

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Πρώτος εξεταστής: Δρ. Αλέξης Θ. Κερμανίδης,
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Π.Θ.
(Επιβλέπων Καθηγητής)

Δεύτερος εξεταστής: Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης,
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Π.Θ.

Τρίτος εξεταστής: Δρ. Ελένη Καμούτση,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Π.Θ.

Το Παρόν Χειρόγραφο Υποβάλλεται για τη Μερική Εκπλήρωση
των Απαιτήσεων του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού.

Ευχαριστίες

Καταρχάς, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της διατριβής μου, Αλέξη Θ. Κερμανίδη, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας και την ανεκτίμητη καθοδήγησή του καθ' όλη τη συνεργασία μας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Ε. Καμούτση και Ε. Μπουζάκη, για την σχολαστική ανάγνωση του χειρογράφου μου και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους. Επιπλέον, ευχαριστώ όλους όσους πίστεψαν στις ικανότητές μου και με ενθάρρυναν κατά την πορεία. Πάνω απ' όλα, η βαθύτατη εκτίμησή μου απευθύνεται στη μητέρα μου, Αναστασία Φιλίππου, για την απεριόριστη συναισθηματική και υλική της υποστήριξη, και της οποίας η δύναμη του χαρακτήρα της, αποτέλεσε το παράδειγμα για να ακολουθήσω το πάθος μου και να πετύχω όλα όσα έχω καταφέρει από τα νεαρά μου χρόνια.

Φίλιππος Φιλίππου

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε πειραματικά η μηχανική απόδοση και οι μηχανισμοί αστοχίας ψυχρά εμποτισμένων ενθέτων εντός σύνθετων κατασκευών τύπου σάντουιτς, εστιάζοντας στην επίδραση της ακτίνας κόλλησης, διατηρώντας παράλληλα σταθερή ακτίνα ενθέτου και σταθερά χαρακτηριστικά δειγμάτων. Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκαν καταστροφικές δοκιμές για την αξιολόγηση της αντοχής της σύνδεσης και των μηχανισμών αστοχίας των δοκιμίων. Για την καταγραφή της εξέλιξης της βλάβης έλαβε μέρος παρακολούθηση της μεταβολής της δυσκαμψίας, ενώ έγινε χρήση και ακουστικής εκπομπής (ΑΕ). Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η αύξηση της ακτίνας κόλλησης μετέβαλε σημαντικά τους μηχανισμούς αστοχίας και το κρίσιμο φορτίο αστοχίας του συστήματος. Επιπρόσθετα προσδιορίστηκε η βέλτιστη ακτίνα εμποτισμού όπου επετεύχθη μέγιστη δυσκαμψία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	4
1. Εισαγωγή	5
2. Υλικά και Μέθοδοι.....	8
2.1. Κατασκευαστική διαδικασία	8
2.1.1. Σύνθετες δομές σάντουιτς	8
2.1.2. Ένθετα αλουμινίου	11
2.1.3. Προδιαγραφές κόλλας εμποτισμού	11
2.1.4. Συναρμολόγηση	12
2.2. Πειραματική Διαδικασία	13
3. Πειραματικά Αποτελέσματα	16
3.1. Ακτίνες εμποτισμού 8,6 mm και 9,3 mm	16
3.2. Ακτίνα εμποτισμού 10 mm.....	20
3.3. Ακτίνες εμποτισμού 11mm και 12,5mm	23
4. Σύνοψη Αποτελεσμάτων και Συζήτηση	26
5. Συμπεράσματα	30
Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας.....	32
Παράρτημα.....	33
Βιβλιογραφικές Αναφορές	36

1. Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ζήτηση για ελαφριά, υψηλής αντοχής υλικά έχει τοποθετήσει τα σύνθετα υλικά στην αιχμή της έρευνας υλικών σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία υψηλών επιδόσεων, η ναυτιλία και η αιολική ενέργεια [1–4]. Αυτοί οι τομείς δίνουν προτεραιότητα σε υλικά που όχι μόνο προσφέρουν ανώτερη αναλογία αντοχής προς βάρος, αλλά και παρέχουν ευελιξία, αντοχή στη διάβρωση και την ικανότητα αντοχής σε απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σε προηγμένα συστήματα σύνθετων υλικών όπως οι δομές τύπου σάντουιτς, ο κατάλληλος σχεδιασμός συνδεσμολογιών εξωτερικών στοιχείων, όπως βάσεις, βραχίονες και εξαρτήματα, σε κατασκευές από πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Plastic-CFRP) είναι κρίσιμος για την επίτευξη της επιθυμητής τελικής γεωμετρίας και επαρκούς φέρουσας ικανότητας [2,5,6]. Επειδή οι παραδοσιακές τεχνικές μεταλλικής σύνδεσης (π.χ. συγκόλληση, ηλώσεις, τυπικά σπειρώματα σύνδεσης) είναι είτε ανεφάρμοστες είτε επιζήμιες για την ακεραιότητα των επιστρώσεων CFRP, χρησιμοποιούνται δύο εναλλακτικές λύσεις: η ένωση με κόλλα και τα μηχανικά ένθετα. Κάθε προσέγγιση έχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά, προφίλ ανθεκτικότητας και πρακτικές παραμέτρους.

Η άμεση κόλληση επιτρέπει σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή τάσεων στις συγκολλημένες επιφάνειες και αποφεύγει τις συγκεντρώσεις τάσεων των συνδεδεμένων μελών. Μόλις σκληρυνθούν, οι συγκολλητικές ενώσεις σχηματίζουν μια μόνιμη σύνδεση που δεν μπορεί να αποσυναρμολογηθεί χωρίς να καταστραφεί η σύνθετη δομή. Τέτοιες ενώσεις είναι αποδεκτές για εφαρμογές που δεν απαιτούν λύση και επανασύνδεση.

Σε αντίθεση με τις κολλητές συνδέσεις, τα ένθετα παρέχουν μια πιο ευέλικτη λύση που επιτρέπει την αποσυναρμολόγηση και την επανασυναρμολόγηση των προσαρτημένων εξαρτημάτων, όπως πίνακες οργάνων, θύρες επιθεώρησης ή εξαρτήματα που μπορούν να επισκευαστούν, διευκολύνοντας την συντήρηση, αντικατάσταση, επισκευή και επιθεώρηση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής [7,8]. Επιπλέον, καλά σχεδιασμένα συστήματα ένθετων παρέχουν ανώτερη αντοχή σε απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, η έκθεση σε διαβρωτικές χημικές ουσίες και η υγρασία, σε σύγκριση με τις καθαρά κολλητές ενώσεις [9].

Ο ρόλος τους ως φέροντα στοιχεία εντός σύνθετων κατασκευών είναι πρωταρχικής σημασίας για τη συνολική αξιοπιστία και ασφάλεια των συστημάτων, με αποτέλεσμα η αστοχία ενός ενθέματος να έχει αλυσιδωτές επιπτώσεις, οδηγώντας ενδεχομένως σε μερική ή ολική αστοχία των συνδεδεμένων εξαρτημάτων ή ακόμα και ολόκληρου του συστήματος. Η

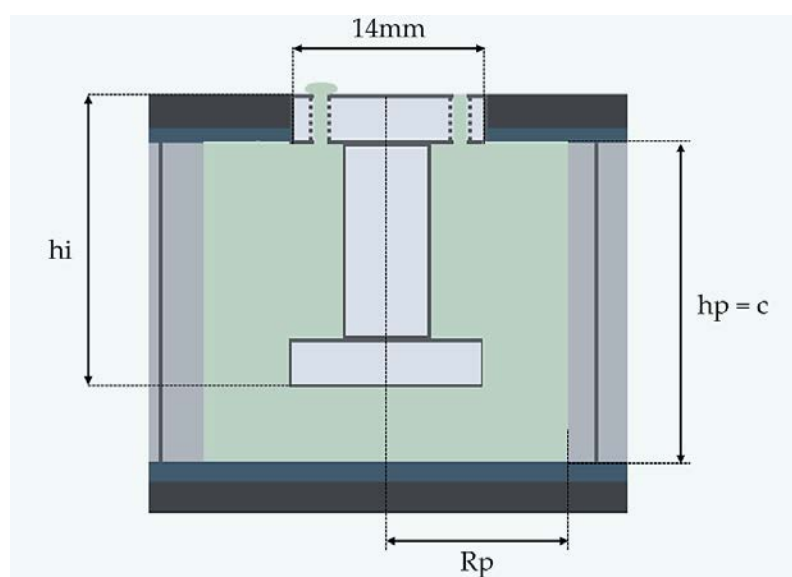
προσομοίωση της μηχανικής απόδοσης των ενθέτων είναι επομένως κρίσιμη και οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης που στοχεύουν στην πρόβλεψη της μηχανικής αντοχής [10] βασίζονται κυρίως σε αριθμητικές ή μαθηματικές μεθόδους για να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά των συνδέσεων και να βελτιστοποιήσουν την τοποθέτηση, μέγεθος και γεωμετρία [6,11,12] καθώς και τον τύπο του υλικού και τα χαρακτηριστικά του πυρήνα [13–16]. Επιπλέον, οι τεχνικές ανάλυσης αξιοπιστίας μπορούν να ποσοτικοποιήσουν την πιθανότητα αστοχίας, αλλά συνήθως απαιτούν εκτεταμένους υπολογιστικούς πόρους λόγω του μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων που απαιτούνται [17].

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας παραμένει η πιο αξιόπιστη μέθοδος για την απόκτηση φερέγγυων αποτελεσμάτων σχετικά με την πρόγνωση αστοχίας των ενθέτων. Τα σύγχρονα μηχανικά συστήματα χρησιμοποιούν τεχνικές πρόγνωσης (PHM) για τη συνεχή παρακολούθηση ενδείξεων αναδυόμενης βλάβης, όπως μικρορωγμές, αποκόλληση και λυγισμό πυρήνα πολύ πριν συμβεί καθολική αστοχία [18,19]. Κρίσιμα για τη μηχανική απόδοση του ενθέτου είναι οι συνδέσεις, ο δομικός σχεδιασμός και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Τα στοιχεία του συστήματος, όπως το ένθετο αλουμινίου, η εποξική κόλλα, ο πυρήνας από κυψελίθρες ή αφρώδες υλικό και τα σύνθετα φύλλα επίστρωσης, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πλήρως ή μερικώς εμποτισμός, ακτίνα κόλλησης, διάμετρος ενθέτου κ.λπ.) αποτελούν αναπόσπαστα μέρη του σχεδιασμού της δομής, ορίζοντας ένα πολυπαραγοντικό σύστημα, όπου μπορεί να εμφανιστούν σύνθετοι τρόποι αστοχίας [20,21]. Προηγούμενες μελέτες έχουν επισημάνει τη σημασία γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως η ακτίνα κόλλησης, στην επίδραση της αντίστασης εφελκυσμού των ενθεμάτων [6,15], αλλά καμία συστηματική έρευνα δεν έχει επικεντρωθεί στην επίδραση της μεταβολής της ακτίνας εμποτισμού καθαυτή, διατηρώντας παράλληλα σταθερή την ακτίνα ενθέτου.

Αυτή η μελέτη διερευνά συγκεκριμένα την επίδραση διαφορετικών ακτίνων κόλλησης στην αντοχή εξόλκευσης των ενθέτων ψυχρού εμποτισμού, μια προσέγγιση που δεν έχει μελετηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία. Σε αντίθεση με τις τυπικές συστάσεις που αναγράφονται σε εγχειρίδια, οι οποίες συχνά προτείνουν σταθερές ακτίνες κόλλησης σε σχέση με τα μεγέθη των ενθέτων, η μελέτη αυτή απομονώνει την ακτίνα εμποτισμού ως ανεξάρτητη μεταβλητή, παρέχοντας νέες πληροφορίες σχετικά με τον ρόλο της στη βελτίωση της μηχανικής απόδοσης των ενθέτων σε δομές σάντουιτς. Η έρευνα διεξάγεται με σταθερή ακτίνα ενθέτου, ομοιόμορφο πάχος σύνθετων στρώσεων και πανομοιότυπη πυκνότητα πυρήνα, δοκίμια σχεδιασμένα σύμφωνα με τις τυπικές προδιαγραφές ακτίνας εμποτισμού, επιλεγμένης ως 9.3 mm [12]. Οι

καταστρεπτικές δοκιμές παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά αστοχίας των ενθεμάτων υπό εξόλκευση, προσφέροντας ένα μέσο για την αξιολόγηση της ικανότητας φόρτισης και των τρόπων αστοχίας τους [5–12,21–23]. Κατά τη διάρκεια των στατικών δοκιμών, εκτελέσθηκαν συνεχείς μετρήσεις μετατόπισης για την παρακολούθηση της υποβάθμισης της ακαμψίας και καταγράφηκαν σήματα ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιώντας σένσορα μικροφώνου. Το τελευταίο παρέχει ένα πρόσθετο επίπεδο διάγνωσης μέσω διακριτών καταγραφών ΑΕ που συσχετίζονται άμεσα με τα σημεία μεταβολής φορτίων στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, επιτρέποντας την ταξινόμηση μηχανισμών αστοχίας σε επίπεδο υποσυστήματος, όπως μικροθραύσεις και συμβάντα αποκόλλησης που συμβαίνουν καθώς το υλικό παραμορφώνεται ή / και αστοχεί.

Αναλύοντας συστηματικά και ταυτόχρονα δεδομένα φορτίου-μετατόπισης και ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) από της καταστροφικές δοκιμές εξέλεξης, αυτή η μελέτη διευκρινίζει την ακολουθία έναρξης και διάδοσης της βλάβης προσδιορίζοντας τα συγκεκριμένα υποσυστήματα που είναι επιρρεπή σε αστοχία εντός συστημάτων ενθέτων ψυχρού εμποτισμού ως συνάρτηση της ακτίνας κόλλησης. Η πειραματική διαδικασία επιτρέπει τον εντοπισμό μηχανισμών αστοχίας, όπως ο λογισμός και η ρήξη του πυρήνα, η απόσχιση και η αποκόλληση [1,24–26], τα οποία είναι κρίσιμα για την κατανόηση των ορίων της απόδοσης του συστήματος και του τρόπου, με τον οποίο αυτή ποικίλλει για κάθε διαφορετική ακτίνα εμποτισμού. Σημειώστε ότι η ακτίνα εμποτισμού (R_p) ορίζεται ως η μέση απόσταση από το κέντρο του ενθέτου έως τα πλησιέστερα μεμονωμένα τοιχώματα κυψελών πυρήνα που περιβάλλουν τη κόλληση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Γεωμετρία εμποτισμού.

Με βάση τα πειραματικά ευρήματα, παράχθηκε ένα σύνολο δεδομένων από τις καταστρεπτικές δοκιμές που κατέγραψε επαναλαμβανόμενα μοτίβα και χαρακτηριστικά που σχετίζονται με συγκεκριμένους τρόπους αστοχίας. Με τον εντοπισμό αυτών των μοτίβων, μπορούν να αναπτυχθούν και να βελτιωθούν προγνωστικά μοντέλα, επιτρέποντας βελτιωμένη ασφάλεια, μειωμένο κόστος συντήρησης και παρατεταμένη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων. Επιπλέον, θα σχολιαστεί και θα εξηγηθεί οποιαδήποτε αλλαγή στη μηχανική απόκριση των συστημάτων. Αυτή η έρευνα συμβάλλει στο αυξανόμενο αποθετήριο γνώσεων στις σύνθετες κατασκευές, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την ανθεκτικότητα και τους μηχανισμούς αστοχίας των ενθέτων ψυχρού εμποτισμού σε κρίσιμες δομικές εφαρμογές.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Κατασκευαστική διαδικασία

Αυτή η ενότητα περιγράφει την κατασκευή της σύνθετης δομής σάντουιτς, την επιλογή και τον σχεδιασμό των ενθέτων αλουμινίου, τα χαρακτηριστικά της εποξικής κόλλας εμποτισμού και τη συνολική διαδικασία συναρμολόγησης.

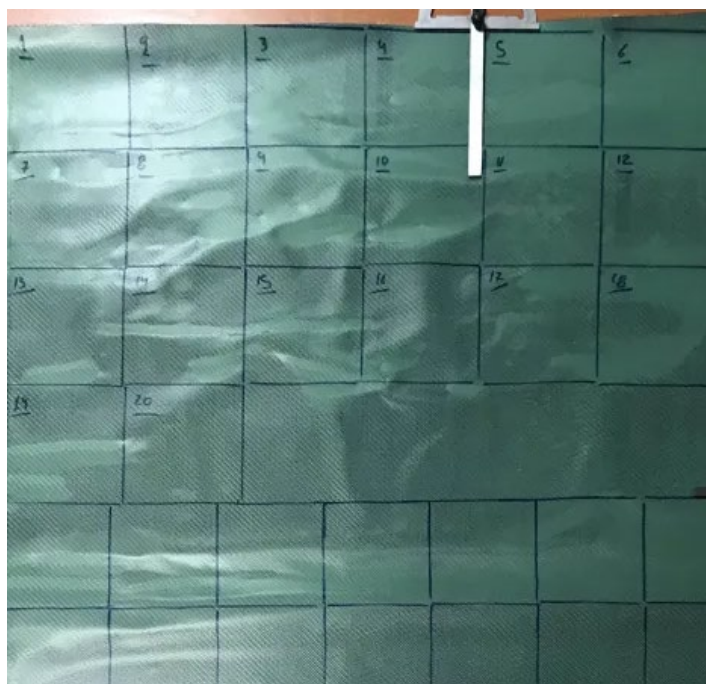
2.1.1. Σύνθετες δομές σάντουιτς:

Στην παρούσα μελέτη, η δομή σάντουιτς κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας έναν διάτρητο πυρήνα κυψελοειδούς δομής αλουμινίου 5052, με μέγεθος κυψέλης 1/8 ίντσας, πάχος τοιχώματος 0,001 ίντσας και ύψος 20 mm, το οποίο επιλέχθηκε λόγω της εξαιρετικής αναλογίας αντοχής προς βάρος και αντοχής σε διάβρωση. Τα φύλλα σύνθετης επίστρωσης κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας ένα ύφασμα από ίνες άνθρακα γενικής χρήσης 2x2 twill προ-εμποτισμένο. Χρησιμοποιήθηκε διαστρωμάτωση με ίνες προσανατολισμένες στις $0^\circ/90^\circ$, $\pm 45^\circ$ και $0^\circ/90^\circ$, κάθε στρώση προ-εμποτισμένου υλικού κόπηκε προσεκτικά στις καθορισμένες διευθύνσεις προσανατολισμού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, με τη γωνιακή απόκλιση να διατηρείται εντός αποδεκτών ορίων ώστε να διασφαλιστεί η αυστηρή τήρηση της προβλεπόμενης ακολουθίας στοίβαξης και να αποφευχθεί η λανθασμένη ευθυγράμμιση του δοκιμίου. Ο επιλεγμένος τρόπος διαστρωμάτωσης αποδίδει ψευδοϊσοτροπική συμπεριφορά στα φύλλα στρώσης, παρέχοντας σχεδόν όμοια δυσκαμψία και αντοχή. Κάθε στρώση είναι κατοπτρισμένη γύρω από το ουδέτερο επίπεδο του φύλλου και ολόκληρη η εξωτερική στρώση βρίσκεται εκατέρωθεν του κεντρικού άξονα του πάνελ. Αυτή η διπλή συμμετρία ελαχιστοποιεί της γεωμετρικές ασυνέχειες και τη στρέβλωση υπό φορτία

εκτός άξονα, αποτρέπει τις συγκεντρώσεις τάσεων και μειώνει τον κίνδυνο αποκόλλησης ή μικρορωγμών. Κατά συνέπεια, το πάνελ σάντουιτς παρουσιάζει ομοιόμορφη μηχανική απόδοση και βελτιωμένη ανοχή σε βλάβη. Ο πυρήνας και τα σύνθετα φύλλα επίστρωση συγκολλήθηκαν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας συγκολλητική μεμβράνη σχεδιασμένη να παρέχει βέλτιστη μεταφορά φορτίων μεταξύ των υλικών. Για τη συναρμολόγηση του πάνελ, όλα τα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένου του πυρήνα αλουμινίου, των επιφανειακών στρώσεων από ανθρακονήματα και της συγκολλητικής μεμβράνης, κόπηκαν εκ των προτέρων περίπου 10% μεγαλύτερα από τις τελικές επιθυμητές διαστάσεις του πάνελ σάντουιτς, λαμβάνοντας υπόψη πιθανά κατασκευαστικά σφάλματα [21,27]. Η προσεκτική ευθυγράμμιση και συναρμολόγηση των ύποεξαρτημάτων ήταν απαραίτητη για να διασφαλιστεί η σωστή ακολουθία διαστρωμάτωσης και προσανατολισμός των ινών, καθώς οι αποκλίσεις θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν τις μηχανικές ιδιότητες της τελικής δομής.



(α)



(β)

Σχήμα 2. (α) Ύφασμα ινών άνθρακα κομμένο στις $\pm 45^\circ$, (β) Ύφασμα ινών άνθρακα κομμένο στις $0/90^\circ$.

Για την υποστήριξη των υπό κατασκευή δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε μια στιβαρή χαλύβδινη πλάκα βάσης ως σταθερή βάση. Αυτή η πλάκα ανυψώθηκε από την επιφάνεια του κλιβάνου για να προωθηθεί η ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας σε όλο τον όγκο του καλουπιού, ελαχιστοποιώντας έτσι την ανομοιομορφία της θερμοκρασίας κατά τη

διάρκεια του θερμικού κύκλου. Πριν από τη περάτωση της διαδικασίας σκλήρυνσης, τα πάνελ καλύφθηκαν με ένα αντικολλητικό φιλμ απελευθέρωσης για να διασφαλιστεί η καθαρή και χωρίς βλάβες αφαίρεση του καλουπιού. Ένα ύφασμα “αναπνοής” τοποθετήθηκε πάνω από την σύνθεση για να διασφαλιστεί η πλήρης αναρρόφηση αέρα από το laminate και να διατηρηθεί η ομοιόμορφη κατανομή πίεσης. Τα δείγματα στη συνέχεια περικλείστηκαν εντός σακούλας κενού αέρος και σφραγίσθηκαν με ταινία στεγανοποίησης. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην αναδίπλωση της σακούλας έτσι ώστε, μόλις εφαρμοζόταν το κενό αέρος, να προσαρμοστεί σφιχτά γύρω από τη γεωμετρία των δειγμάτων, εγγυώντας ομοιόμορφη στερεοποίηση σε όλες τις επιφάνειες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Συναρμολόγηση καλουπιού θερμού κύκλου κενού.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, έγινε κατεργασία σκλήρυνσης των δειγμάτων υπό θερμικό κύκλο με ελεγχόμενη πίεση και θερμικό προφίλ. Το καλούπι διατηρήθηκε σε πίεση περίπου 1 bar, ενώ η θερμοκρασία αυξανόταν σταθερά κατά 5 °C/λεπτό έως ότου φτάσει τους 125 °C. Μόλις επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία, τόσο η θερμότητα όσο και η πίεση διατηρήθηκαν σταθερές για 70 λεπτά για πλήρη διασύνδεση ρητίνης και στερεοποίηση των δοκιμίων. Στη συνέχεια, το καλούπι ψύχθηκε υπό πίεση έως τους 50 °C και έπειτα τα μέρη ξεκαλουπώθηκαν. Το δεδομένο ελεγχόμενο περιβάλλον κενού αέρος - θερμοκρασίας αποτέλεσε κρίσιμο ρόλο στην αποφυγή σχηματισμού εγκλεισμάτων και στην επίτευξη σύνθετων πάνελ σάντουιτς υψηλής ποιότητας.

2.1.2. Ένθετα αλουμινίου:

Το κράμα αλουμινίου 6082 επιλέχθηκε για τις ευνοϊκές κατασκευαστικές του ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της ευκολίας κατεργασίας και της χαμηλής του πυκνότητας, ενώ παράλληλα πληροί τις ογκομετρικές και δομικές απαιτήσεις των ενθέτων. Η διάμετρος του ενθέτου επιλέχθηκε να είναι 14 mm, ενσωματώνοντας ένα τυφλό σπείρωμα συμβατό με κοχλία M4. Επιλέχθηκε ύψος 15 mm για τα ένθετα σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχονται στο εγχειρίδιο της Ευρωπαϊκής Συνεργασίας Πρότυπων Διαστημικών Εφαρμογών (ECSS) [28], η οποία ταξινομεί το δοθέν σύστημα ως πλήρως εμποτισμένο, σύμφωνα με $h_p = c$ και $c \geq h_i \geq c - 7 \text{ mm}$, όπου h_p είναι το ύψος της κόλλησης εμποτισμού, c είναι το ύψος του πυρήνα και h_i είναι το ύψος του ενθέτου. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει μια ασφαλή σύνδεση, επιτρέποντας παράλληλα επαρκή ροή του υλικού κόλλησης γύρω από το ένθετο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η επιλογή συστήματος τύποι ψυχρού εμποτισμού προσφέρει έναν πρακτικό συμβιβασμό μεταξύ της δομικής απόδοσης, της ευελιξίας εγκατάστασης και της αποδοτικότητας βάρους. Σε αντίθεση με τα ένθετα θερμού εμποτισμού, τα οποία ενσωματώνονται και συν-σκληρύνονται μέσα στο σύνθετο πάνελ κατά τη διαδικασία του ψησίματος, τα ένθετα ψυχρού εμποτισμού εγκαθίστανται μετά την κατασκευή του σύνθετου πάνελ. Αυτή η τοποθέτηση έπειτα του “ψησίματος” και σκλήρυνσης του πάνελ, επιτρέπει την τοποθέτηση ενθέτου επιλεγμένου και επιθυμητού βάθους έναντι ενός ενθέτου θερμού εμποτισμού βάθους υποχρεωτικά ίσου με το συνολικό ύψος του πυρήνα, μειώνοντας έτσι σημαντικά βάρος του συστήματος.

Επιπλέον, η θερμική διαστολή των υλικών κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου μπορεί να προκαλέσει ελαφρά μετατόπιση των ενθέτων θερμού εμποτισμού, με αποτέλεσμα τελικές θέσεις που μπορεί να αποκλίνουν από τις προβλεπόμενες. Αυτή η μεταβλητότητα θέσης δύναται να είναι κρίσιμη σε εφαρμογές ακριβείας. Τα ένθετα ψυχρού εμποτισμού, αντιθέτως, τοποθετούνται μετά τη διαδικασία σκλήρυνσης και μπορούν να ευθυγραμμιστούν με ακρίβεια σε προκαθορισμένες συντεταγμένες, διασφαλίζοντας συνεπή τοποθέτηση σε όλα τα δείγματα [23,29].

2.1.3. Προδιαγραφές κόλλας εμποτισμού:

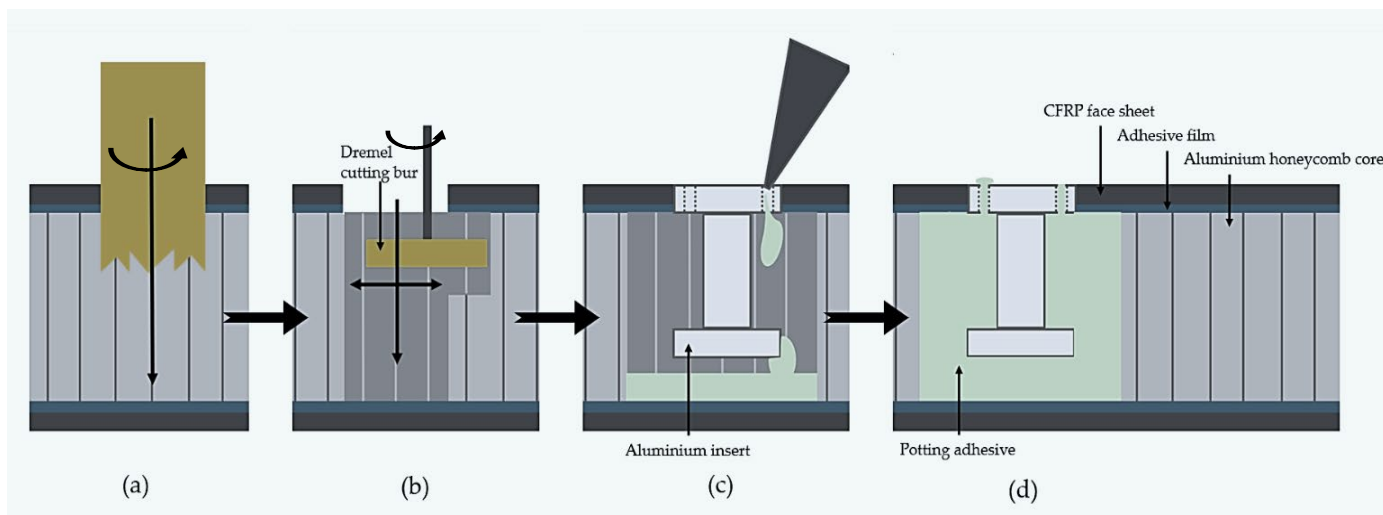
Η Loctite EA 9466 επιλέχθηκε ως το υλικό κόλλησης λόγω εκπλήρωσης όλων των βασικών απαιτήσεων της εφαρμογής ψυχρός εμποτισμένου ενθέτου. Η σκλήρυνση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εξαλείφει την ανάγκη για πρόσθετους θερμικούς κύκλους, καθιστώντας το κατάλληλο για ετερόχρονη εγκατάσταση. Ένα από τα κρίσιμα πλεονεκτήματα αυτής της κόλλας είναι η χαμηλή συρρίκνωσή της κατά τη σκλήρυνση, η οποία

είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί η πλήρης συγκόλληση μεταξύ του ενθέτου αλουμινίου και του περιβάλλοντος πυρήνα. Η υπερβολική συρρίκνωση θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη πρόσφυση των μελών του συστήματος, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα της δομής. Αυτή η κόλλα επιλέχθηκε επίσης λόγω της απουσίας εξώθερμης αντίδρασης, φαινομένου που θα μπορούσε να προκαλέσει πορώδες εντός του όγκου κόλλησης και ενδεχομένως να υποβαθμίσει την αντοχή του.

Εκτός από τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά σκλήρυνσης, η Loctite EA 9466 έχει σχετικά χαμηλή πυκνότητα, συμβάλλοντας στη συνολική μείωση του βάρους, σημαντική παράμετρος κατά το σχεδιασμό ελαφρών δομικών στοιχείων. Παρά τη χαμηλή πυκνότητα, η κόλλα παρέχει επαρκή μηχανική αντοχή ώστε να φέρει τα εφαρμοζόμενα φορτία χωρίς πρόωρη αστοχία, διασφαλίζοντας πως η δομική αστοχία, εάν συμβεί, οφείλεται σε λυγισμό του πυρήνα ή ρήξη του και όχι σε θραύση της κόλλας. Αυτός ο συνδυασμός συνθηκών σκλήρυνσης και μηχανικών ιδιοτήτων την καθιστά βέλτιστη επιλογή για εφαρμογές αντίστοιχες αυτών προς εξέταση.

2.1.4. Συναρμολόγηση:

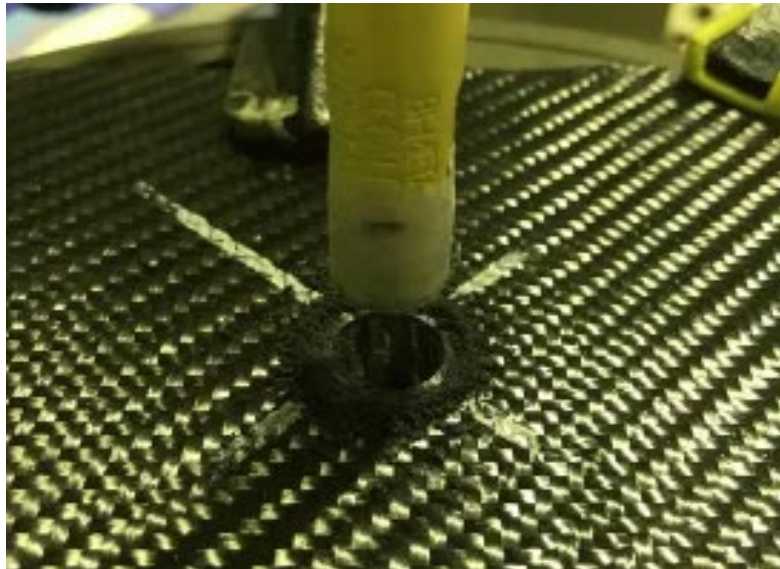
Το τελικό στάδιο της κατασκευαστικής διαδικασίας περιλάμβανε τη συναρμολόγηση όλων των υποσυστημάτων, εστιάζοντας στην ενσωμάτωση του ενθέτου αλουμινίου εντός της δομής σάντουιτς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 [20,30].



Σχήμα 4. Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας συναρμολόγησης.

Αρχικά, δημιουργήθηκε μια κυκλική οπή ίση με τη διάμετρο του ενθέτου στο σύνθετο πάνελ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4α και στο Σχήμα 5. Η διάτρηση απαιτεί έλεγχο του ρυθμού πρόωσης και της ταχύτητας κοπής, προκειμένου να αποφευχθεί η παραγωγή υπερβολικής θερμότητας, η

οποία θα μπορούσε να υποβαθμίσει την αντοχή της εποξικής μήτρας ή να προκαλέσει τοπική απολέπιση της υπερβάλλουσας σύνθετης δομής [7].



Σχήμα 5. Αρχική διάτρηση οπών.

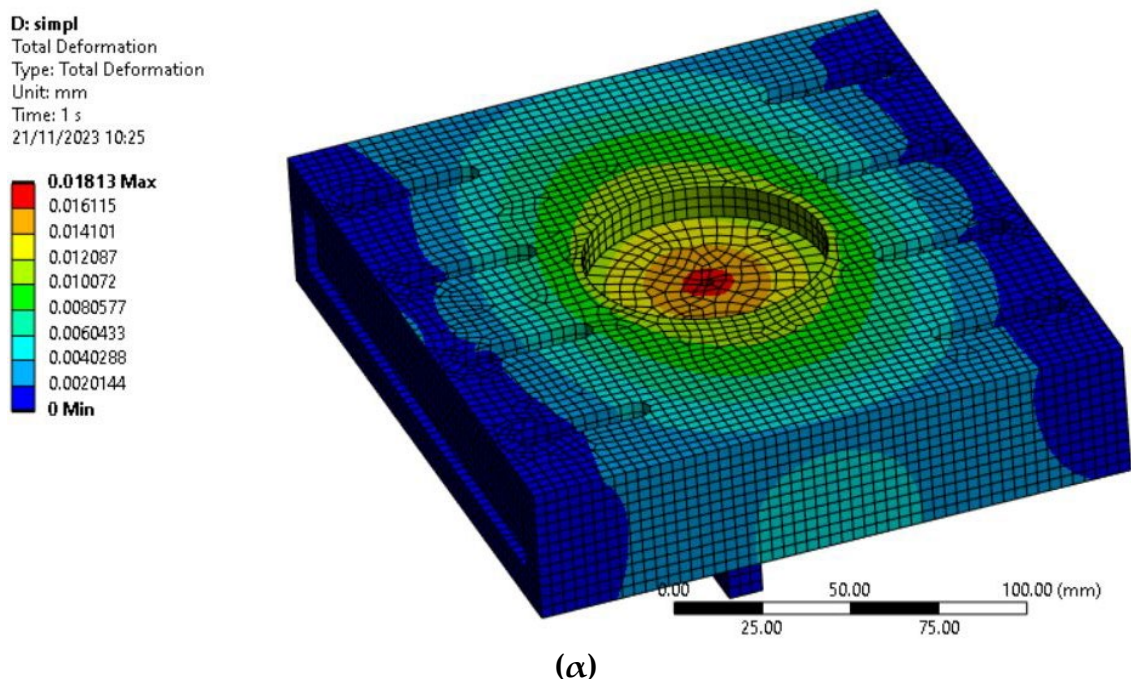
Το περίγραμμα της οπής υποσκάφτηκε χρησιμοποιώντας κεφαλή Dremel με φρέζα του ίδιου διαμετρήματος που απαιτείται για την παραγωγή της επιθυμητής ακτίνας εμποτισμού, Σχήμα 4β. Αυτό το βήμα ήταν κρίσιμο για να διασφαλιστεί ότι το υλικό εμποτισμού ρέει ομοιόμορφα και πως σχηματίζει ισχυρό δεσμό με το υλικό του πυρήνα. Μετά την κοπή, η περιοχή καθαρίστηκε για να αφαιρεθούν τυχόν υπολείμματα ή ρύποι, που θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν τη συγκόλληση. Για να βεβαιωθεί περαιτέρω ο ισχυρός δεσμός, το ίδιο το ένθετο καθαρίστηκε και απολιπάνθηκε χρησιμοποιώντας το καθαριστικό-απολιπαντικό Loctite SF 7840, το οποίο αφαίρεσε τυχόν λάδια και υπολείμματα που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την συγκόλληση.

Στην συνέχεια, η κόλλα εγχύθηκε μέσω των οπών στην άνω φλάντζα του ενθέτου, χρησιμοποιώντας ένα πιστόλι ανάμειξης εξοπλισμένο με ακροφύσιο ανάμειξης, Σχήμα 4γ,. Η μία οπή δρα ως σημείο έγχυσης, ενώ η άλλη λειτουργεί ως οπή εξαερισμού για να επιτρέπει τη διαφυγή του αέρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πλήρωσης με κόλλα.

2.2. Πειραματική Διαδικασία

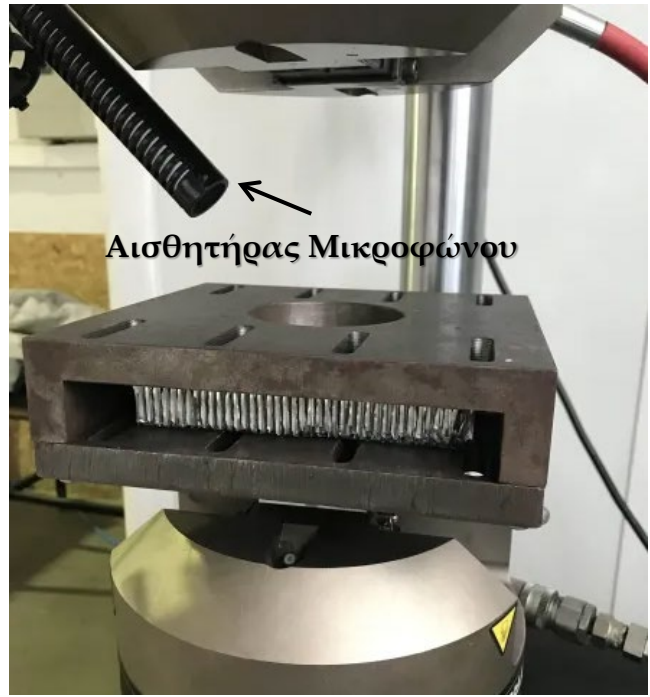
Συνολικά διεξήχθησαν 15 πειράματα, με τρεις δοκιμές για κάθε ακτίνα κόλλησης ($R_p = 8.6, 9.3, 10, 11, 12.5 \text{ mm}$). Τα πειράματα περιλάμβαναν δοκιμές στατικής αντοχής εφελκυσμού (εξόλκευσης) εκτός επιπέδου, με αποτέλεσμα την έλξη του ενθέτου, όπου πραγματοποιήθηκαν

χρησιμοποιώντας το μηχάνημα Instron 8801 του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Για την επιλογή της τελικής γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6, έγινε προσομοίωση χρησιμοποιώντας το Ansys Workbench, πριν από την κατασκευή, για να διασφαλιστεί πως οι παραμορφώσεις υπό μέγιστο φορτίο περιορίζονται εντός των αποδεκτών ορίων και πως όλες οι καταγεγραμμένες παραμορφώσεις αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά των δοκιμίων. Επιπλέον, η διάταξη ακολουθεί τις οδηγίες που περιγράφονται στο Εγχειρίδιο Σχεδιασμού Ενθέτων ECSS [28]. Τα φορτία εφαρμόστηκαν στα ένθετα μέσω βίδας στερεωμένης μέσω των σπειρωμάτων του ενθέτου. Στη συνέχεια, η βίδα μετατοπίστηκε, μέσω ενός συνδετικού εξαρτήματος, από τους σφιγκτήρες της μηχανής εφελκυσμού Instron, μεταφέροντας έτσι το φορτίο στο δοκίμιο. Επιλέχθηκε σταθερός ρυθμός μετατόπισης 0.8 mm/min, επιτρέποντας την ευκολότερη ανίχνευση μεταβολών των ακουστικών εκπομπών (ΑΕ).





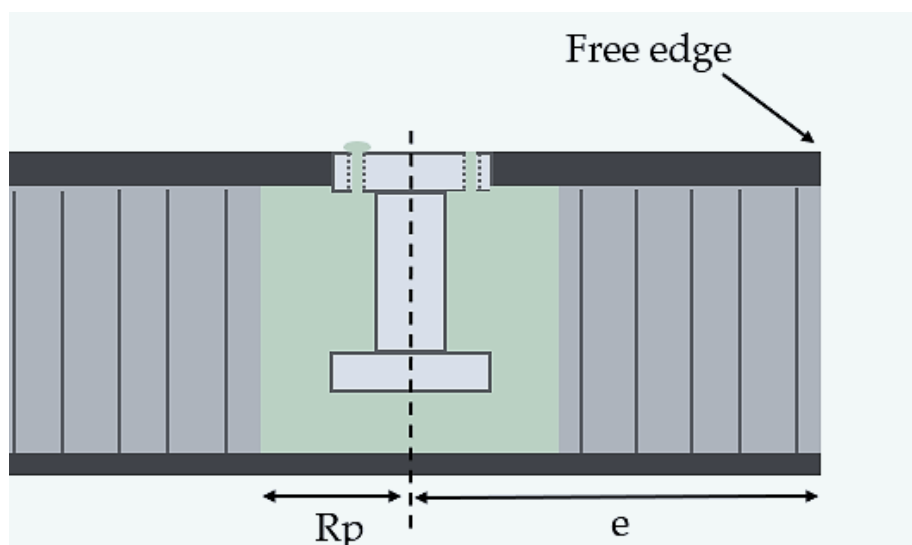
(β)



(γ)

Σχήμα 6. (α) Προσομοίωση ολικής παραμόρφωσης πειραματικής διάταξης, (β) Πειραματική διάταξη εφελκυσμού εκτός επιπέδου, (γ) Πλάγια όψη πειραματικής διάταξης.

Οι διαστάσεις των σύνθετων πάνελ σάντουιτς επιλέχθηκαν με βάση την αντίστοιχη ακτίνα εμποτισμού σύμφωνα με $e > 5R_p$, όπου e είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου του ενθέτου και της ελεύθερης επιφάνειας του πάνελ σάντουιτς, Σχήμα 7, εξασφαλίζοντας κατάλληλη απόσταση από το άκρο με στόχο την εξάλειψη της επιρροής της ελεύθερης επιφάνειας στην φέρουσα ικανότητα των ενθέτων, ακολουθώντας το πρότυπο ECSS.



Σχήμα 7. Απόσταση (e) από την ελεύθερη επιφάνειας.

Για την καταγραφή ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιήθηκε σύστημα μικροφώνου αποτελούμενο από τα Tascam DR-05 και RODE N3594. Για αυτόν τον τύπο δοκιμής, όπου εμφανίζεται αστοχία (π.χ., λυγισμός ή ρωγμή) εντός του απαιτούμενου εύρους συχνοτήτων, τα μικρόφωνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποτελεσματικό εργαλείο για την ανίχνευση αστοχιών [18]. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες συνήθως προσφέρουν υψηλότερη ευαισθησία, καθώς ανιχνεύουν ταλαντώσεις απευθείας από το δείγμα, παρακάμπτοντας τη μετάδοση κυμάτων μέσω αέρα, και έτσι παρέχουν πιο ακριβείς μετρήσεις σε μικρές αλλαγές [19].

Για την καταγραφή των οπτικών παρατηρήσεων, φωτογραφίες των δειγμάτων λήφθηκαν χρησιμοποιώντας κάμερα Canon EOS 750D. Πραγματοποιήθηκε τομή των δειγμάτων χρησιμοποιώντας τη μηχανή Struers Labotom-5 και διεξήχθησαν στερεοσκοπικές παρατηρήσεις των τομών χρησιμοποιώντας στερεοσκόπιο Leica Wild M3Z.

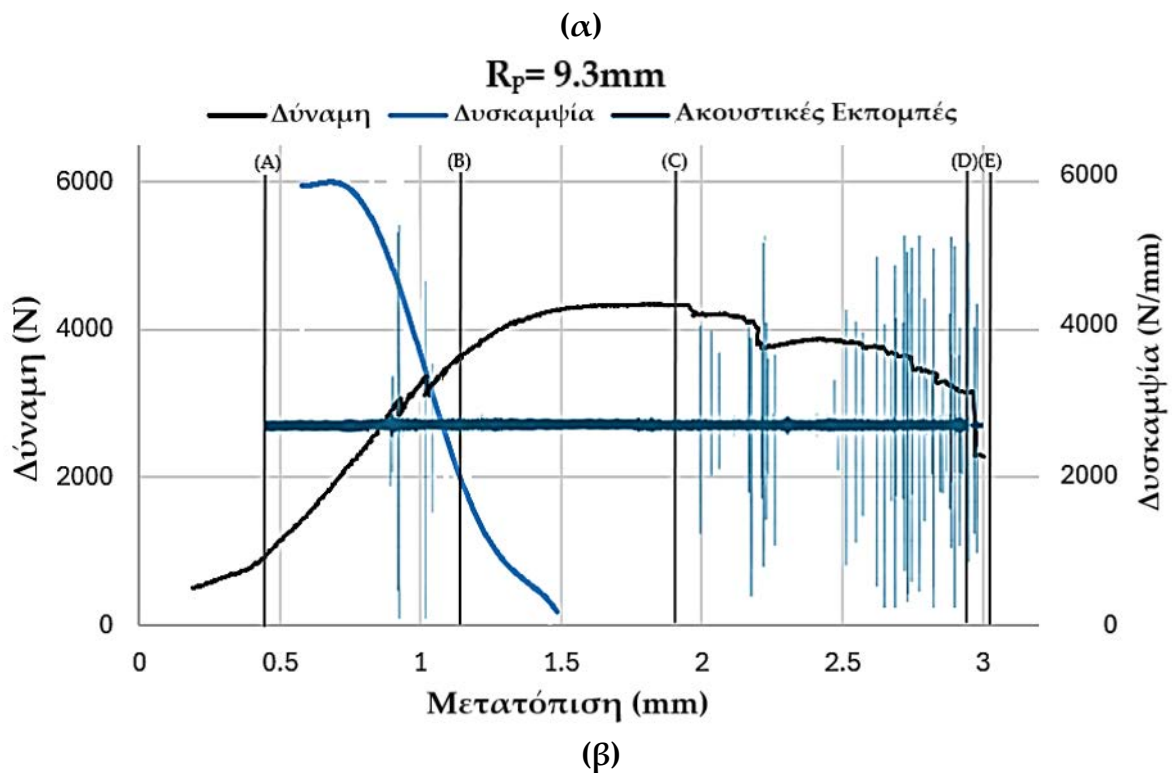
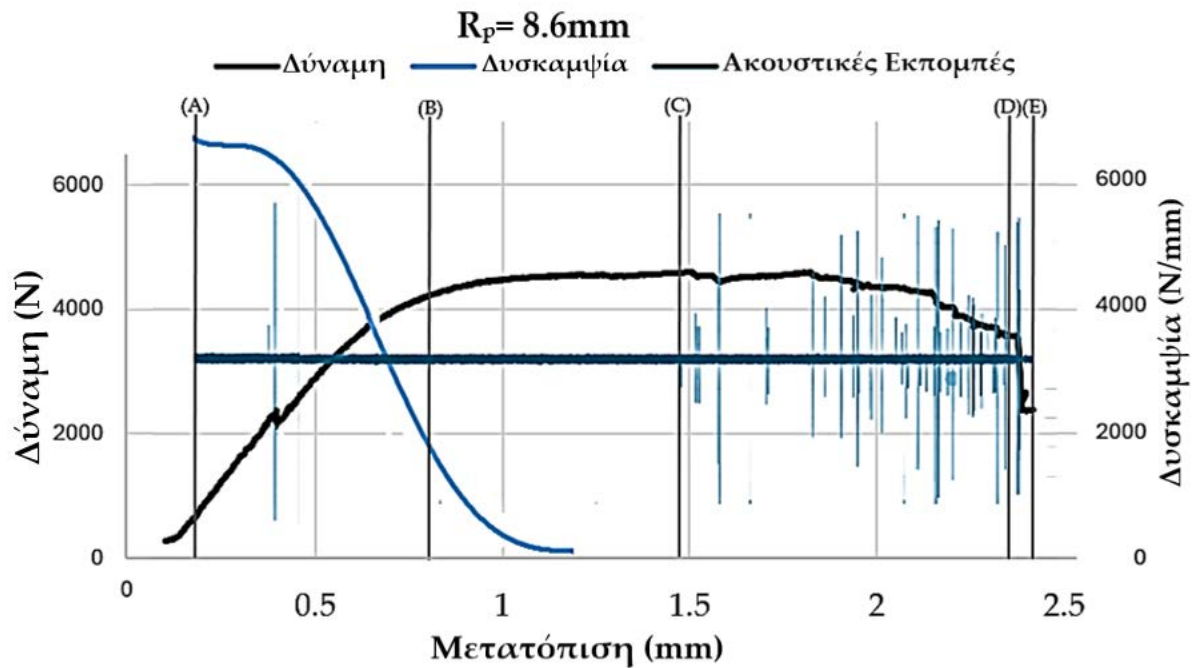
3. Πειραματικά Αποτελέσματα

Σε αυτήν την παράγραφο αναλύονται τα δεδομένα δύναμης-μετατόπισης και ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) (Σχήματα 8, 11, 14) καθώς και η εξέλιξη της ακαμψίας η οποία αξιολογείται με βάση την καταγραφή της μετατόπισης. Έχει δοθεί έμφαση στον εντοπισμό, την απομόνωση και την εξήγηση των μηχανισμών αστοχίας σε αναλογία με τα πειραματικά δεδομένα. Η επιβεβαίωση των ευρημάτων επιτυγχάνεται μέσω οπτικής επιθεώρησης των δειγμάτων, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης διατομής.

Από τα δεδομένα ακουστικής εκπομπής, παρατηρήθηκαν οι αλλαγές στα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης και συσχετίστηκαν με συγκεκριμένους μηχανισμούς βλάβης που έλαβαν χώρα.

3.1. Ακτίνες εμποτισμού 8,6 mm και 9,3 mm:

Οι ακτίνες εμποτισμού των 8,6mm και 9,3mm είναι οι ελάχιστες και τυπικές συνιστώμενες τιμές αντίστοιχα, σύμφωνα με το εγχειρίδιο ECSS για τη δεδομένη σύνθετη δομή σάντουιτς και την επιλεγμένη ακτίνα ενθέτου. Και οι δύο παρουσιάζουν συγκρίσιμη συμπεριφορά και επομένως θα αναλυθούν συλλογικά. Τα διαγράμματα δύναμης, μετατόπισης και ακουστικής εκπομπής έχουν διαιρεθεί σε ξεχωριστές περιοχές.



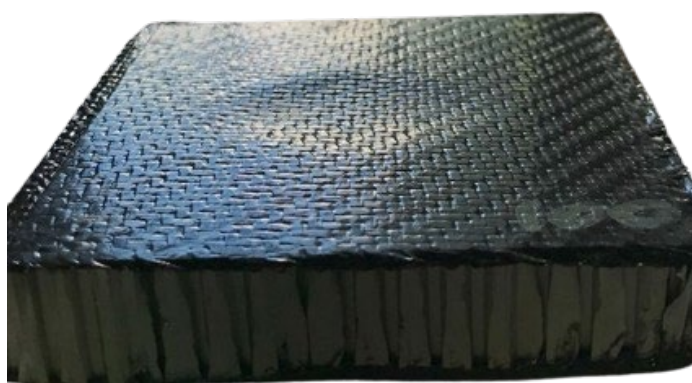
Σχήμα 8. (α), (β) Χαρακτηριστικά διαγράμματα δύναμης, μετατόπισης και ακουστικών εκπομπών των $R_p=8,6\text{mm}$ και $R_p=9,3\text{mm}$ αντίστοιχα.

Από τα διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης, Σχήμα 8α και β, διακρίνεται, πως στην περιοχή AB, η συμπεριφορά είναι γραμμικού τύπου στα πρώτα στάδια φόρτισης ακολουθούμενη από μία ή δύο κορυφές μεταβολής δύναμης που οφείλονται στην τοπική αποφόρτιση, πριν εμφανιστεί μη γραμμικότητα στη συμπεριφορά της δύναμης-μετατόπισης.

Αυτό είναι το στάδιο όπου ο κυψελοειδής πυρήνας υφίσταται φόρτιση και αστοχία. Αρχικά, η ακαμψία έχει σταθερή τιμή μέχρι την πρώτη κορυφή δύναμης, μετά την οποία αρχίζει να μειώνεται λόγω μηχανισμών αστοχίας του πυρήνα που προκαλούνται αρχικά από λυγισμό του τοιχώματος και ακολουθείται από ρήξη αυτών. Πέρα από αυτό το σημείο, ο πυρήνας δεν μπορεί πλέον να φέρει τα εφαρμοζόμενα φορτία, οδηγώντας σε μείωση της δυσκαμψίας με της εξωτερικές σύνθετες στρώσεις να αναλαμβάνουν πλέον τον κύριο ρόλο φέρουσας δύναμης. Στην περιοχή BC, το φορτίο σταθεροποιείται, γεγονός που οφείλεται στην απομένουσα αντοχή των στρώσεων, οι οποίες φορτίζονται υπό τάσεις κάμψης, αλλά δεν έχουν ακόμη αστοχήσει. Στην περιοχή CD, ένα κυματοειδές μοτίβο αναδεικνύεται στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, που υποδηλώνει την έναρξη και τη διάδοση μικρορωγμών εντός των σύνθετων επιστρώσεων. Τέλος, στην περιοχή DE, εμφανίζεται πλήρης δομική αστοχία, που χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες ρωγμές στην επιδερμίδα και επακόλουθη αποκόλληση.

Από τα δεδομένα ακουστικής εκπομπής που φαίνονται στα Σχήματα 8α και β, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις. Στη περιοχή AB, παρατηρούνται μόνο μικρές διακυμάνσεις πλάτους ήχου, εκτός από τα σημεία όπου ο πυρήνας υφίσταται κάμψη και ρήξη, καθώς κανένα άλλο στοιχείο του συστήματος δεν έχει ακόμη υποστεί βλάβη. Η φάση BC δεν παρουσιάζει σημαντικές καταγραφές, καθώς αυτό το στάδιο περιλαμβάνει μόνο τη φόρτιση των στρώσεων χωρίς ακόμη κάποιου είδους αστοχίας. Στη φάση CD, υπάρχει συχνή καταγραφή εκπομπών υψηλού εύρους, γεγονός που αντιστοιχεί στο σχηματισμό και διάδοση των μικρορωγμών εντός των στρώσεων CFRP όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Τέλος, στη φάση DE, μια απότομη αύξηση του ηχητικού πλάτους υποδηλώνει την πλήρη αστοχία του δοκιμίου.

Ο οπτικός έλεγχος των δειγμάτων αποκάλυψε ότι η άνω σύνθετη στρώση παρουσίαζε αστοχία τύπου εξώθησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9γ, ενώ η κάτω σύνθετη στρώση φέρει σημάδια εσοχής, ενδεικτικά βλάβης που προκλήθηκε από τοπική παραμόρφωση εκτός επιπέδου που οδήγησε σε τελική αποκόλληση, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 9α και β. Αυτές οι παρατηρήσεις αποτελούν ενδείξεις βλάβης των εξωτερικών ενισχυτικών σύνθετων επιστρώσεων.



(α)



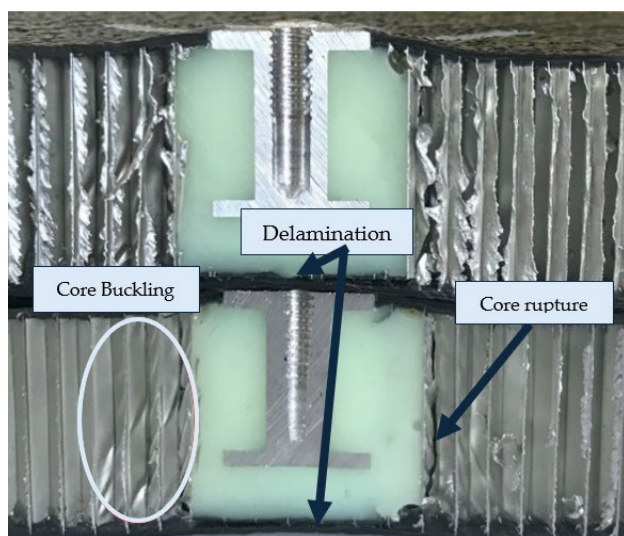
(β)



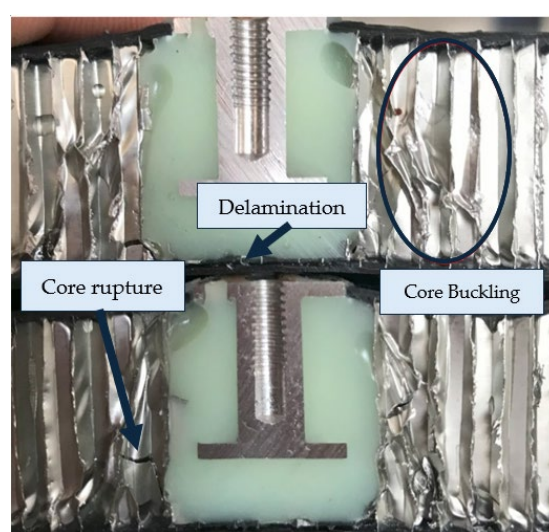
(γ)

Σχήμα 9. (α), (β) Χαρακτηριστική βλάβη εσοχής κάτω στρώσεις για $R_p=8,6$ mm και $R_p=9,3$ mm αντίστοιχα, (γ) Εξώθηση άνω στρώσεις.

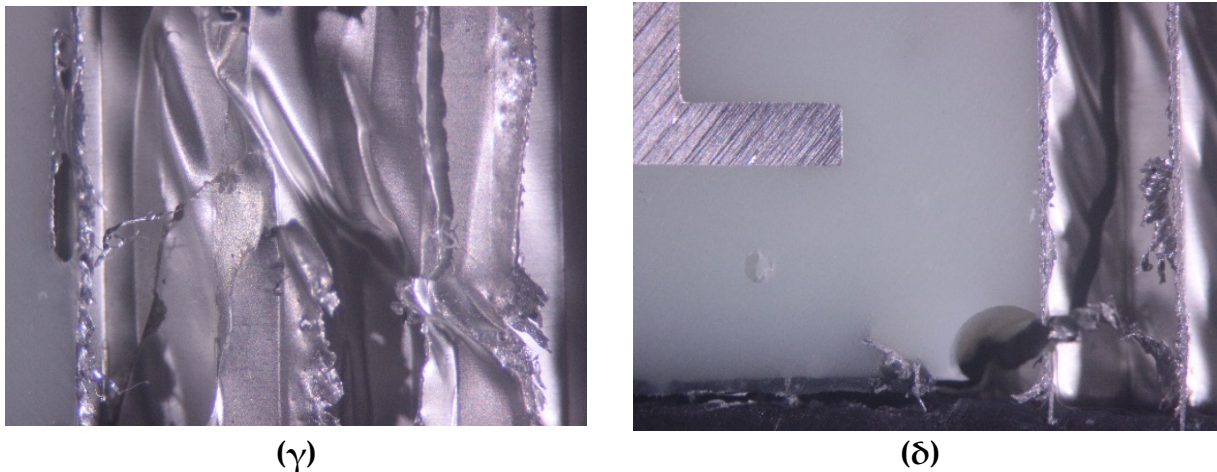
Από τα Σχήματα 10α, β, γ και δ, ο πλαστικός λυγισμός και η διάρρηξη των κελίων του πυρήνα, είναι εμφανώς ορατές, σε συνδυασμό με την αποκόλληση της κάτω σύνθετης στρώσης, παρατηρήσεις που έρχονται σε συμφωνία με τα δεδομένα δύναμης, μετατόπισης και ακουστικής εκπομπής, επιβεβαιώνοντας τους ανωτέρω μηχανισμούς αστοχίας.



(α)



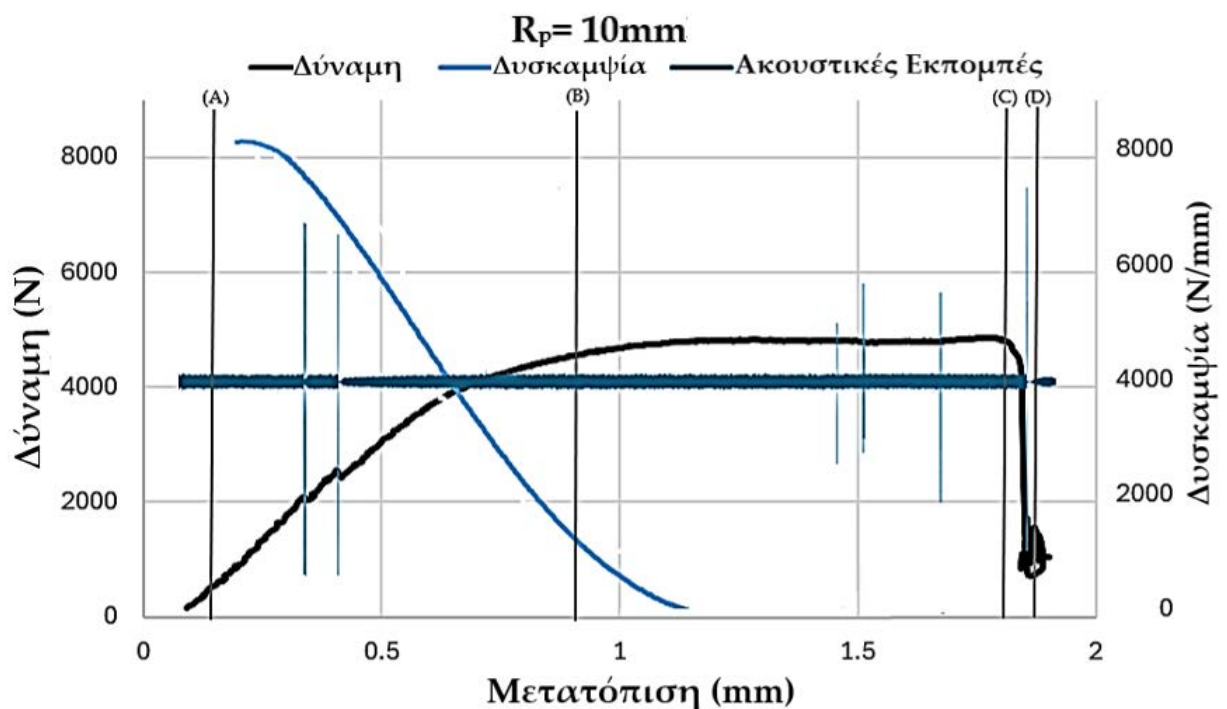
(β)



Σχήμα 10. (α), (β) Χαρακτηριστικές διατομές για $R_p=8,6\text{mm}$ και $R_p=9,3\text{mm}$ αντίστοιχα, (γ) Στερεοσκοπική παρατήρηση λυγισμού του πυρήνα, (δ) Στερεοσκοπική παρατήρηση της διατρητικής ρήξης των κελίων του πυρήνα και της αποκόλλησης των στρώσεων.

3.2. Ακτίνα εμποτισμού 10 mm:

Για ακτίνες εμποτισμού 10 mm και άνω, οι τιμές υπερβαίνουν αυτές που συνιστώνται από το πρότυπο του Εγχειριδίου ECSS, ενώ η γεωμετρία του ενθέτου παραμένει σταθερή.



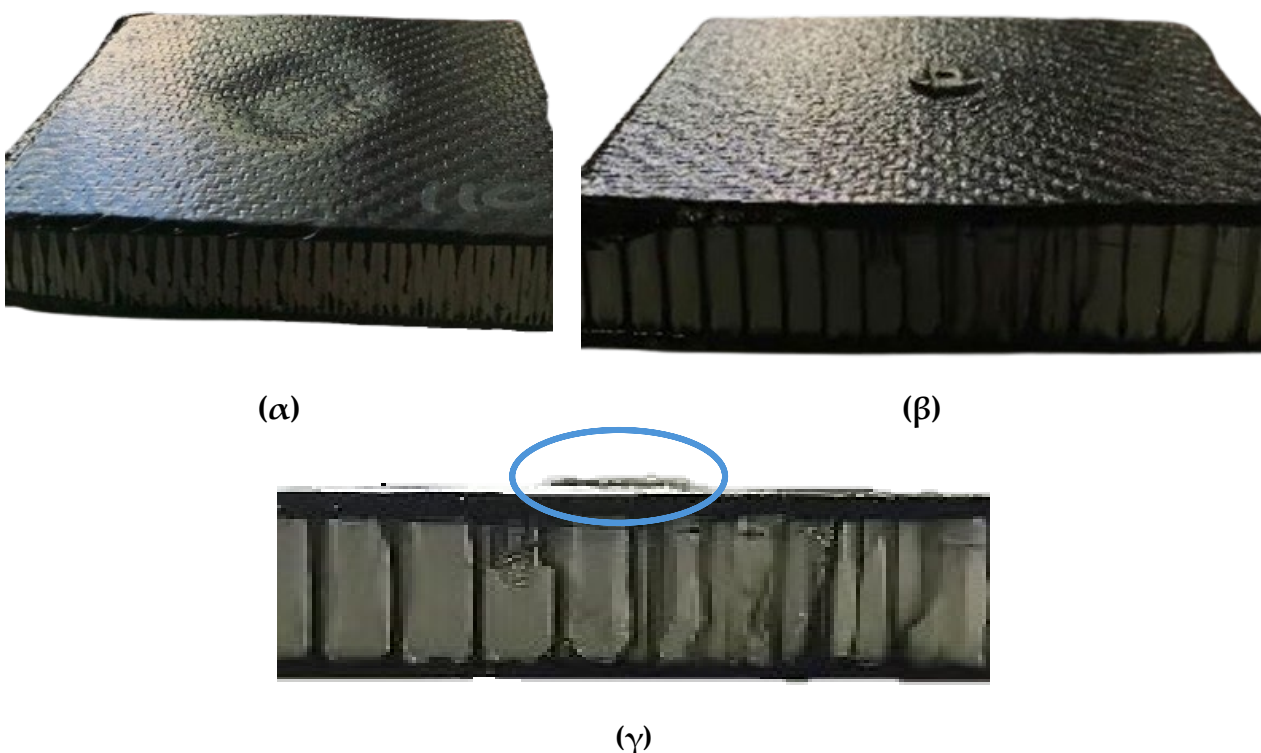
Σχήμα 11. Χαρακτηριστικό διάγραμμα δυνάμεων, μετατοπίσεων και ακουστικών εκπομπών για $R_p=10\text{mm}$.

Από το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης του Σχήματος 11 διακρίνεται ότι η περιοχή AB παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά που

παρατηρούνται στις μικρότερες ακτίνες κόλλησης. Στην περιοχή BC, η δύναμη σταθεροποιείται απουσία όμως κυματομορφής ενώ η περιοχή CD αντιπροσωπεύει την τελική αστοχία με απότομη πτώση της δύναμης σε περίπου 0 N. Αυτή η διαφορετική συμπεριφορά πέρα από το Σημείο C υποδηλώνει έναν εναλλακτικό μηχανισμό αστοχίας σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

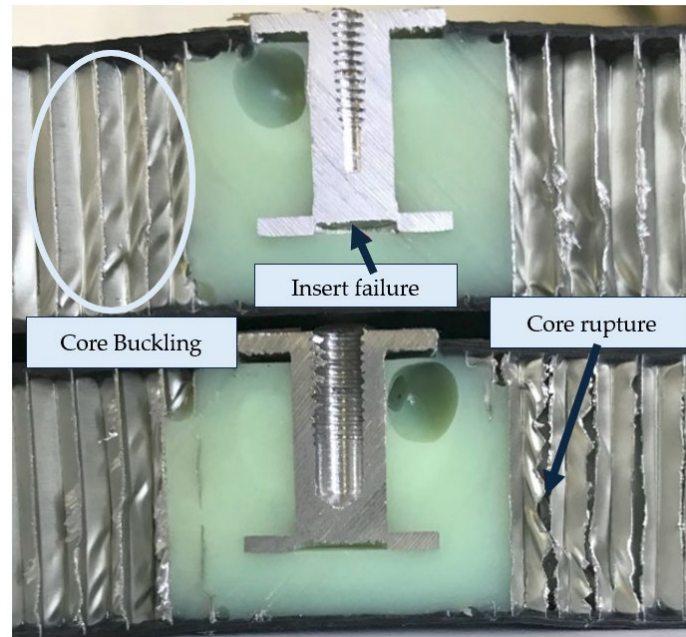
Οι καταγραφές ακουστικών εκπομπών στην περιοχή AB, παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με τις μικρότερες ακτίνες κόλλησης. Στη περιοχή BC, αρχικά δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή στο ηχητικό πλάτος, ωστόσο, προς το τέλος αυτής της υποπεριοχής, ανιχνεύθηκαν ορισμένες εκπομπές. Αυτό οδηγεί στην υπόθεση πως πριν από την τελική αστοχία εμφανίστηκαν κάποιες, ελάχιστες, μικρορωγμές, αλλά απουσία εκτενείς διάδοσης και συνένωσης αυτών.

Η οπτική εξέταση των δειγμάτων μετά την αστοχία, υπόδειξε ελάχιστη εξώθηση στην άνω πολυμερική επίστρωση, όπως παρατηρείται στα Σχήματα 12β και γ. Επίσης, στη κάτω στρώση, έλαβε χώρα παραμόρφωση εσοχής επιβεβαιώνοντας τη βλάβη στην σύνθετη στρώση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12α.

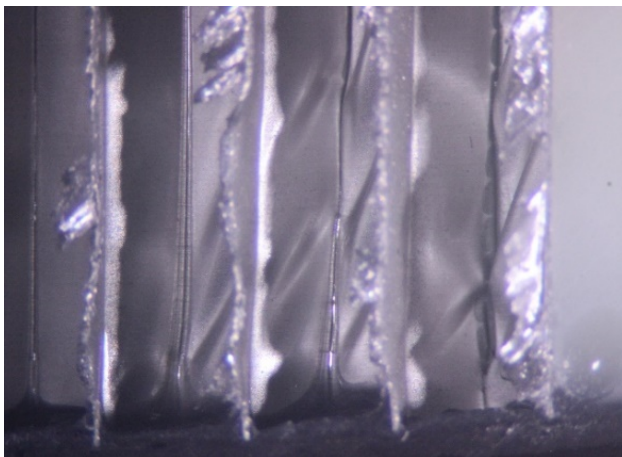


Σχήμα 12. (α) Βλάβη εσοχής κάτω στρώσεις, (β), (γ) Εξώθηση-αποκόλληση ενθέτου.

Ο λυγισμός και η ρήξη του πυρήνα φαίνονται στα Σχήματα 13α, β και γ. Η σημαντική παρατήρηση που διαφοροποιεί τον μηχανισμό αστοχίας σε σύγκριση με τις μικρότερες ακτίνες εμποτισμού είναι πως η κάτω φλάντζα των ενθέτων έχει αποσχιστεί από το κύριο του σώμα, επιτρέποντας στο ένθετο να αποκολληθεί από το υλικό κόλλησης, όπως φαίνεται στα Σχήματα 13α και ε. Τέλος, παρατηρείται κάποια μερική καμπυλότητα της κάτω πολυμερικής στρώσης, χωρίς όμως να υπάρχουν σημάδια αποκόλλησης, Σχήμα 13δ.



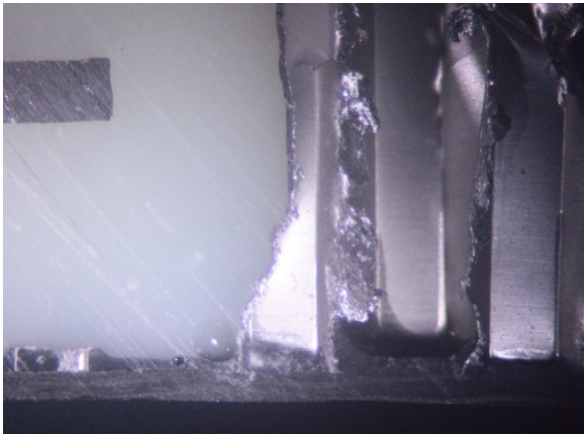
(α)



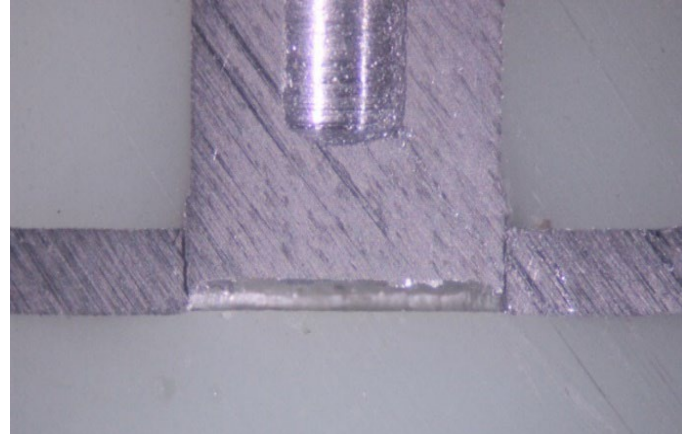
(β)



(γ)



(δ)



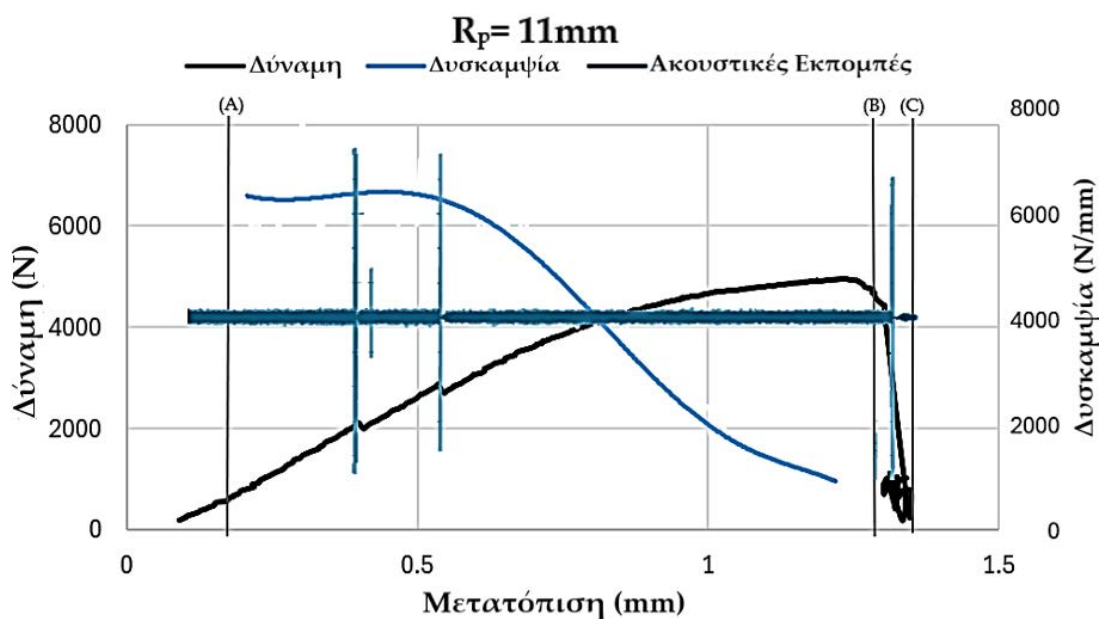
(ε)

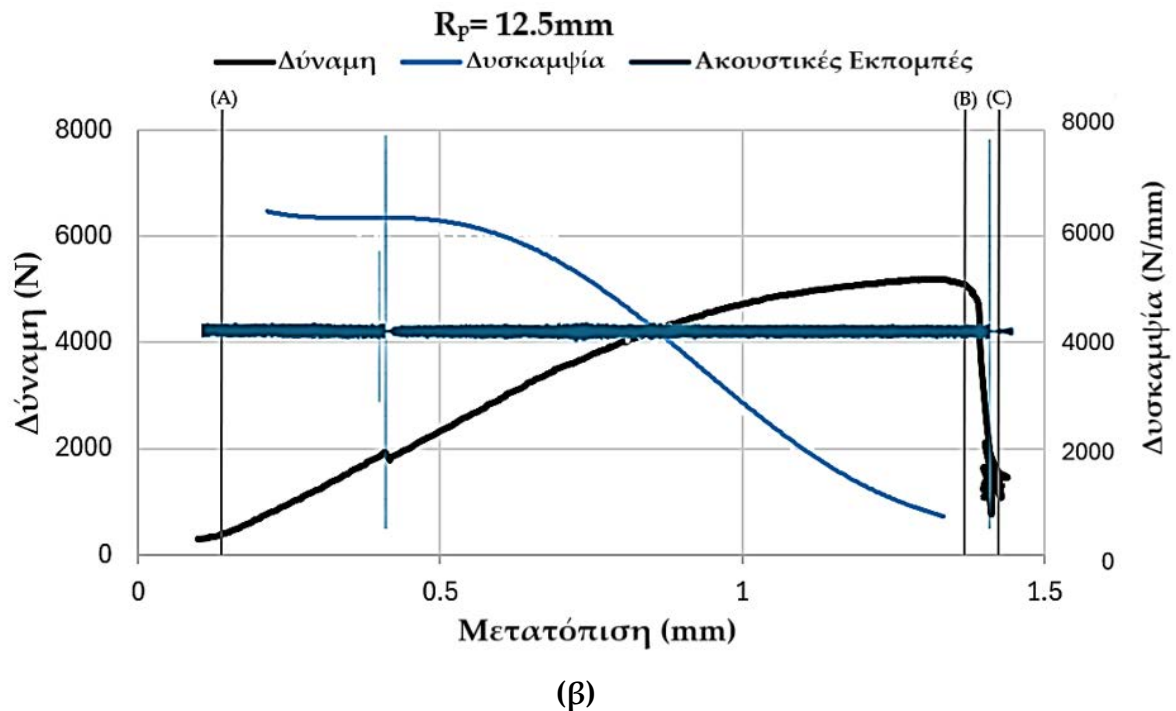
Σχήμα 13. (α) Χαρακτηριστικές διατομές $R_p=10\text{mm}$, (β) Στερεοσκοπική παρατήρηση λυγισμού πυρήνα, (γ) Στερεοσκοπική παρατήρηση διατμητικής ρήξης, (δ) Απουσία αποκόλλησης, (ε) Στερεοσκοπική παρατήρηση αστοχίας κάτω πέλματος ενθέτου.

Από αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα, παρατηρείται ότι με την αύξηση της ακτίνας εμποτισμού από 8.6mm-9.3mm σε 10mm, ο μηχανισμός αστοχίας έχει μεταβληθεί από μικρορωγμές της σύνθετης στρώσεις και αποκόλληση, σε αστοχία του ενθέτου. Συγκεκριμένα, η ρωγμή της κάτω φλάντζας του ενθέτου αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας, που συμβαίνει σε φορτίο περίπου 5000 N.

3.3. Ακτίνες εμποτισμού 11 mm και 12,5 mm:

Για τις μεγαλύτερες ακτίνες των 11 mm και 12,5 mm, η μηχανική απόκριση της σύνδεσης απεικονίζεται στα Σχήματα 14α και β.





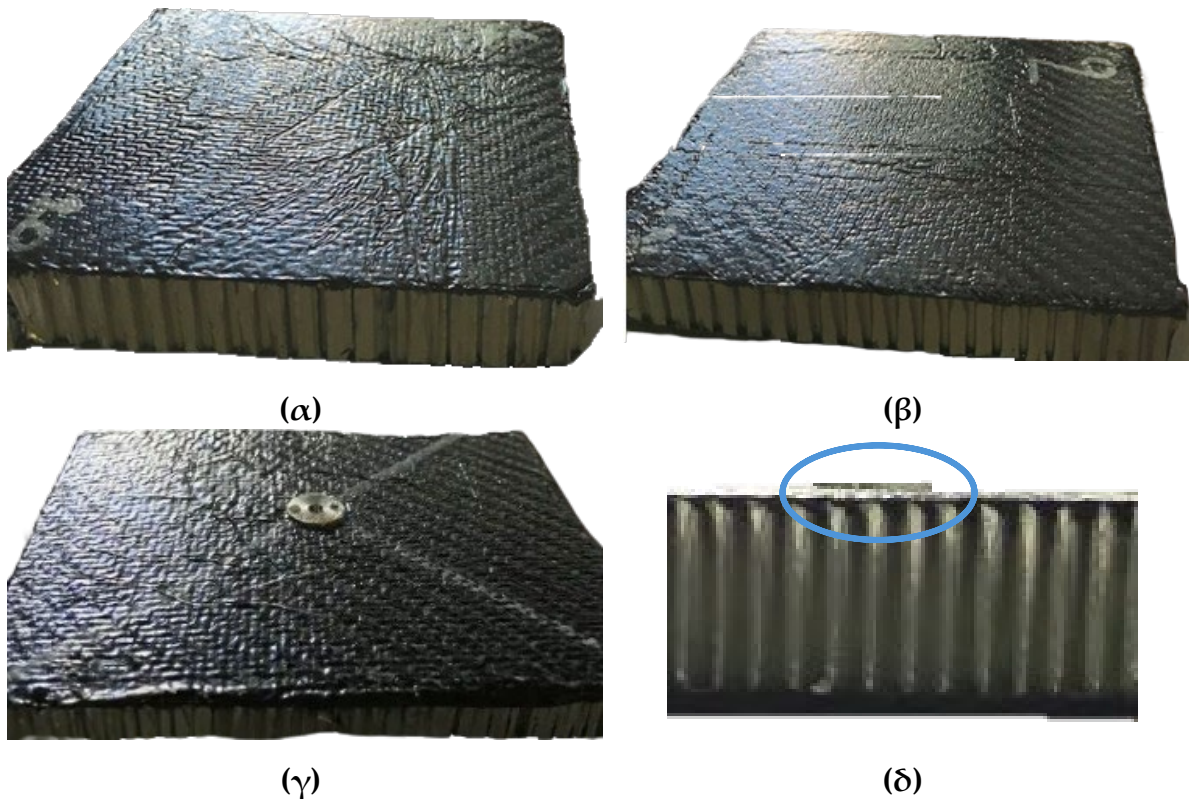
Σχήμα 14. (α), (β) Χαρακτηριστικά διαγράμματα δύναμης, μετατόπισης και ακουστικών εκπομπών των $R_p=11\text{mm}$ και $R_p=12,5\text{mm}$ αντίστοιχα.

Από τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης, των Σχημάτων 14α και β, διακρίνεται ότι στην περιοχή AB η συμπεριφορά είναι κυρίως γραμμική μέχρι φορτίου περίπου 3000N, όπου ακολουθεί μη γραμμικότητα μέχρι το μέγιστο φορτίο των περίπου 5200 N. Η περιοχή BC είναι το εύρος μετατόπισης, όπου εμφανίζεται αστοχία του κάτω πέλματος του ενθέτου. Στα πειράματα αυτά απουσίασε η περιοχή σταθεροποίησης δύναμης και το κυματομοτίβο της, αυτή η συμπεριφορά, η οποία διαφέρει πέρα του σημείου B, υποδηλώνει πως οι σύνθετες ενισχυτικές στρώσεις δεν υπέστη βλάβη. Η αστοχία του ενθέτου στην περιοχή του πέλματος φαίνεται να είναι η κυρίαρχη αιτία αστοχίας.

Αξιολογώντας τα δεδομένα των ηχητικών αισθητήρων στα Σχήματα 14α και β, στην περιοχή AB ανιχνεύονται μεταβολές ακουστικής εκπομπής μόνο στις κορυφές μεταβολής δύναμης, ενώ στην περιοχή BC δεν καταγράφηκαν αλλαγές πλάτους εκτός από την τελική ρήξη της κάτω φλάντζας των ενθέτων. Σημασίας αποτελεί το συμπέρασμα πως δεν έχει ανιχνευθεί ένδειξη μικρορωγμάτωσης των επιστρώσεων μέσω των σημάτων ακουστικών εκπομπών και την έλλειψή αυτών, αντιθετα της περίπτωσης των ακτινών εμποτισμού μικρότερης διαμέτρου των Σχημάτων 8α, β και Σχήματος 11.

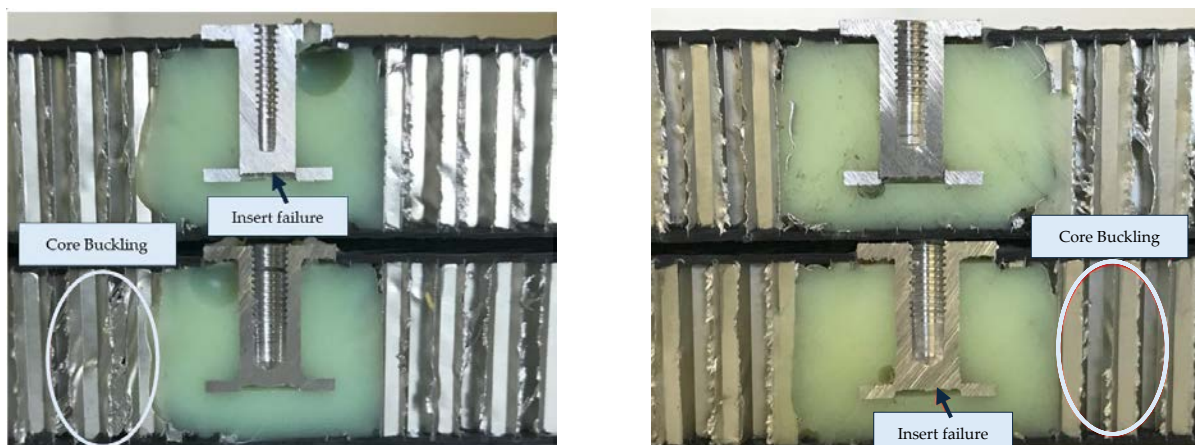
Από την οπτική ανάλυση των δοκιμίων, παρατηρήθηκε πως στην άνω πολυμερική στρώση των δειγμάτων δεν ήταν εμφανής αστοχία τύπου

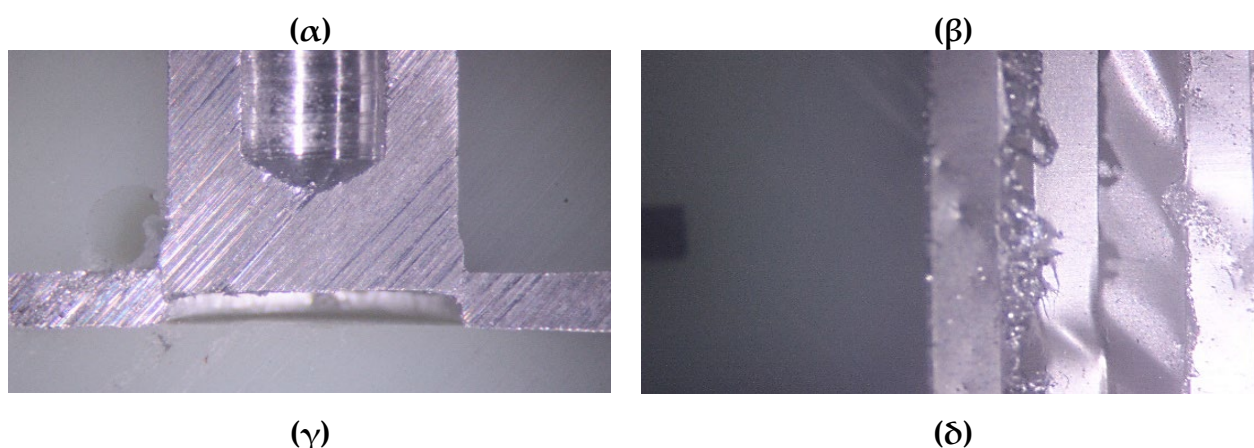
εξώθησης, ενώ το ένθετο προεξείχε από την επιφάνεια των πάνελ όπως φαίνεται στα Σχήματα 15c και d. Επιπλέον, στην κάτω στρώση δεν υπάρχει αστοχία εσοχής όπως φαίνεται στα Σχήματα 15a, b.



Σχήμα 15. (α), (β) Χαρακτηριστική απουσία βλάβης εσοχής κάτω σύνθετης στρώσης για $R_p=11\text{mm}$ και $R_p=12.5\text{mm}$ αντίστοιχα, (γ), (δ) Αποκόλληση-εξώθηση ενθέτου.

Τέλος από τον οπτικό έλεγχο των τομών, παρατηρείται λυγισμός των κυψελοειδών τοιχωμάτων, σε εμφανώς μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τις συνδέσεις μικρότερης ακτίνα κόλλησης ενώ δεν παρουσιάστηκε ρήξη των κελίων του πυρήνα. Επιπλέον, δεν διακρίθηκε αποκόλληση των ενισχυτικών επιστρώσεων. Η θραύση του ενθέτου στη βάση της κάτω φλάντζας είναι το κύριο αίτιο αστοχίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 16.





Σχήμα 16. (α), (β) Χαρακτηριστικές τομές για $R_p=11\text{mm}$ και $R_p=12.5\text{mm}$ αντίστοιχα (γ), Στερεοσκοπική παρατήρηση θραύσης κάτω φλάντζας του ενθέτου (δ), Στερεοσκοπική παρατήρηση λυγισμού των κελίων του πυρήνα.

Τα δεδομένα των διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης και οι πειραματικές παρατηρήσεις υποδηλώνουν πως η βλάβη υπό μορφή λυγισμού των τοιχωμάτων του πυρήνα περιορίστηκε σημαντικά με την αύξηση της διαμέτρου κόλλησης ενώ παράλληλα δεν σημειώθηκαν μικρορωγμές των ενισχυτικών σύνθετων στρώσεων. Αντίθετα, τα δείγματα αστοχήσαν εξαιτίας ρηγμάτωσης του κάτω πέλματος-φλάντζας του ενθέτου σε φορτίου περίπου 5000N.

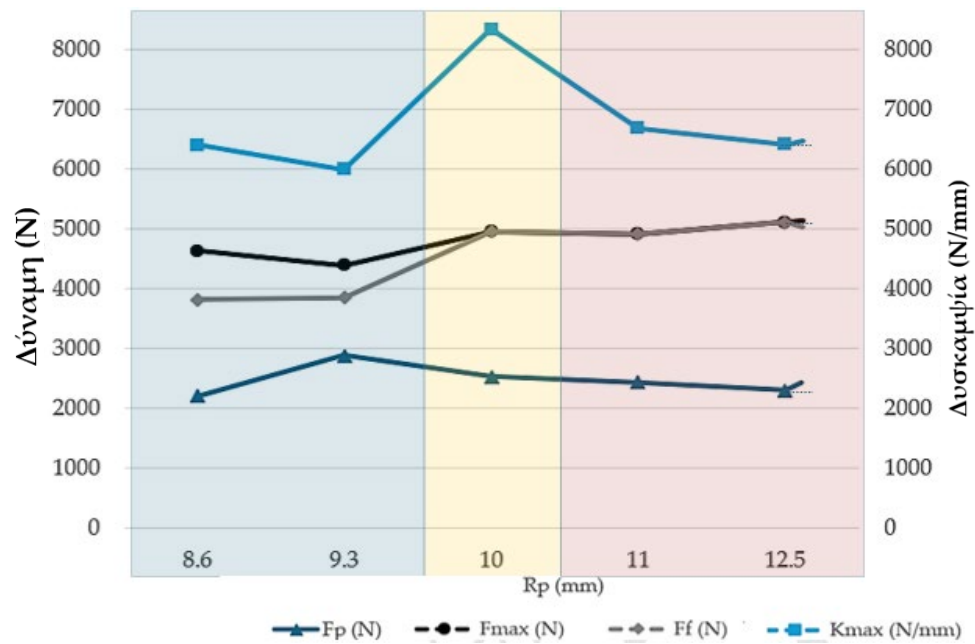
4. Σύνοψη Αποτελεσμάτων και Συζήτηση

Οι μετρήσεις για τις διαφορετικές ακτίνες φύτευσης που ελήφθησαν ως μέση τιμή από τρία πειράματα συνοψίζονται στον Πίνακα 1 και στο Σχήμα 17.

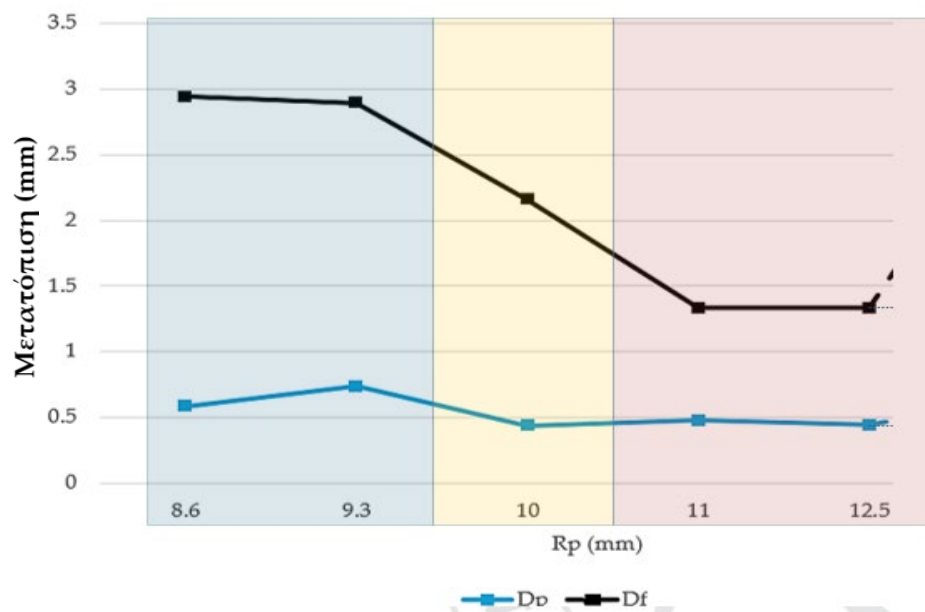
Πίνακας 1. Μέσες τιμές κάθε ακτίνας εμποτισμού.

R_p^1 (mm)	F_p^2 (N)	$F_{\max}^3$ (N)	F_f^4 (N)	$K_{\max}^5$ (N/mm)	D_p^6 (mm)	D_f^7 (mm)
8.6	2199.3	4626.5	3816.3	6398.9	0.584	2.94
9.3	2879.4	4381.6	3849.4	5987.9	0.737	2.895
10	2524.3	4955.7	4955.7	8337.2	0.439	2.16
11	2427.0	4914.5	4914.5	6683.3	0.474	1.33
12.5	2292.3	5104.7	5104.7	6411.6	0.442	1.33

¹ R_p =Ακτίνα εμποτισμού, ² F_p =Φορτίο έως λυγισμό ρήξη πυρήνα, ³ $F_{\max}$ =Μέγιστο φορτίο, ⁴ F_f =Μέγιστο φορτίο αστοχίας, ⁵ $K_{\max}$ =Μέγιστη ακαμψία συστήματος (γραμμική συμπεριφορά), ⁶ D_p =Μετατόπιση στο φορτίο βλάβης πυρήνα, ⁷ D_f =Μετατόπιση στο σημείο αστοχίας.



(α)



(β)

Σχήμα 17. (α), (β) Μέσος όρος πειραματικών αποτελεσμάτων για κάθε ακτίνα εμποτισμού (R_p).

Τα ευρήματα καταδεικνύουν πως η μεταβολή της ακτίνας εμποτισμού δεν είχε σημαντικό αντίκτυπο στο φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η βλάβη του πυρήνα (F_p) (μέσω ανελαστικού λυγισμού και τελικής ρήξης του πυρήνα), συγκεκριμένα η τυπική ακτίνα κόλλησης ($R_p = 9,3$ mm) επιτυγχάνει υψηλότερο φορτίο (F_p) σε σύγκριση με τις άλλες ακτίνες (βλ. Σχήμα 17α).

Αντιθέτως, είναι προφανές ότι το μέγιστο φορτίο ($F_{\max}$) επηρεάζεται όταν εξετάζονται μεγαλύτερες τιμές ακτίνας σε σύγκριση με τις τυπικές. Η μεγαλύτερη απόκλιση από την τυπική ακτίνα κόλλησης ($R_p = 9,3 \text{ mm}$) επιτυγχάνεται για την $R_p = 12,5 \text{ mm}$, με αύξηση 16,5% στο μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο.

Επιπλέον, το φορτίο τελικής αστοχίας (F_f) του συστήματος αυξάνεται με την αύξηση της ακτίνας εμποτισμού. Για μικρές ακτίνες κόλλησης (8,6mm - 9,3mm) το μέσο φορτίο αστοχίας κυμαίνεται στην περιοχή των 3840 N. Με την αύξηση της ακτίνας, το F_f αυξάνεται, με αποτέλεσμα μηχανισμό αστοχίας που χαρακτηρίζεται από διάτμηση της κάτω φλάντζας του ενθέτου. Η των σύγκριση αποτελεσμάτων F_f , δείχνει αύξηση 32,6% για $R_p = 12,5 \text{ mm}$ (Σχήμα 17α) σε σχέση με την τυπική ακτίνα ($R_p = 9,3 \text{ mm}$). Σημειώστε ότι για ακτίνες 10, 11 και 12,5 (mm) το φορτίο τελικής αστοχίας (F_f) είναι ισοδύναμο με το μέγιστο φορτίο ($F_{\max}$).

Η μέγιστη δυσκαμψία ($K_{\max}$) παρουσιάζει μικρή μείωση από $R_p = 8,6 \text{ mm}$ σε $R_p = 9,3 \text{ mm}$, ακολουθούμενη από μια αξιοσημείωτη αύξηση 39,2% στην ενδιάμεση τιμή της ακτίνας εμποτισμού ($R_p = 10 \text{ mm}$) όπου το $K_{\max}$ αναλογεί στην μέγιστη τιμή του. Για $R_p = 11 \text{ mm}$ και $R_p = 12,5 \text{ mm}$, η ακαμψία μειώνεται ελαφρώς, αλλά η $K_{\max}$ παραμένει σε υψηλότερη τιμή συγκριτικά με τις δύο πρώτες ακτίνες (Σχήμα 17α). Η σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας για $R_p = 10 \text{ mm}$ μπορεί να αποδοθεί στη μεταβολή του μηχανισμού αστοχίας, όπου συμβαίνει τόσο βλάβη του πυρήνα και των σύνθετων ενισχυτικών στρώσεων όσο και ρήξη του κάτω πέλματος του ενθέτου. Είναι πιθανό πως αυτός ο σύνθετος τρόπος αστοχίας που εμφανίζετε μόνο για την ακτίνα των 10mm, ενισχύει την ανακατανομή φορτίου και αυξάνει τη συνολική δομική αντοχή πριν από την τελική καταστροφική αστοχία. Συγκριτικά, οι μικρότερες ακτίνες (8,6 mm και 9,3 mm) παρουσιάζουν κυρίως αστοχία του πυρήνα και της πολυμερικής στρώσεις, ενώ οι μεγαλύτερες ακτίνες (11 mm και 12,5 mm) οδηγούν σε ρήξη της φλάντζας του ενθέτου. Η αυξημένη $K_{\max}$ για $R_p = 10 \text{ mm}$ αντικατοπτρίζει αυτή τη αλλαγή των μηχανισμών αστοχίας. Επόμενος, η αύξηση της ακτίνας κόλλησης μπορεί να χρησιμεύσει ως μια αποτελεσματική μέθοδος για την τοπική ενίσχυση της ακαμψίας του συστήματος.

Αντιθέτως, οι τιμές της μετατόπισης την στιγμή βλάβης των κελίων του πυρήνα (D_p) μειώνονται με την αύξηση της ακτίνας εμποτισμού. Η μέγιστη D_p παρατηρείται για ακτίνα $R_p = 9,3 \text{ mm}$, ενώ η ελάχιστη εμφανίζεται για $R_p = 10 \text{ mm}$. Μεταξύ αυτών των δύο περιπτώσεων διακρίνεται μείωση της τιμής μετατόπισης κατά 40,4%. Για τις μεγαλύτερες ακτίνες, η D_p έχει σχετικά σταθερή τιμή (Σχήμα 17β). Έχει ενδιαφέρον να επισημανθεί ότι, ενώ το μέγιστο φορτίο (F_p) παραμένει σχετικά σταθερό σε όλες τις

περιπτώσεις, η μέγιστη μετατόπιση (D_p) παρουσιάζει αισθητές διακυμάνσεις, οδηγώντας στις ανάλογες μεταβολές της ακαμψίας του συστήματος. Η αύξηση της ακαμψίας είναι ευεργετική σε εφαρμογές όπου η σύνδεση του συστήματος απαιτεί συγκεκριμένη ακαμψία ως κρίσιμη απαίτηση.

Τέλος η μετατόπιση την στιγμή της τελικής αστοχίας (D_f) αποτελεί πολύτιμο δεδομένο για την παρακολούθηση της δομικής υγείας πριν από την ολική αστοχία. Η παράμετρος D_f παρουσιάζει μεγάλες διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων, με τις δύο πρώτες ακτίνες να φέρουν συγκρίσιμες τιμές μετατόπισης, ακολουθούμενες από μείωση σε $R_p = 10$ mm, σηματοδοτώντας έναν μεταβατικό μηχανισμό αστοχίας, όπως περιγράφηκε προηγουμένως σε αυτή τη μελέτη. Στη συνέχεια η μετατόπιση ισοδυναμεί στις ελάχιστες τιμές της για τις ακτίνες $R_p = 11$ mm και $R_p = 12,5$ mm. Συγκεκριμένα, σε $R_p = 10$ mm, το D_f παρουσιάζει μείωση 25,4% και σε $R_p = 12,5$ mm, μείωση 54,1%, σε σχέση με την τυπική ακτίνα εμποτισμού ($R_p = 9,3$ mm). Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στις μεταβολές των μηχανισμών και της αλληλουχίας αστοχίας: τα δοκίμια στα οποία εμφανίζεται εκτεταμένη βλάβη του κυψελοειδούς πυρήνα φέρουν υψηλότερο D_f . Αντίθετα, για ακτίνες όπου το κυρίαρχο αίτιο αστοχίας είναι η ρήξη του κάτω πέλματος του ενθέτου, συνοδευόμενη από ελάχιστη βλάβη στον πυρήνα, παρατηρείται χαμηλότερο D_f .

Ο οπτικός έλεγχος και ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, κατέδειξε πως η διάμετρος της κόλλησης έχει σαφή επίδραση στον τρόπο αστοχίας της σύνδεσης. Η αστοχία σε συστήματα με μικρότερη διάμετρο (8,6 mm και 9,3 mm), προκαλείται αρχικά από ανελαστικό λυγισμό του πυρήνα και ακολουθείται από ρήξη των τοιχωμάτων που βρίσκονται κοντά στην συγκολλητή διεπιφάνεια. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτά τα φαινόμενα συμβαίνουν στις στιγμές μεταβολής της δύναμης εντός της γραμμικής περιοχής. Επιπλέον, οι καταγραφές των ακουστικών εκπομπών φανερώνουν πως η αστοχία του πυρήνα συσχετίζεται και υφίσταται στις πρώτες μεμονωμένες αυξήσεις του ηχητικού πλάτους στην αρχή της φόρτισης. Παρατηρείται επακόλουθη μικρορωγμάτωση των σύνθετων στρώσεων, η οποία συνοδεύεται από αποκόλληση των στρώσεων αυτών στα τελικά στάδια της βλάβης, εξαιτίας της ανακατανομής φορτίου έπειτα της υποβάθμισης του πυρήνα, με αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων κάμψης των εξωτερικών επιστρώσεων. Αρχικά, η παραμένουσα αντοχή των πουλερικών στρώσεων σχετίζεται με το σταθερό φορτίο που επιτυγχάνεται, χωρίς να ανιχνεύονται ακουστικές εκπομπές. Ωστόσο, καθώς η μικρορωγμάτωση των επιπτώσεων διαδίδεται, το φαινόμενο αντανακλάται στην κυματομορφή της δύναμης και συνοδεύεται από συνεχείς ακουστικές εκπομπές. Με την αύξηση της διαμέτρου,

παρατηρείται μια μεταβολή στον τελικό μηχανισμό αστοχίας από την σύνθετη επίστρωση προς το πέλμα του ενθέτου, ενώ κυψελοειδής πυρήνας υφίσταται λιγότερο έντονη βλάβη σε σχέση με τα δείγματα με μικρότερη ακτίνα εμποτισμού. Καθώς τάσεις τύπου κάμψης στο πέλμα του ενθέτου είναι ελάχιστες λόγω της συνοχής και της ακαμψίας του υλικού κόλλησης, εμφανίζεται θραύση λόγω διατμητικών τάσεων στη βάση του ενθέτου ενώ η θέση θραύσης βρίσκεται στη περιοχή συγκέντρωσης τάσεων που ορίζεται από τη γωνία όπου το πέλμα (βάση) του ενθέτου συναντά το κύριο σώμα (στήλη) του.

Υπό την προϋπόθεση πως υπάρχει επαρκής ακτίνας καμπυλότητας της κάτω φλάντζας, τα τελικά μέγιστα φορτία για τις περιπτώσεις αυξημένης ακτίνας εμποτισμού θα μπορούσαν να φτάσουν σε μεγαλύτερες τιμές, όπως απεικονίζεται στο Παράρτημα. Κατά συνέπεια, αναμένετε να προκληθεί εκτεταμένη βλάβη τόσο στον πυρήνα όσο και στις εξωτερικές πολυμερικές στρώσεις, σε υψηλότερες εφαρμοζόμενες δυνάμεις, πριν από τη θραύση του ενθέτου εάν αυτή εμφανιστεί.

5. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύννησε τον ρόλο της γεωμετρίας και των σχεδιαστικών παραμέτρων των ενθέτων σε σύνθετες δομές τύπου σάντουιτς, με στόχο την κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας και την ποσοτικοποίηση της σχέσης των γεωμετρικών μεταβολών με τις ιδιότητες αντοχής και ακαμψίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επίδραση της ακτίνας εμποτισμού στην κατανομή των τάσεων και στην εξέλιξη των μηχανισμών αστοχίας, όπως αποτυπώθηκε μέσω των μεθόδων παρακολούθησης (π.χ. ακουστικές εκπομπές και καταγραφή ακαμψίας), προκειμένου να διαμορφωθεί ένα αξιόπιστο πλαίσιο για τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό και την πρόβλεψη της λειτουργικής συμπεριφοράς των συστημάτων ενθέτων εντός σύνθετων πάνελ.

- **Κατανομή τάσεων και σχεδιαστικές παράμετροι**

Η διαμόρφωση της γεωμετρίας των ενθέτων και του συνολικού συστήματος, επηρεάζει άμεσα την κατανομή των τάσεων στη ζώνη επαφής, διαμορφώνοντας τόσο την τοπική όσο και τη συνολική μηχανική απόκριση της σύνδεσης.

- **Σχέση ακτίνας εμποτισμού, μέγιστου φορτίου και δυσκαμψίας**

Η αύξηση της διαμέτρου κόλλησης επιφέρει στατιστικά σημαντική βελτίωση στα μέγιστα ανεκτά φορτία, ταυτόχρονα με μείωση της

μετατόπισης στο κρίσιμο φορτίο, στοιχείο που υποδεικνύει ενισχυμένη δυσκαμψία.

- **Μεταβολή μηχανισμών αστοχίας**

Η διεύρυνση της επιφάνειας κόλλησης προκαλεί ανακατανομή των τάσεων, η χαλάρωση στον κυψελοειδή πυρήνα λόγω μεγαλύτερης επιφανείας κατανομής τάσεων, ακολουθείτε από αύξηση των τάσεων στη φλάντζα του ενθέτου, οδηγώντας σε μετάβαση από λυγισμό και θραύση του πυρήνα με ταυτόχρονη πλαστική παραμόρφωση και αποκόλληση των σύνθετων στρώσεων σε απότομη θραύση του πέλματος του ενθέτου.

- **Διάγνωση και παρακολούθηση μέσω Ακουστικών Εκπομπών και καταγραφής δυσκαμψίας**

Η συνδυαστική χρήση μεθόδων ΑΕ και παρακολούθησης της υποβάθμισης της δυσκαμψίας επιτρέπει ακριβή χρονολόγηση και κατηγοριοποίηση των φάσεων βλάβης, εξασφαλίζοντας υψηλή αξιοπιστία στον εντοπισμό και στη διακριτή ανάλυση των μηχανισμών αστοχίας.

- **Συσχέτιση πειραματικών αποτελεσμάτων με μηχανισμούς βλάβης**

Κάθε χαρακτηριστική αλλοίωση στα διαγράμματα Δύναμης–Μετατόπισης, Δυσκαμψίας και πλάτους ΑΕ αναγνωρίζεται και ερμηνεύεται σε σχέση με συγκεκριμένους μηχανισμούς βλάβης και συνθήκες φόρτισης, επιτρέποντας την ακριβή χαρτογράφηση της εξέλιξης των αστοχιών.

Αυτή η πειραματική ανάλυση ενισχύει την κατανόησή της συμπεριφοράς των συστημάτων ενθέτων-σύνθετου πάνελ, διευκολύνοντας τη παρακολούθηση και πρόγνωση της απόκρισης αυτών καθ'όλη την διάρκεια λειτουργίας τους.

Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνα

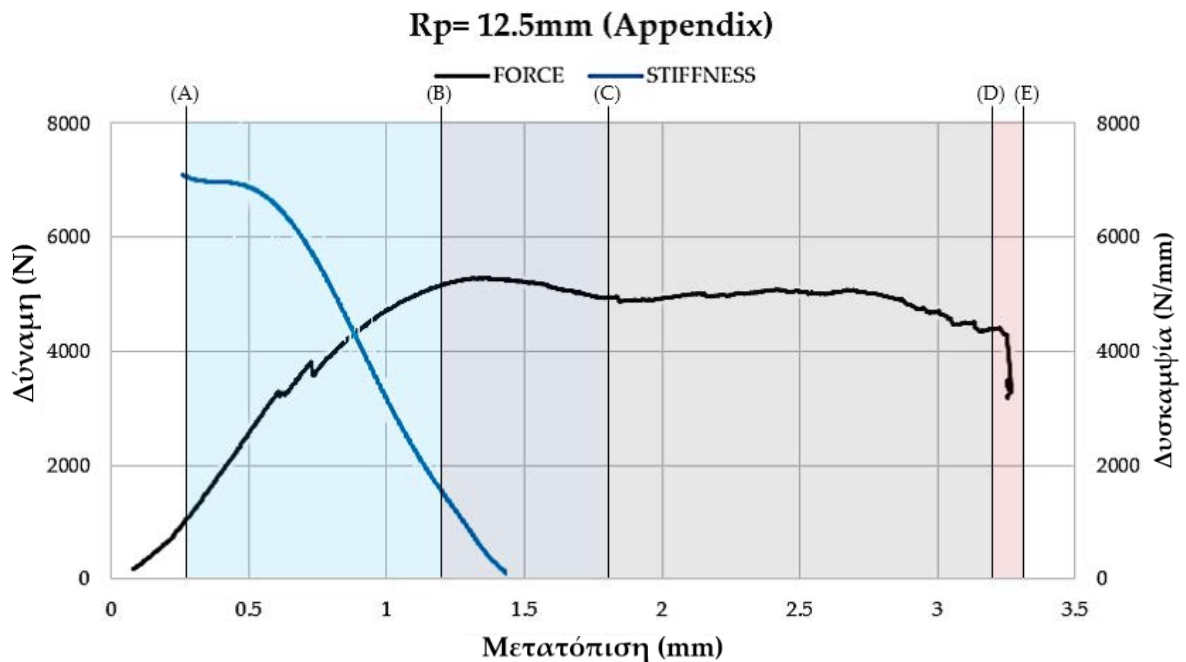
Κατά την έκταση της μελέτης, ο μηχανισμός αστοχίας και η μηχανική απόκριση υπό στατικά φορτία έλξης καταγράφηκαν και αναλύθηκαν με συστηματικό τρόπο ως συνάρτηση της ακτίνας εμποτισμού.

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως πέραν μιας κρίσιμης ακτίνας κόλλησης, η απόκριση του συστήματος διέπεται από την αντοχή σε θραύση του πέλματος των ενθέτων. Συνεπώς, οποιαδήποτε αύξηση στην ακτίνα καμπυλότητας ή/και στο πάχος της φλάντζας θα μπορούσε να επηρεάσει τα μέγιστα φορτία έλξης και τη συνολική μηχανική συμπεριφορά του συγκροτήματος, όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα.

Μελλοντικές εργασίες μπορούν να διερευνήσουν την επίδραση της εφαρμογής μεγαλύτερων ακτινών καμπυλότητας στη μηχανική απόδοση και τους μηχανισμούς αστοχίας σε συνθήκες κυκλικού φορτίου κόπωσης. Επιπλέον, η συνδυαστική εξέταση στατικών και κυκλικών τύπων φόρτισης θα επέτρεπε την αξιολόγηση της παραμένουσας αντοχής του συστήματος, επιτρέποντας έτσι μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της μακροπρόθεσμης ανθεκτικότητας και διάρκειας ζωής του συστήματος.

Παράρτημα

Ένα επιπλέον πείραμα, πέραν όσων έχουν ήδη παρουσιαστεί, διεξήχθη χρησιμοποιώντας ακτίνα τοποθέτησης 12,5 mm και ένθετο παχύτερου πέλματος ώστε να προσδιοριστεί η ακολουθία με την οποία οι μηχανισμοί αστοχίας και η μηχανική απόκριση διαδίδονται όταν η διατμητική αστοχία της φλάντζας του ενθέτου δεν αποτελεί πλέον τον περιοριστικό παράγοντα. Παρόλο που έλαβε μέρος μόνο ένα δείγμα, και επομένως τα αριθμητικά δεδομένα στερούνται στατιστικής βεβαιότητας, η προκύπτουσα καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και το μοτίβο αστοχίας παρέχουν χρήσιμες ποιοτικές πληροφορίες. Αυτά τα ευρήματα, αν και προκαταρκτικά, αποτελούν τη βάση για πιο εκτεταμένες μελλοντικές μελέτες με στόχο την αριθμητική ποσοτικοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

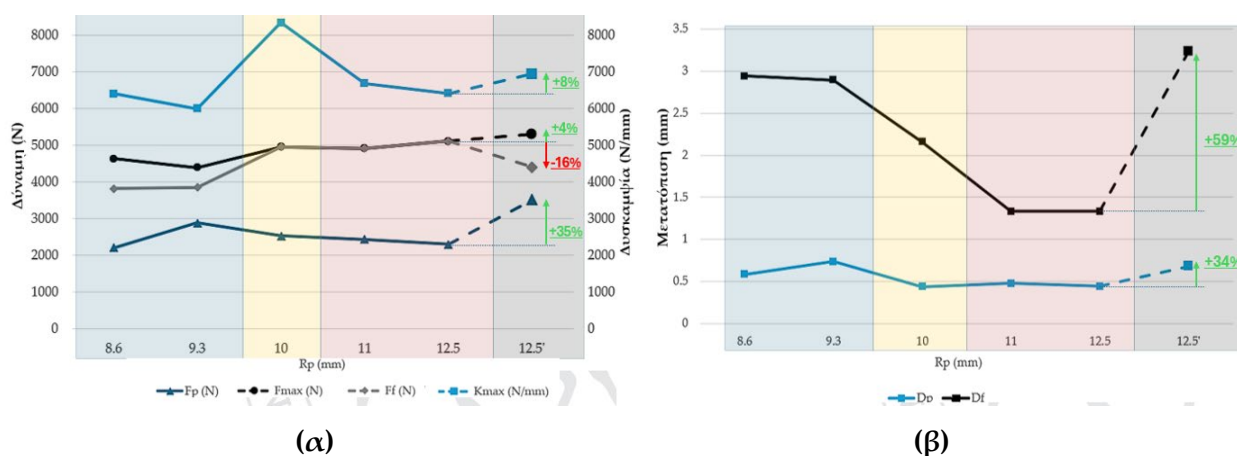


Σχήμα 18. Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για $R_p=12,5$ mm με ενισχυμένο πέγμα ενθέτου.

Η ανάλυση της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 18 αποκαλύπτει ότι η εξέλιξη της αστοχίας ακολουθεί το μοτίβο που εμφανίζεται τόσο για την ελάχιστη (8,6mm) όσο και για τη μέση ακτίνα (9,3mm) κόλλησης, το οποίο εμφανίζει τέσσερις υποπεριοχές. Αρχικά, η συμπεριφορά είναι γραμμική, μέχρι τον λυγισμό και τη αστοχία του πυρήνα που οδηγούν σε μείωση της συνολικής ακαμψίας. Ακολουθεί μια περιοχή σταθερού πλατό δύναμης που συνοδεύεται από, την τρίτη υποπεριοχή, με την εμφάνιση κυματομορφής της δύναμης και τη διάδοση μικρορωγμών των σύνθετων επιστρώσεων. Τελικά, λαμβάνει μέρος η αποκόλληση της σύνθετης επιδερμίδας, η οποία αποτελεί τη τελική αστοχία.

Τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται από τη λεπτομερή συμπεριφορά του μηχανισμού και τρόπου αστοχίας που συζητήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι σε αυτή τη δοκιμή δεν παρατηρείται διατμητική αστοχία της φλάντζας του ενθέτου. Αυτό είναι εμφανές λόγω της αστοχίας της πολυμερικής επίστρωσης και της μη μηδενικής υπολειπόμενης αντοχής έπειτα της τελικής αστοχίας. Στην περίπτωση όπου η ρήξη του πέλματος ήταν το κύριο αίτιο αστοχίας, το φορτίο μετά την αστοχία θα είχε μειωθεί σε τιμές πλησίον του μηδενός, όπως τεκμηριώθηκε παραπάνω.

Η μηχανική απόκριση του συστήματος παρουσιάζεται στα Σχήματα 19α και β σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μελέτες περιπτώσεων. Οι τροποποιήσεις της γεωμετρίας του ενθέτου άλλαξαν όχι μόνο τον τρόπο εξέλιξης της αστοχίας αλλά επηρέασαν και τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος.



Σχήμα 19. (α), (β) Πειραματικά αποτελέσματα για $R_p = 12,5$ mm με ενισχυμένο πέλμα ενθέτου.

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν πως το φορτίο στο οποίο ο πυρήνας αρχίζει να αστοχεί (F_p), λόγω λυγισμού και επακόλουθης θραύσης των τοιχωμάτων των κελίων, αυξάνεται κατά 18,1% σε σχέση με την τυπική ακτίνα εμποτισμού (R_p) (βλ. Σχήμα 19α).

Επιπλέον, το μέγιστο φορτίο (F_{max}) αυξάνεται κατά 17,2% και 3,5% σε σύγκριση με $R_p = 9,3$ mm και $R_p = 12,5$ mm, αντίστοιχα. Αυτή η αύξηση αναμένεται, καθώς το μέγιστο φορτίο πλέον καθορίζεται από την απόκριση του συνολικού συστήματος και δεν περιορίζεται από τη θραύση της φλάντζας του ενθέτου (Σχήμα 19α).

Αντίθετα, το τελικό φορτίο αστοχίας (F_f) παρουσιάζει μείωση της τάξης του 16,1% σε σχέση με την περίπτωση $R_p = 12,5$ mm και συμφωνεί με τις τιμές που παρατηρήθηκαν για $R_p = 8,6$ mm και 9,3 mm. Αυτή η συμπεριφορά της πτώσης φέροντος φορτίου έπειτα της καταγραφής μέγιστης δύναμης

οφείλετε στην μικρορωγμάτωση των σύνθετων στρώσεων, φαινόμενο που όπως είναι λογικό υποβαθμίζει την ικανότητα αντίστασης του συστήματος (βλ. Σχήμα 19α).

Η ακαμψία επίσης, αυξάνετε με την ενίσχυση της φλάντζας του ενθέτου, παρουσιάζοντας αύξηση 7,7% σε σχέση με τον σχεδιασμό ενθέτου $R_p = 12,5 \text{ mm}$ με τυπικό πάχος πέλματος. Αυτή η βελτίωση αντικατοπτρίζει τη αυξημένη ακαμψία που παρέχεται εξαιτίας της παχύτερης φλάντζας ένθετου, η οποία συμβάλλει άμεσα στη συνολική ακαμψία του συστήματος (Σχήμα 19α).

Η μετατόπιση την στιγμή αστοχίας του πυρήνα (D_p) στη περίπτωση του ενισχυμένου πέλματος παραμένει σε συγκρίσιμη τιμή με αυτή των συστημάτων που παρουσιάζουν το ίδιο μοτίβο διάδοσης αστοχίας (8,6mm και 9,3mm), ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί πως η D_p αυξάνεται κατά 34,7% συγκριτικά με την περίπτωση της $R_p = 12,5 \text{ mm}$ με τυπικό πάχος πέλματος (Σχήμα 19b).

Επιπλέον, η μετατόπιση την στιγμή της αστοχίας (D_i) αυξάνεται σημαντικά κατά 58,8% σε σύγκριση με την ίδια ακτίνα τοποθέτησης 12,5 mm. Αυτή η σημαντική αύξηση μπορεί να αποδοθεί στη μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας, από την θραύση του ενθέτου σε μια πιο όλκιμη, βαθμιδωτή εξέλιξη βλάβης υποσυστημάτων, η οποία επιτρέπει στο σύστημα να παραλάβει μεγαλύτερη παραμόρφωση πριν από την ολική κατάρρευση. Επιπλέον, το ενισχυμένο σύστημα $R_p = 12,5 \text{ mm}$ παραμορφώνεται 10,4% περισσότερο από την τυπική ακτίνα κόλλησης (9,3 mm), (Σχήμα 19b).

Συλλογικά, τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν την αρχική υπόθεση πως ένθετο με αυξημένο πάχος πέλματος, μπορεί να μεταβάλλει τη μηχανική απόκριση του συστήματος σε μεγαλύτερες ακτίνες εμποτισμού. Αν και ο πρωταρχικός στόχος της μελέτης δεν ήταν η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ενθέτου για εφαρμογή σε μεγαλύτερες ακτίνες κόλλησης, αλλά η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η απόκριση ενός τυπικά σχεδιασμένου συστήματος μεταβάλλεται συναρτήσει της ακτίνας εμποτισμού, τα αποτελέσματα επιδεικνύουν πως μια πάχυνση του πέλματος, μπορεί να μεταβάλει τον μηχανισμό και το μοτίβο αστοχίας προς αυτό της προοδευτικής βλάβης. Κατά συνέπεια, αυτή η βελτιωμένη διαμόρφωση της γεωμετρίας του ενθέτου αξίζει περαιτέρω διερεύνηση σε μελλοντική εργασία με στόχο στην εξισορρόπηση της δομικής ανθεκτικότητας με τους πρακτικούς σχεδιαστικούς περιορισμούς.

Ευχαριστίες: Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν την ANALYSIS Ltd για την τεχνική της υποστήριξη στην κατασκευή των σύνθετων δειγμάτων, η οποία συνέβαλε στην επιτυχία αυτής της έρευνας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Castanie, B.; Bouvet, C.; Ginot, M. Review of Composite Sandwich Structure in Aeronautic Applications. *Composites PartC :Open Access* **2020**, *1*, 100004, doi:10.1016/j.jcomc.2020.100004.
2. Radalytica Honeycomb Inserts Use Case.
3. Manzi S. Insert Design for Sandwich Composite Monocoque. *POLITECNICO DI TORINO* **2020**.
4. Relea, E.; Weiss, L.; Kussmaul, R.; Zogg, M.; Ramstein, G.; Wegener, K. Precisely Adjustable Inserts for Stiffness-Driven CFRP Sandwich Structures. *Procedia CIRP* **2017**, *66*, 294–299, doi:10.1016/j.procir.2017.03.175.
5. Bianchi, G; Aglietti, Guglielmo Optimization of Bolted Joints Connecting Honeycomb Panels.; Richardson, Guy.
6. Slimane, S.; Kebdani, S.; Boudjemai, A.; Slimane, A. Effect of Position of Tension-Loaded Inserts on Honeycomb Panels Used for Space Applications. *Int J Interact Des Manuf* **2018**, *12*, 393–408, doi:10.1007/s12008-017-0383-2.
7. Demelio, G.; Genovese, K.; Pappalettere, C. An Experimental Investigation of Static and Fatigue Behaviour of Sandwich Composite Panels Joined by Fasteners. *Composites Part B: Engineering* **2001**, *32*, 299–308, doi:10.1016/S1359-8368(01)00007-5.
8. FASTFIX TECHNOLOGY Fastener Solutions for Composites 2014.
9. Budhe, S.; Banea, M.D.; De Barros, S. Bonded Repair of Composite Structures in Aerospace Application: A Review on Environmental Issues. *Appl Adhes Sci* **2018**, *6*, 3, doi:10.1186/s40563-018-0104-5.
10. Seemann, R.; Krause, D. Numerical Modelling of Partially Potted Inserts in Honeycomb Sandwich Panels under Pull-out Loading. *Composite Structures* **2018**, *203*, 101–109, doi:10.1016/j.compstruct.2018.07.028.
11. Wolff, J.; Brysch, M.; Hühne, C. Validity Check of an Analytical Dimensioning Approach for Potted Insert Load Introductions in Honeycomb Sandwich Panels. *Composite Structures* **2018**, *202*, 1195–1215, doi:10.1016/j.compstruct.2018.05.105.

12. De Dios Rodríguez-Ramírez, J.; Castanié, B.; Bouvet, C. Insert of Sandwich Panels Sizing through a Failure Mode Map. *Composite Structures* **2020**, *234*, 111724, doi:10.1016/j.compstruct.2019.111724.
13. Qi, G.; Chen, Y.-L.; Rauschen, P.; Schröder, K.-U.; Ma, L. Characteristics of an Improved Boundary Insert for Sandwich Panels with Lattice Truss Cores. *Aerospace Science and Technology* **2020**, *107*, 106278, doi:10.1016/j.ast.2020.106278.
14. Raghu, N.; Battley, M.; Southward, T. Strength Variability of Inserts in Sandwich Panels. *Jnl of Sandwich Structures & Materials* **2009**, *11*, 501–517, doi:10.1177/1099636209104524.
15. Dumitrescu, A.; Walker, S.J.I.; Romei, F.; Bhaskar, A. Design and Structural Testing of 3D Printed Honeycomb Cores with Optimised Integrated Blended Inserts. *Jnl of Sandwich Structures & Materials* **2024**, *26*, 586–605, doi:10.1177/10996362231210961.
16. Lohuis, D.; Traub, H.; Hühne, C. Mechanical Testing of Threaded Inserts for Additively Manufactured Sandwich Panels with Gyroid Core Structures. *Results in Materials* **2024**, *21*, 100543, doi:10.1016/j.rinma.2024.100543.
17. Smith, B.; Banerjee, B. Reliability of Inserts in Sandwich Composite Panels. *Composite Structures* **2012**, *94*, 820–829, doi:10.1016/j.compstruct.2011.10.018.
18. Non-Destructive Testing Blog Acoustic Emission Testing: A COMPLETE Guide 2023.
19. Griffin, C.; Giurgiutiu, V. Piezoelectric Wafer Active Sensor Transducers for Acoustic Emission Applications. *Sensors* **2023**, *23*, 7103, doi:10.3390/s23167103.
20. Kwon, D.-J.; Park, J.; Yoo, H.-M. Enhanced Mechanical Joining between Carbon-Fiber- Reinforced Plastic and Steel Plates Using the Clearance-Filling Effect of Structural Adhesive. *Applied Sciences* **2023**, *13*, 4332, doi:10.3390/app13074332.
21. Boukharouba, W.; Bezazi, A.; Scarpa, F. Identification and Prediction of Cyclic Fatigue Behaviour in Sandwich Panels. *Measurement* **2014**, *53*, 161–170, doi:10.1016/j.measurement.2014.03.041.
22. Burchardt, C. Fatigue of Sandwich Structures with Inserts. *Composite Structures* **1997**, *40*, 201–211, doi:10.1016/S0263-8223(98)00156-1.
23. Bianchi, G.; Aglietti, G.S.; Richardson, G. Static Performance of Hot Bonded and Cold Bonded Inserts in Honeycomb Panels. *Jnl of Sandwich Structures & Materials* **2011**, *13*, 59–82, doi:10.1177/1099636209359840.

24. Formiga, J.; Sousa, L.; Infante, V. Numerical and Experimental Analysis of the Suspension Connection Zone of a Formula Student Monocoque Chassis. *ScienceDirect* **2019**, *17*, 886–893.
25. Silva, J.K.F.; Lameiras, R.D.M. Experimental Analysis of the Mechanical Behavior of Shear Connectors for Precast Sandwich Wall Panels When Subjected to the Push-Out Tests. *Buildings* **2024**, *14*, 3246, doi:10.3390/buildings14103246.
26. Shi, H.; Liu, W.; Fang, H. Damage Characteristics Analysis of GFRP-Balsa Sandwich Beams under Four-Point Fatigue Bending. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **2018**, *109*, 564–577, doi:10.1016/j.compositesa.2018.04.005.
27. Han, X.; Cai, H.; Sun, J.; Wei, Z.; Huang, Y.; Wang, A. Numerical Studies on Failure Mechanisms of All-Composite Sandwich Structure with Honeycomb Core under Compression and Impact Loading Conditions. *Polymers* **2022**, *14*, 4047, doi:10.3390/polym14194047.
28. ECSS – European Cooperation for Space Standardization *Space Engineering Insert Design Handbook*; 2011.
29. CMH Types of Inserts Used in Composite Materials Laminates.
30. Jen, Y.-M.; Teng, F.-L.; Teng, T.-C. Two-Stage Cumulative Bending Fatigue Behavior for the Adhesively Bonded Aluminum Honeycomb Sandwich Panels. *Materials & Design (1980-2015)* **2014**, *54*, 805–813, doi:10.1016/j.matdes.2013.09.010.
31. IOWA STATE UNIVERSITY Center for Nondestructive Evaluation Acoustic Emission Testing.
32. ONESTOP NDT Acoustic Emission Testing: A Comprehensive Overview.
33. Stress Engineering Services INC An Overview on Acoustic Emission Testing.
34. Brunner A.J.; Bohse J. Acoustic Emission Standards and Guidelines 2002: A Comparative Assessment and Perspectives. **2002**, 7.