμπέρασμα προκύπτει πως η αρχική κάμψη των δοκιμίων HLU και κατ' επέκταση το μεγάλο βέλος κάμψης που προκύπτει, επηρέασε την εξέλιξη των παραμορφώσεων πάνω στο επίθεμα (θέση 1) και γι' αυτό τα αριθμητικά αποτελέσματα διαφέρουν από τα πειραματικά (βλ. Σχήμα 5.15). Μετά τη διαρροή των δοκιμίων HLU όμως, υπάρχει μια ποιοτική προσέγγιση της συμπεριφοράς τους με τη ΜΠΣ ως προς το γεγονός ότι η παραμόρφωση μένει σταθερή. Τέλος, είναι αξιοσημείωτο πως το δοκίμιο SH-2A παρ' όλο που εμφάνισε θετικό όμως πολύ μικρό βέλος κάμψης, η συμπεριφορά του στη θέση 1 μοντελοποιήθηκε με μεγάλη ακρίβεια.



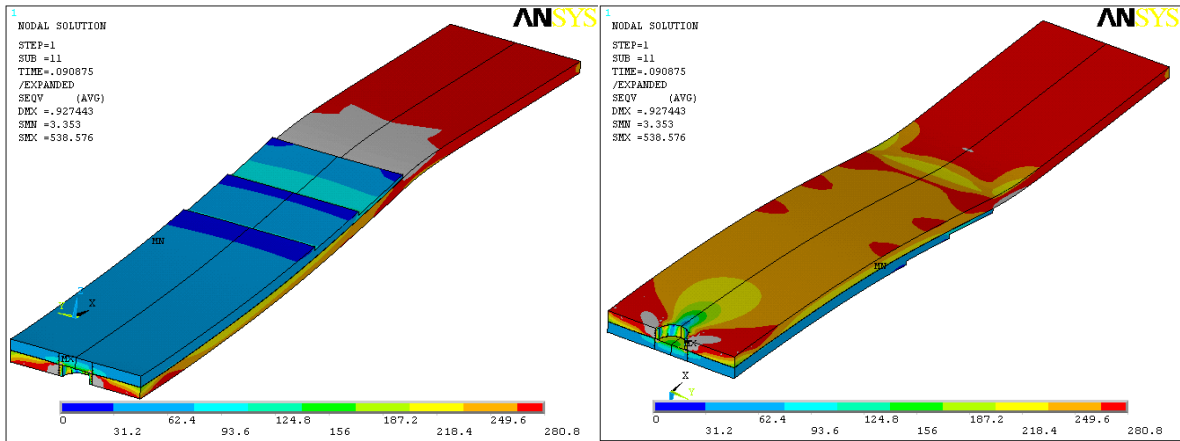
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης για τα δοκίμια με επίθεμα που μοντελοποιήθηκαν.

Στα Σχήματα 5.17 έως 5.20 φαίνεται η κατανομή τάσεων κατά Von Mises στην πάνω και κάτω όψη του μοντέλου που αντιστοιχεί στα δοκίμια που η επίστρωση του επιθέματος έγινε με τη μέθοδο VB, για διάφορες τιμές επιβαλόμενης τάσης. Στα σχήματα αυτά παρουσιάζεται μόνο το μισό δοκίμιο ώστε να φαίνεται το επίπεδο της ρωγμής. Τα δοκίμια

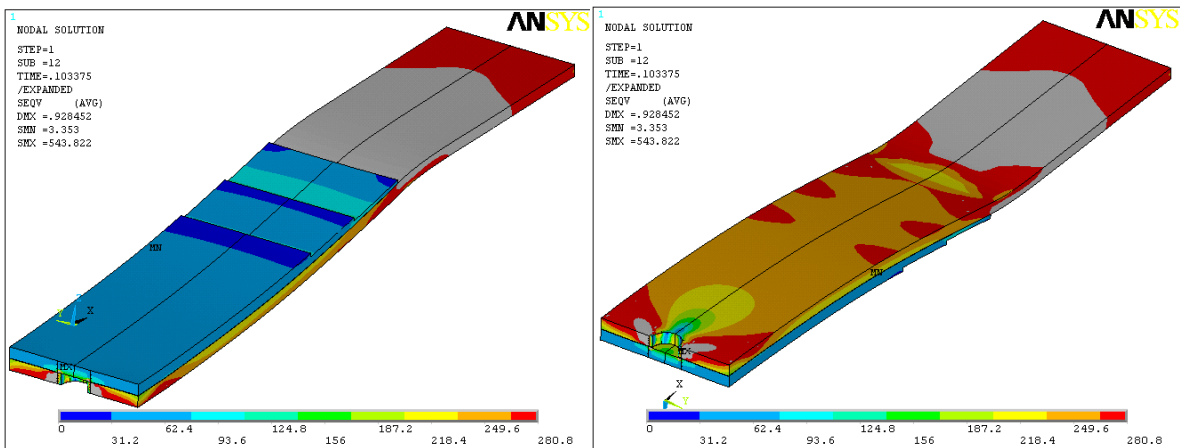
παρουσιάζονται στην παραμορφωμένη κατάσταση ώστε να είναι εμφανές το φαινόμενο της κάμψης. Το γκρι χρώμα υποδηλώνει περιοχές που έχουν εισέλθει στην πλαστική περιοχή (τιμές τάσης κατά Von Mises μεγαλύτερες από 280.8 MPa, που είναι το όριο διαρροής του χάλυβα). Όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι 215 MPa, αρχίζει και διαρρέει πρώτα η περιοχή στο κάτω άκρο της ρωγμής (βλ. Σχήμα 5.17, δεξιά). Καθώς η πλαστική περιοχή κοντά στη ρωγμή εξαπλώνεται, χωρίς όμως να εξαπλωθεί κατά το πάχος σε όλη τη διατομή του δοκιμίου, περνάει στην πλαστικότητα όλο το πλάτος της πάνω πλευράς της επιφάνειας του χάλυβα που βρίσκεται αμέσως μετά το άκρο του επιθέματος, για επιβαλλόμενη τάση 279 MPa (βλ. Σχήμα 5.18, αριστερά). Όταν η τάση γίνει 280.6 MPa, η εξάπλωση της πλαστικής περιοχής κοντά στο άκρο της ρωγμής έχει πλέον σταματήσει και η διαρροή που ξεκίνησε από την πάνω πλευρά της χαλύβδινης πλάκας έχει εξαπλωθεί σε όλο το πάχος της (βλ. Σχήμα 5.19). Άρα από αυτό το σημείο και έπειτα το δοκίμιο έχει εισέλθει στην πλαστική περιοχή (αφού έχει διαρρεύσει όλη η διατομή του χάλυβα). Μετά την είσοδο του δοκιμίου στην πλαστική περιοχή, όσο η επιβαλλόμενη τάση αυξάνεται η κατανομή των τάσεων παραμένει αμετάβλητη στο επίθεμα και στο τμήμα του χάλυβα που καλύπτεται από αυτό και αυξάνεται στο τμήμα του χάλυβα που δεν έχει επικαλυφθεί με επίθεμα. Όταν η τάση γίνει 283 MPa, όλο το ελεύθερο τμήμα της χαλύβδινης πλάκας έχει περάσει στην πλαστική περιοχή (βλ. Σχήμα 5.20). Επίσης, στο Σχήμα 5.17 φαίνεται και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει η κάμψη την κατανομή των τάσεων. Το πάνω μέρος του ελεύθερου τμήματος του χάλυβα φέρει μεγαλύτερα φορτία (κόκκινο και πορτοκαλί χρώμα) εξαιτίας του επιπρόσθετου εφελκυσμού λόγω κάμψης ενώ η κάτω πλευρά λόγω των θλιπτικών φορτίων που δημιουργεί η κάμψη, φορτίζεται λιγότερο (πράσινο και κίτρινο χρώμα). Γι' αυτό και η διαρροή ξεκινάει από την πάνω πλευρά της χαλύβδινης πλάκας.



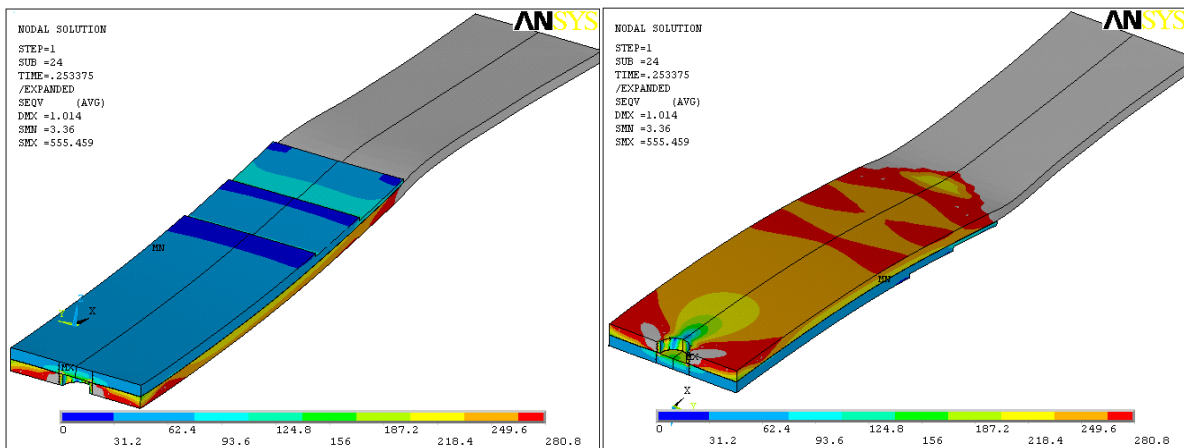
Σχήμα 5.17: Κατανομή τάσης κατά Von Mises για δοκίμια VB (πάνω και κάτω όψη), $\sigma=215$ MPa.



Σχήμα 5.18: Κατανομή τάσης κατά Von Mises για δοκίμια VB (πάνω και κάτω όψη), $\sigma=279$ MPa.



Σχήμα 5.19: Κατανομή τάσης κατά Von Mises για δοκίμια VB (πάνω και κάτω όψη), $\sigma=280.6$ MPa.



Σχήμα 5.20: Κατανομή τάσης κατά Von Mises για δοκίμια VB (πάνω και κάτω όψη), $\sigma=283$ MPa.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η τεχνολογία των σύνθετων επιθεμάτων είναι μια συνεχώς αναπτυσσόμενη επιστήμη, κάτι που οφείλεται στην πληθώρα των πλεονεκτημάτων που διαθέτουν τα σύνθετα υλικά ως μέσο επισκευής, έναντι των παραδοσιακών τεχνικών επισκευών (συγκολλήσεις, κοχλιωτά μεταλλικά επιθέματα). Η επιτυχημένη χρήση τους σε άλλους τομείς όπως η αεροναυπηγική καθιστά αναγκαία την καθιέρωσή τους και στον τομέα των ναυπηγικών επισκευών. Η ευκολία τοποθέτησης των επιθεμάτων, οι αυξημένες μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητές τους, το χαμηλό βάρος, η αντοχή σε διαβρωτικό περιβάλλον και η αντοχή σε θραύση από κόπωση είναι μερικές από τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών, οι οποίες τα καθιστούν ιδανικά για την επισκευή τοπικών αστοχιών στη ναυπηγική.

Όπως αναφέρθηκε όμως στο Κεφάλαιο 1, η ευρεία χρήση της τεχνολογίας εμποδίζεται από τη μη ύπαρξη κανονισμών και σταδίων μεθοδολογίας που μπορούν να ακολουθηθούν για την τυποποίηση των εργασιών, από τη φάση του σχεδιασμού ως την εφαρμογή των επιθεμάτων και την τυποποίηση ποιότητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε περίπτωση να αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστή, κάτι που σημαίνει μελέτη της επισκευής από την αρχή, αυξημένο χρόνο προετοιμασίας και αβέβαια αποτελέσματα. Για να επιτευχθεί η τυποποίηση αυτή θα πρέπει καταρχάς να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου και να εγκριθεί από τους αρμόδιους νηογνώμονες ως μέθοδος επισκευών μόνιμου χαρακτήρα.

Ενώ υπάρχει πληθώρα μελετών για τη συμπεριφορά των σύνθετων επιθεμάτων που αφορούν το αντικείμενο άλλων επιστημών, δεν έχουν γίνει πολλές μελέτες για την χρήση των σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική. Σε αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε η παρούσα διπλωματική, 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 πλοίο και να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητά του ως μέσο επισκευής.

Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν, πειραματικές δοκιμές που αφορούσαν κεντρικά ρωγματομένα δοκίμια, επισκευασμένα με σύνθετο επίθεμα, τα οποία καταπονήθηκαν σε εφελκυσμό. Το υλικό από το οποίο ήταν κατασκευασμένα τα δοκίμια ήταν ο κοινός ναυπηγικός χάλυβας, ενώ για το σύνθετο επίθεμα επιλέχτηκε το CFRP (ίνες άνθρακα με εποξική ρητίνη), καθώς όπως προέκυψε από τη βιβλιογραφία είναι το πιο διαδεδομένο σύνθετο υλικό στον τομέα των ναυπηγικών επισκευών. Η ενίσχυση των δοκιμίων ήταν μονόπλευρη, όπως πολλές φορές συμβαίνει στις ναυπηγικές επισκευές λόγω αδυναμίας πρόσβασης και στις δύο πλευρές του προς επισκευή ελάσματος. Παράλληλα, μελετήθηκε η επίδραση του έντονα διαβρωτικού θαλάσσιου περιβάλλοντος στην αντοχή των σύνθετων επιθεμάτων, τοποθετώντας τα ενισχυμένα δοκίμια σε θάλαμο αλατονέφωσης.

Οι πειραματικές δοκιμές μοντελοποιήθηκαν με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, με τη χρήση του προγράμματος ANSYS, ώστε να διερευνηθεί εάν τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα πειραματικά, ώστε να αποτελέσει μια αξιόπιστη μέθοδο για την πρόβλεψη της μηχανικής αντοχής των δοκιμίων, με ή χωρίς την παράλληλη τέλεση πειραματικών δοκιμών.

Η αποτίμηση λοιπόν, τόσο των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών, όσο και των αντίστοιχων της μοντελοποίησης γίνεται ακολούθως.

6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Σε γενικές γραμμές οι πειραματικές δοκιμές μας έδειξαν πως ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης δεν επηρέασε καθόλου τη συμπεριφορά των δοκιμίων, ενώ η μέθοδος επίστρωσης του επιθέματος επηρέασε τα πειραματικά αποτελέσματα μόνο επειδή διαφορετική μέθοδος σημαίνει και διαφορετικό πάχος επιθέματος (άρα διαφορετικό βέλος κάμψης). Η προετοιμασία της επιφάνειας με αεροματσάκονο οδήγησε σε καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τη μέθοδο προετοιμασίας της επιφάνειας με αμμοβολή. Ειδικότερα, τα συμπεράσματα των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι τα παρακάτω:

- Η αύξηση της αξονικής ακαμψίας των δοκιμίων με επίθεμα ήταν αμελητέα συγκριτικά με την ακαμψία των δοκιμίων αναφοράς.
- Η ύπαρξη του επιθέματος οδηγεί σε αύξηση του φορτίου διαρροής κατά 30% περίπου σε σχέση με το φορτίο διαρροής των δοκιμίων αναφοράς. Ειδικότερα στα δοκίμια των οποίων η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο, η αύξηση αυτή ήταν κατά τι μεγαλύτερη.
- Ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης και η μέθοδος επίστρωσης του επιθέματος δεν επηρεάζουν την αύξηση της ελαστικής περιοχής, όπως επίσης δεν επηρεάζεται από αυτούς τους παράγοντες η τιμή της τάσης αποκόλλησης του επιθέματος καθώς και η αντίστοιχη επιμήκυνση του δοκιμίου κατά την οποία αποκολλάται το επίθεμα.
- Η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας με αεροματσάκονο προσφέρει υψηλότερη τάση αποκόλλησης του επιθέματος και υψηλότερη επιμήκυνση αποκόλλησης συγκριτικά με τη μέθοδο προετοιμασίας επιφάνειας με αμμοβολή.
- Από τις μετρήσεις που πήραμε από τα strain gauges παρατηρήθηκε πως η παραμονή στο θάλαμο αλατονέφωσης δεν επηρεάζει με κάποιο τρόπο τον μηχανισμό ανάπτυξης των παραμορφώσεων στα δοκίμια.
- Η μονόπλευρη ενίσχυση των δοκιμίων με επίθεμα οδήγησε στο φαινόμενο της κάμψης των δοκιμίων λόγω ασύμμετρης διατομής. Το γεγονός αυτό έπαιξε καθοριστικό ρόλο ως προς τον τρόπο ανάπτυξης των τάσεων στα δοκίμια.
- Διαπιστώθηκε κατά την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων πως η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας επηρεάζει το μηχανισμό ανάπτυξης των παραμορφώσεων στα δοκίμια. Η ύπαρξη του επιθέματος ανακουφίζει την περιοχή κοντά στη ρωγμή και μεταφέρει την περιοχή υψηλής συγκέντρωσης τάσεων μακριά από αυτή. Στα δοκίμια των οποίων η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αμμοβολή παρατηρήθηκε πως η

διαρροή του δοκιμίου ξεκίνησε κοντά στη θέση 2, ενώ στα δοκίμια που η προετοιμασία της επιφάνειας έγινε με αεροματσάκονο οι μετρήσεις των παραμορφώσεων δεν υποδεικνύαν κάτι τέτοιο, επιτρέποντάς μας να συμπαιράνουμε πως η διαρροή του δοκιμίου ξεκινάει σε άλλο σημείο. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως η συμπεριφορά των δοκιμίων διαφέρει ανάλογα με τη μέθοδο προετοιμασίας της επιφάνειας.

- Επίσης, αναλύοντας τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων στη θέση 3 προκύπτει πως η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας με αεροματσάκονο επιβαρύνει λιγότερο την περιοχή γύρω από τη ρωγμή σε σχέση με τη μέθοδο προετοιμασίας με αμμοβολή.
- Το μέγεθος του βέλους κάμψης το οποίο εξαρτάται από το πάχος επιθέματος (άρα και από τη μέθοδο επίστρωσης), επηρεάζει τον τρόπο ανάπτυξης των παραμορφώσεων στο επίθεμα (θέση 1).
- Το γεγονός ότι το βέλος κάμψης έχει μικρότερη τιμή στα δοκίμια VB συνεπάγεται πως η περιοχή κοντά στη ρωγμή φορτίζεται λιγότερο απ' ό,τι στα δοκίμια HLU, λόγω του ότι οι εφελκυστικές τάσεις που οφείλονται στην κάμψη είναι μικρότερες.

6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η συνδυασμένη μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία παρήγαγε ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

- Η μοντελοποίηση έδωσε ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά την ελαστική περιοχή του χάλυβα. Το ίδιο ίσχυσε και στα αριθμητικά αποτελέσματα που αντιστοιχούσαν στις θέσεις που τοποθετήθηκαν strain gauges για τη μέτρηση των παραμορφώσεων.
- Η ΜΠΣ έδωσε μια καλή ποιοτική προσέγγιση της αναπτυσσόμενης ομοιόμορφης τάσης στο χάλυβα συναρτήσει της επιβαλλόμενης επιμήκυνσης στην πλαστική περιοχή, για όσο δεν υπάρχει έστω και μερική αστοχία υλικού.
- Τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις παραμορφώσεις στις θέσεις 2 και 3 μας υποδηλώνουν πως ο τρόπος εξέλιξης των παραμορφώσεων στην πλαστική περιοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο προετοιμασίας της επιφάνειας.
- Η ΜΠΣ μας έδειξε ότι το δοκίμιο διαρρέει μακριά από τη ρωγμή στην ακάλυπτη από επίθεμα περιοχή του χάλυβα. Όμως επειδή όπως ήδη συμπαιράναμε η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας επηρεάζει τη συμπεριφορά των δοκιμίων και αυτή δε μοντελοποιήθηκε, δε μπορούμε να εξάγουμε συμπέρασμα για το ακριβές σημείο εκκίνησης της διαρροής.
- Τέλος, κρίνεται αναγκαίος ο χαρακτηρισμός του χάλυβα σύμφωνα με κάποιο πρότυπο διεθνή κανονισμό καθότι το μέτρο ελαστικότητας του Young που προέκυψε βάσει της ΜΠΣ διέφερε από αυτό της πειραματικής μέτρησης. Η απόκλιση που υπήρχε δε μπορούσε να οφείλεται σε λάθος της μοντελοποίησης παρά μόνο σε εσφαλμένη διαδικασία χαρακτηρισμού του χάλυβα η οποία δεν ακολουθούσε κάποιο πρότυπο κανονισμό.

6.4 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 εφελκυσμού σε δοκίμια, όπου ως κύρια παράμετρος θα είναι η μέθοδος προετοιμασίας της επιφάνειας. Όπως είδαμε η χρήση του αεροματσάκονου αλλάζει το μηχανισμό ανάπτυξης των παραμορφώσεων στα δοκίμια, συγκριτικά με την εφαρμογή της μεθόδου αμμοβολής. Μελλοντικά πειράματα με σκοπό την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων και με τη βοήθεια περισσότερων strain gauges τα οποία θα καταγράφουν τις παραμορφώσεις καθ' όλο το μήκος του δοκιμίου, θα ήταν χρήσιμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Μία επιπλέον παράμετρος για μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει το κολλητικό μέσο. Στην παρούσα μελέτη το ρόλο του κολλητικού μέσου έπαιξε μία αρχική στρώση ρητίνης, για λόγους απλότητας. Η χρησιμοποίηση όμως διαφορετικών κολλητικών μέσων θα μπορούσε να δώσει ενδιαφέροντα αποτελέσματα.
- 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 πολλούς συνδυασμούς και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.
- Στην παρούσα εργασία η ενίσχυση με σύνθετο επίθεμα έγινε μονόπλευρα. Το φαινόμενο της κάμψης που παρουσιάζεται λόγω μονόπλευρης ενίσχυσης δημιουργεί επιπρόσθετες τάσεις στο δοκίμιο επηρεάζοντας τη μηχανική του συμπεριφορά. Προτείνεται η τέλεση αντίστοιχων πειραματικών δοκιμών με αμφίπλευρη ενίσχυση του μετάλλου και σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- Όσον αφορά τη γήρανση των δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης και την επίδραση που είχε στην αποτελεσματικότητα των σύνθετων επιθεμάτων, προτείνεται η επανάληψη παρόμοιων πειραμάτων, με μεγαλύτερο αριθμό δοκιμίων, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.
- Η γήρανση των δοκιμίων θα μπορούσε να γίνει σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, τις οποίες είναι πιθανό να αντιμετωπίσουν τα σύνθετα επιθέματα σε ένα πλοίο. Ενδεικτικά αναφέρεται η γήρανση μέσα σε θαλασσινό νερό, ώστε να προσομοιωθεί η κατάσταση που μπορεί να αντιμετωπίσει μία επισκευή με σύνθετο επίθεμα μέσα σε δεξαμενή έρματος και να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της επισκευής υπο αυτές τις συνθήκες.
- Παράλληλα προτείνεται η μοντελοποίηση των δοκιμών με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων για τα δοκίμια που υπέστησαν γήρανση. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την παράλληλη τοποθέτηση στον κλιματικό θάλαμο δοκιμίων σύνθετων υλικών, μέσω των οποίων θα ήταν δυνατός ο υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των επιθεμάτων μετά τη γήρανση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Ανδριανόπουλος Ν., Κυριαζή Ε., Λιακόπουλος Κ. (1991), *Πειραματική Αντοχή των Υλικών*, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1991.
- Κουλουκούρας Ι. (2008), *Αριθμητική Μοντελοποίηση Ρωγματομένων και Διαβρωμένων Χαλύβδινων Ελασμάτων, Ενισχυμένων με Επίθεμα από Σύνθετα Υλικά*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2008.
- Μυρισιώτης Λ., Τσούβαλης Ν. και Παπάζογλου Β. (2006), *Πειραματική Διερεύνηση της Συμπεριφοράς σε Κόπωση Ρωγματομένων Πλακών Χάλυβα Ενισχυμένων με Επίθεμα 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 Θαλασσιών Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2006.
- 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.

Διεθνής

- ANSYS Release 9.0 Documentation, Chapter 11.2.1, Modeling the Crack Region, 2004.
- Bellenger V., Decelle G., Huet N. (2005), “Ageing of a Carbon Epoxy Composite for Aeronautic Applications”, Ecole National Supérieure des Arts et Métiers LTVP, Paris, France, Composites Part B, **36**, 2005, 189-194.
- Branca F. Oliveira, Guillermo J.C. (2004), “An Analytical–Numerical Framework for the Study of Ageing in Fibre Reinforced Polymer Composites”, Department of Civil Engineering, CEMACOM, Federal University of Rio, Composite Structures, **65**, 2004, 443-457.

- Chateauminos A., Chabert B., Soulier J.P., Vincent L. (1992), “*Hygrothermal Ageing Effects on the Static Fatigue of Glass/Epoxy Composites*”, Universite C. Bernard/ Ecole Centrale de Lyon, France, Composites, Volume **24**, Number **7**, 1992, 547-555.
- 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.
- Colombi P., Poggi C. (2006), “*Strengthening of Tensile Steel Members and Bolted Joints Using Adhesively Bonded CFRP Plates*”, Construction and Building Materials, **20**, 22-33 (2006).
- 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.
- Ergun E., Tasgetiren S., Topsu M. (2010), “*Fatigue and Fracture Analysis of Aluminium Plate With Composite Patches Under the Hygrothermal Effect*”, Composite Structures, 2010, doi: 10.1016/j.compstruct. 2010.03.015.
- Grabovac I (2002), “*Case history: Bonded Composite Reinforcement of Ship Structure*” Maritime Platforms Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Defence Science and Technology Organisation, 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.
- 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 14993:2001, “*Corrosion of Metals and Alloys-Accelerated Testing Involving Cyclic Exposure to Salt Mist, “Dry” and “Wet” Conditions*”, 2001.
- ISO/DIS 1183-1.2:1999, “*Plastics – Methods for Determining the Density of Non-Cellular Plastics*”, 1999.
- ISO 5893:2002, “*Rubber and Plastics Test Equipment-Tensile, Flexural and Compression Types (Constant Rate of Traverse)-Specification*”, 2002.
- Kootsookos A., Mouritz A.P. (2004), “*Seawater Durability of Glass- and Carbon-Polymer Composites*”, Composites Science and Technology, **64**, 2004, 1503-1511.

- 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.
- Lee W.Y., Lee J.J. (2004), “*Successive 3D FE Analysis Technique for Characterization of Fatigue Crack Growth Behavior in Composite-Repaired Aluminium Plate*”, *Composite Structures*, **66**, 2004, 513-520.
- Maurin R., Perrot Y., Bourmaud A., Davies P., Baley C. (2009), “*Seawater Ageing of Low Styrene Emission Resins for Marine Composites: Mechanical Behaviour and Nano-Indentation Studies*”, *Composites Part A*, **40**, 2009, 1024-1032.
- 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.
- Megueni A., Tounsi A., Bachir Bouiadjra B., Serier B. (2003), “*The Effect of a Bonded Hygrothermal Aged Composite Patch on the Stress Intensity Factor for Repairing Cracked Metallic Structures*”, *Composite Structures*, **62**, 2003, 171-176.
- Megueni A., Tounsi A., Adda Bedia E. (2007), “*Evolution of the Stress Intensity Factor for Patched Crack with Bonded Hygrothermal Aged Composite Repair*”, *Materials and Design*, **28**, 2007, 287-293.
- Okafor A.C., Bhogapurapu H. (2006), “*Design and Analysis of Adhesively Bonded Thick Composite Patch Repair of Cracks on 2024 T3 Clad Aluminum Aging Aircraft Structures*”, *Composites Structures* 76 (2006), 138-150.
- 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.
- 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.S. (2007), “*Experimental Investigation of the Static Behaviour of a Hole Drilled Steel Plate Reinforced with a Composite Patch*”, *13th International Conference on Experimental Mechanics*, Alexandroupolis, July 2007.
- 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.
- Vauthier E., Abry J.C., Bailliez T., Chateauminois A. (1998), “*Interactions Between Hygrothermal Ageing and Fatigue Damage in Unidirectional Glass/Epoxy Composites*”, *Composites Science and Technology*, **58**, 1998, 687-692.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕ ANSYS

(Παράδειγμα μη γραμμικής ανάλυσης για δοκίμιο με σύνθετο επίθεμα VB)

```
/CONFIG,NPROC,2  
/FILENAME,SV non-linear
```

!Properties & Constant & Variant Numbers

```
*SET,ex1,184000           !Steel's Properties  
*SET,prxy1,0.30  
*SET,yield,280.8
```

```
*SET,ex2,63008           !Patch Properties  
*SET,ey2,63008  
*SET,ez2,5000  
*SET,prxy2,0.3  
*SET,pryz2,0.02  
*SET,prxz2,0.3  
*SET,gxy2,2400  
*SET,gyz2,1600  
*SET,gxz2,2400
```

```
*SET,ex3,4500           !Adhesive Properties  
*SET,prxy3,0.25
```

```
*set,x1,0  
*set,x3,2.5  
*set,x4,5.25           ! hole radius  
*set,x11,20  
*set,x12,30  
*set,x6,100           ! half length of 3rd patch layer  
*set,x7,125           ! half length of 2nd patch layer  
*set,x8,150           ! half length of 1st patch layer  
*set,x9,200           ! strain gauge  
*set,x10,250          ! half length of steel  
*set,y1,0  
*set,y5,6.5           ! crack length  
*set,y7,16.09        ! strain gage  
*set,y8,25.09        ! half width
```

```
*set,y2,x3  
*set,y3,x4
```

```

*set,x2,y5/8
*set,y6,y5+x2
*set,y4,y5-x2
*set,x5,y4

*SET,NES,4           ! Number of elements through Steel thickness
*SET,NEA,1           ! Number of elements through Adhesive thickness
*SET,NEP,1           ! Number of elements through Patch thickness
*sET,THKS,4.18       ! Thickness of Steel
*sET,THKA,0.1        ! Thickness of Adhesive
*SET,THKP,4.06       ! Thickness of Patch
*sET,THKP1,THKP/3    ! Thickness of Patch, 1st Layer
*sET,THKP2,THKP/3    !                               2nd Layer
*sET,THKP3,THKP/3    !                               3rd Layer

/PREP7
ET,1,PLANE82         !Shell Element Type      42 82
ET,2,SOLID95         !Solid Element Type      45 95

MPTEMP,,,,,,,,       !Steel's Properties
MPTEMP,1,0           !Structural.NonLinear.Inelastic.Rate Independent
MPDATA,EX,1,,ex1     !.Isotropic Hardening Plasticity.
MPDATA,PRXY,1,,prxy1 !.Mises Plasticity.BiLinear
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,yield,500,,,

mp,ex,2,ex2          !Patch Properties
mp,ey,2,ey2
mp,ez,2,ez2
mp,prxy,2,prxy2
mp,pryz,2,pryz2
mp,prxz,2,prxz2
mp,gxy,2,gxy2
mp,gyz,2,gyz2
mp,gxz,2,gxz2

mp,ex,3,ex3          !Adhesive Properties
mp,prxy,3,prxy3

k,1,x1,y1            !Keypoints
k,2,x1,y2
k,3,x1,y3
k,4,x1,y4
k,5,x1,y5
k,6,x1,y6
k,7,x1,y7
k,8,x1,y8
k,9,x2,y1

```

k,10,x2,y2
k,11,x2,y4
k,12,x2,y6
k,13,x2,y7
k,14,x2,y8
k,15,x3,y1
k,16,x3,y2
k,17,x4,y1
k,18,x5,y1
k,19,x5,y4
k,20,x5,y6
k,21,x5,y7
k,22,x5,y8
k,23,x6,y1
k,24,x6,y4
k,25,x6,y6
k,26,x6,y7
k,27,x6,y8
k,28,x7,y1
k,29,x7,y4
k,30,x7,y6
k,31,x7,y7
k,32,x7,y8
k,33,x8,y1
k,34,x8,y4
k,35,x8,y6
k,36,x8,y7
k,37,x8,y8
k,38,x9,y1
k,39,x9,y4
k,40,x9,y6
k,41,x9,y7
k,42,x9,y8
k,43,x10,y1
k,44,x10,y4
k,45,x10,y6
k,46,x10,y7
k,47,x10,y8
k,48,x11,y1
k,49,x11,y4
k,50,x11,y6
k,51,x11,y7
k,52,x11,y8
k,53,x12,y1
k,54,x12,y4
k,55,x12,y6
k,56,x12,y7
k,57,x12,y8

circle,1,x4,,,90,2

!Creating the quarter of the hole(r=5.25mm)

NUMMRG,KP, , , ,LOW

LSTR,10,11

!Create line

LPTN,2,3

!Line partition

a,1,2,10,9

!Create the areas

a,2,3,58,10

a,3,4,11,58

a,4,5,6,12,11

a,6,7,13,12

a,7,8,14,13

a,9,10,16,15

a,10,58,59,16

a,58,11,19,59

a,11,12,20,19

a,12,13,21,20

a,13,14,22,21

a,15,16,59,17

a,59,19,18,17

a,19,49,48,18

a,19,20,50,49

a,20,21,51,50

a,21,22,52,51

a,48,49,54,53

a,49,50,55,54

a,50,51,56,55

a,51,52,57,56

a,53,54,24,23

a,54,55,25,24

a,55,56,26,25

a,56,57,27,26

a,23,24,29,28

a,24,25,30,29

a,25,26,31,30

a,26,27,32,31

a,28,29,34,33

a,29,30,35,34

a,30,31,36,35

a,31,32,37,36

a,33,34,39,38

a,34,35,40,39

a,35,36,41,40

a,36,37,42,41

a,38,39,44,43
a,39,40,45,44
a,40,41,46,45
a,41,42,47,46

*set,z1,14
*set,z2,4
*set,z3,10
*set,z4,8
*set,z5,4
*set,z6,4
*set,z7,14
*set,z8,14
*set,z9,12
*set,z10,6
*set,z11,26
*set,z12,8
*set,z13,8
*set,z14,12
*set,z15,12
*set,z16,4
*set,z17,1
*set,z18,6
*set,z19,6

!Just some parameters

lesize,1,,z1
lesize,2,,z1
lesize,3,,z2
lesize,4,,z2
lesize,5,,z4
lesize,6,,z5
lesize,7,,z3
lesize,8,,z1
lesize,9,,z2
lesize,10,,z4
lesize,11,,z5
lesize,12,,z2
!lesize,13,,8
!lesize,14,,8
lesize,15,,z2
lesize,16,,z6
lesize,17,,z7
lesize,18,,z2
lesize,19,,z7
lesize,20,,z8
lesize,21,,z2
lesize,22,,z8
lesize,23,,z3

!Meshing Size the Lines

lesize,24,,z1
lesize,25,,z3
lesize,26,,z4
lesize,27,,z3
lesize,28,,z5
lesize,29,,z3
lesize,30,,z6
lesize,31,,z3
lesize,32,,z7
lesize,33,,z3
lesize,34,,z8
lesize,35,,z4
lesize,36,,z1
lesize,37,,z5
lesize,38,,z9
lesize,39,,z1
lesize,40,,z9
lesize,41,,z9
lesize,42,,z6
lesize,43,,z9
lesize,44,,z7
lesize,45,,z9
lesize,46,,z8
lesize,47,,z10
lesize,48,,z16
lesize,49,,z10
lesize,50,,z10
lesize,51,,z17
lesize,52,,z10
lesize,53,,z18
lesize,54,,z10
lesize,55,,z19
lesize,56,,z11
lesize,57,,z16
lesize,58,,z11
lesize,59,,z11
lesize,60,,z17
lesize,61,,z11
lesize,62,,z18
lesize,63,,z11
lesize,64,,z19
lesize,65,,z12
lesize,66,,z16
lesize,67,,z12
lesize,68,,z12
lesize,69,,z17
lesize,70,,z12
lesize,71,,z18
lesize,72,,z12
lesize,73,,z19

lesize,74,,z13
lesize,75,,z16
lesize,76,,z13
lesize,77,,z13
lesize,78,,z17
lesize,79,,z13
lesize,80,,z18
lesize,81,,z13
lesize,82,,z19
lesize,83,,z14
lesize,84,,z16
lesize,85,,z14
lesize,86,,z14
lesize,87,,z17
lesize,88,,z14
lesize,89,,z18
lesize,90,,z14
lesize,91,,z19
lesize,92,,z15
lesize,93,,z16
lesize,94,,z15
lesize,95,,z15
lesize,96,,z17
lesize,97,,z15
lesize,98,,z18
lesize,99,,z15
lesize,100,,z19

AGEN,2,1,34,1,0,0,THKA,0,0,0 !*Copying the overall patch area*

ADELE,1 !*Deleting the hole area*
ADELE,2
ADELE,7
ADELE,8
ADELE,13

KSCON,5,y5/32,1,8,1, !*Create the Crack Tip mesh*
KSCON,68,y5/32,1,8,1, !*Create the Crack Tip mesh*

AMESH,ALL !*Meshing the areas*

TYPE, 2 !*Creating the Volume of Steel*
EXTOPT,ESIZE,NES,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0

MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0

VOFFST,3,THKS, ,
VOFFST,4,THKS, ,
VOFFST,5,THKS, ,
VOFFST,6,THKS, ,
VOFFST,9,THKS, ,
VOFFST,10,THKS, ,
VOFFST,11,THKS, ,
VOFFST,12,THKS, ,
VOFFST,14,THKS, ,
VOFFST,15,THKS, ,
VOFFST,16,THKS, ,
VOFFST,17,THKS, ,
VOFFST,18,THKS, ,
VOFFST,19,THKS, ,
VOFFST,20,THKS, ,
VOFFST,21,THKS, ,
VOFFST,22,THKS, ,
VOFFST,23,THKS, ,
VOFFST,24,THKS, ,
VOFFST,25,THKS, ,
VOFFST,26,THKS, ,
VOFFST,27,THKS, ,
VOFFST,28,THKS, ,
VOFFST,29,THKS, ,
VOFFST,30,THKS, ,
VOFFST,31,THKS, ,
VOFFST,32,THKS, ,
VOFFST,33,THKS, ,
VOFFST,34,THKS, ,
VOFFST,35,THKS, ,
VOFFST,36,THKS, ,
VOFFST,37,THKS, ,
VOFFST,38,THKS, ,
VOFFST,39,THKS, ,
VOFFST,40,THKS, ,
VOFFST,41,THKS, ,
VOFFST,42,THKS, ,

TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,NEA,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,3
REAL,_Z4
ESYS,0

!Creating the Volume of Adhesive

VOFFST,3,-THKA, ,
VOFFST,4,-THKA, ,
VOFFST,5,-THKA, ,
VOFFST,6,-THKA, ,
VOFFST,9,-THKA, ,
VOFFST,10,-THKA, ,
VOFFST,11,-THKA, ,
VOFFST,12,-THKA, ,
VOFFST,14,-THKA, ,
VOFFST,15,-THKA, ,
VOFFST,16,-THKA, ,
VOFFST,17,-THKA, ,
VOFFST,18,-THKA, ,
VOFFST,19,-THKA, ,
VOFFST,20,-THKA, ,
VOFFST,21,-THKA, ,
VOFFST,22,-THKA, ,
VOFFST,23,-THKA, ,
VOFFST,24,-THKA, ,
VOFFST,25,-THKA, ,
VOFFST,26,-THKA, ,
VOFFST,27,-THKA, ,
VOFFST,28,-THKA, ,
VOFFST,29,-THKA, ,
VOFFST,30,-THKA, ,
VOFFST,31,-THKA, ,
VOFFST,32,-THKA, ,
VOFFST,33,-THKA, ,
VOFFST,34,-THKA, ,

TYPE, 2
EXTOPT,ESIZE,NEP,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,2
REAL,_Z4
ESYS,0

!Creating the Volume of Patch

VOFFST,43,-THKP1, ,
VOFFST,44,-THKP1, ,
VOFFST,45,-THKP1, ,
VOFFST,46,-THKP1, ,
VOFFST,47,-THKP1, ,
VOFFST,48,-THKP1, ,
VOFFST,49,-THKP1, ,
VOFFST,50,-THKP1, ,
VOFFST,51,-THKP1, ,
VOFFST,52,-THKP1, ,

!1st Layer of Patch

VOFFST,53,-THKP1, ,
VOFFST,54,-THKP1, ,
VOFFST,55,-THKP1, ,
VOFFST,56,-THKP1, ,
VOFFST,57,-THKP1, ,
VOFFST,58,-THKP1, ,
VOFFST,59,-THKP1, ,
VOFFST,60,-THKP1, ,
VOFFST,61,-THKP1, ,
VOFFST,62,-THKP1, ,
VOFFST,63,-THKP1, ,
VOFFST,64,-THKP1, ,
VOFFST,65,-THKP1, ,
VOFFST,66,-THKP1, ,
VOFFST,67,-THKP1, ,
VOFFST,68,-THKP1, ,
VOFFST,69,-THKP1, ,
VOFFST,70,-THKP1, ,
VOFFST,71,-THKP1, ,
VOFFST,72,-THKP1, ,
VOFFST,73,-THKP1, ,
VOFFST,74,-THKP1, ,
VOFFST,75,-THKP1, ,
VOFFST,76,-THKP1, ,

VOFFST,404,-THKP2, ,
VOFFST,409,-THKP2, ,
VOFFST,414,-THKP2, ,
VOFFST,419,-THKP2, ,
VOFFST,425,-THKP2, ,
VOFFST,430,-THKP2, ,
VOFFST,435,-THKP2, ,
VOFFST,440,-THKP2, ,
VOFFST,445,-THKP2, ,
VOFFST,450,-THKP2, ,
VOFFST,455,-THKP2, ,
VOFFST,460,-THKP2, ,
VOFFST,465,-THKP2, ,
VOFFST,470,-THKP2, ,
VOFFST,475,-THKP2, ,
VOFFST,480,-THKP2, ,
VOFFST,485,-THKP2, ,
VOFFST,490,-THKP2, ,
VOFFST,495,-THKP2, ,
VOFFST,500,-THKP2, ,
VOFFST,505,-THKP2, ,
VOFFST,510,-THKP2, ,
VOFFST,515,-THKP2, ,

!2nd Layer of Patch

VOFFST,520,-THKP2, ,
VOFFST,525,-THKP2, ,
VOFFST,530,-THKP2, ,
VOFFST,535,-THKP2, ,
VOFFST,540,-THKP2, ,
VOFFST,545,-THKP2, ,
VOFFST,550,-THKP2, ,

VOFFST,575,-THKP3, ,
VOFFST,580,-THKP3, ,
VOFFST,585,-THKP3, ,
VOFFST,590,-THKP3, ,
VOFFST,596,-THKP3, ,
VOFFST,601,-THKP3, ,
VOFFST,606,-THKP3, ,
VOFFST,611,-THKP3, ,
VOFFST,616,-THKP3, ,
VOFFST,621,-THKP3, ,
VOFFST,626,-THKP3, ,
VOFFST,631,-THKP3, ,
VOFFST,636,-THKP3, ,
VOFFST,641,-THKP3, ,
VOFFST,646,-THKP3, ,
VOFFST,651,-THKP3, ,
VOFFST,656,-THKP3, ,
VOFFST,661,-THKP3, ,
VOFFST,666,-THKP3, ,
VOFFST,671,-THKP3, ,
VOFFST,676,-THKP3, ,
VOFFST,681,-THKP3, ,
VOFFST,686,-THKP3, ,
VOFFST,691,-THKP3, ,
VOFFST,696,-THKP3, ,
VOFFST,701,-THKP3, ,

!3rd Layer of Patch

NUMMRG,all

DA,89,SYMM
DA,275,SYMM
DA,431,SYMM
DA,602,SYMM
DA,753,SYMM
DA,84,SYMM
DA,270,SYMM
DA,426,SYMM
DA,597,SYMM
DA,748,SYMM

!Apply Symmetry to Areas

DA,79,SYMM
DA,265,SYMM
DA,421,SYMM
DA,592,SYMM
DA,743,SYMM
DA,420,SYMM
DA,591,SYMM
DA,742,SYMM
DA,415,SYMM
DA,586,SYMM
DA,737,SYMM
DA,410,SYMM
DA,581,SYMM
DA,732,SYMM
DA,405,SYMM
DA,576,SYMM
DA,727,SYMM
DA,408,SYMM
DA,579,SYMM
DA,730,SYMM
DA,439,SYMM
DA,610,SYMM
DA,761,SYMM
DA,469,SYMM
DA,640,SYMM
DA,791,SYMM
DA,302,SYMM
DA,473,SYMM
DA,644,SYMM
DA,795,SYMM
DA,116,SYMM
DA,121,SYMM
DA,307,SYMM
DA,478,SYMM
DA,649,SYMM
DA,800,SYMM
DA,142,SYMM
DA,328,SYMM
DA,499,SYMM
DA,670,SYMM
DA,821,SYMM
DA,162,SYMM
DA,348,SYMM
DA,519,SYMM
DA,690,SYMM
DA,841,SYMM
DA,182,SYMM
DA,368,SYMM
DA,539,SYMM
DA,710,SYMM

DA,202,SYMM
DA,388,SYMM
DA,559,SYMM
DA,222,SYMM
DA,242,SYMM

DA,241,UZ,0
DA,246,UZ,0
DA,251,UZ,0
DA,256,UZ,0

*!Apply Constrain to Areas
!opposite to crack*

DA,241,UX,4
DA,246,UX,4
DA,251,UX,4
DA,256,UX,4

!Apply imposed displacement 8 mm

FINISH

/SOL
ANTYPE,Static
NLGEOM,1
NSUBST,500,500,80
!DELTIM, 1e-2, 1e-3, 1e-2,ON
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
LNSRCH,1
NEQIT,25
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH

!Solution

!Number of substeps