

# Ανάλυση υβριδικών συνδέσεων με σύνθετα υλικά – Προηγμένες τεχνολογίες για την ενίσχυση των συνδέσεων με τη χρήση της μεθόδου Micro-Pinning



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής

Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής και Ταλαντώσεων

Σπουδαστική Εργασία

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωστόπουλος Βασίλειος

Επιβλέπων Ερευνητής: Σαραντινός Νικόλαος

Κοτσαρίνης Νικόλαος, Α.Μ.: 246953



## Εισαγωγή - Σκοπός

Η χρήση των σύνθετων υλικών στα αεροσκάφη νέας γενιάς, αυξάνεται ολοένα και περισσότερο λόγω των υψηλών ειδικών ιδιοτήτων και του χαμηλού κόστους λειτουργίας που προσφέρουν. Οι κατασκευαστές δίνουν έμφαση στον σχεδιασμό με ανοχή σε βλάβη έχοντας ως στόχο την ασφάλεια και το χαμηλό κόστος λειτουργίας. Οι συνδέσεις αποτελούν κρίσιμο κομμάτι των σύνθετων κατασκευών και γι' αυτό σχεδιάζονται με ανοχή σε βλάβη είτε ενισχύοντας τις εισαγωγές παχιές στρώσεις ρητίνης ή προσθέτοντας θερμοπλαστικούς ή ελαστικούς κόκκους ενισχύοντας την ενδιάμεση φάση μεταξύ ινών – μήτρας είτε ενισχύοντας τις με ίνες ή ράβδους κατά το πάχος. Τομές στους οποίους χρησιμοποιούνται οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών εκτός από την αεροναυπηγική και την αεροδιαστημική είναι η ναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ιατρική, οι κατασκευές, η ηλεκτρονική, ο αθλητισμός και η ενέργεια.

Σκοπός της εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση των συνδέσεων που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες κατασκευές εστιάζοντας κυρίως στις συνδέσεις με κόλλα. Παρόλο που οι συνδέσεις με κόλλα παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα, οι τιμές των ιδιοτήτων κατά το πάχος της σύνδεσης είναι αρκετά χαμηλές. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ενίσχυση των υβριδικών συνδέσεων με κόλλα κατά το πάχος με την χρήση της μεθόδου Micro-Pinning, δημιουργώντας προεξοχές στην επιφάνεια του υποστρώματος οι οποίες βελτιώνουν τις ιδιότητες της σύνδεσης εκτός επιπέδου ενώ ταυτόχρονα λειτουργούν σαν μηχανισμοί επιβράδυνσης της διάδοσης των ρωγμών. Αναπόσπαστο κομμάτι της ανάλυσης υβριδικών συνδέσεων είναι η χρήση της συνεκτικής ζώνης μοντελοποίησης με τη βοήθεια της οποίας μελετάται η έναρξη και της διάδοσης της βλάβης μέσα στο υλικό.

## Ενίσχυση των συνδέσεων κατά το πάχος με χρήση της μεθόδου Micro-Pinning (TTR)

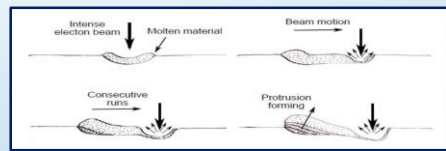
Παρόλο που τα σύνθετα υλικά προσφέρουν αυξημένες in - plane ιδιότητες, στις co - cured δομές οι ιδιότητες κατά το πάχος (out - of - plane) είναι ιδιαίτερα χαμηλές με αποτέλεσμα σε συνδέσεις να συμβαίνουν διαστρωματικές αποκολλήσεις και διαχωρισμοί των skin stiffeners ακόμα και σε χαμηλά φορτία. Διάφορες τεχνικές ενίσχυσης των συνδέσεων που βελτιώνουν τις out - of - plane ιδιότητες είναι:

- Χρήση θερμοπλαστικών φύλλ (thermoplastic film interleaving)
- Χρήση σκληρών ρητίνων (toughened resins)
- Επιφανειακή επεξεργασία των ινών (fiber surface treatment)
- Ενίσχυση κατά το πάχος (Through - thickness - reinforcement ή TTR) όπως η τρισδιάστατη ύφανση, το ράφιμο, το πλέξιμο και η εισαγωγή ινών κατά το πάχος.

### Υβριδικές συνδέσεις μετάλλου – σύνθετου με Micro - Pins

Η δημιουργία των Micro - Pins γίνεται με τρεις μεθόδους μορφοποίησης της επιφάνειας του μεταλλικού υποστρώματος:

- Δημιουργία pins με τη χρήση Additive Layer Manufacturing (ALM)
- Δημιουργία pins με τη χρήση Surfing - Sculpt
- Δημιουργία pins με τη χρήση Cold Metal Transfer (CMT)



Αναπαράσταση της δημιουργίας των προεξοχών με την τεχνολογία Surfing - Sculpt

### Μηχανισμοί αστοχίας για ένα pin

Για τύπο φόρτισης σε Mode I, η διαδικασία αστοχίας των Z - pins αποτελείται από τρία μέρη:

- Επιμήκυνση του επάνω μέρους του pin
- Σταδιακή αποκόλληση των στρώσεων στη γύρω περιοχή
- Ολίσθηση

Για τύπο φόρτισης σε Mode II, η διαδικασία αστοχίας των Z - pins αποτελείται από τρεις φάσεις και είναι πιο περίπλοκη:

- Το pin έχει αρχικά ελαστική συμπεριφορά
- Το pin κινείται αργά μέσα στο πολυστρώτο (κυρίως στα UD)
- Το pin είτε σπάει κάτω από εφελκυσμό ή εξολύεται

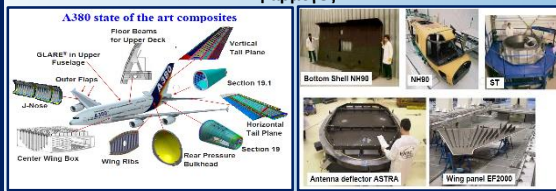
## Συνδέσεις στις σύγχρονες κατασκευές

### Μηχανική σύνδεση

- Δεν απαιτείται ειδική προετοιμασία της επιφάνειας σύνδεσης
- Εύκολη αποσυναρμολόγηση
- Εύκολος έλεγχος
- Αυξάνουν αρκετά το βάρος των κατασκευών
- Παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων λόγω των οπών



## Εφαρμογές



## Σύνδεση με κόλλα

- Ικανότητα παραλαβής φορτίων λόγω ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου σε μεγάλη επιφάνεια (αναπτύσσονται μικρότερες τάσεις)
- Κατάλληλες για συνένωση ανόμοιων υλικών
- Καταλαμβάνουν μικρότερο βάρος σε σχέση με τις μηχανικές συνδέσεις
- Δημιουργούν αποδεκτές τάσεις λόγω διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής των συνδεόμενων υλικών
- Δεν υπάρχει δυνατότητα αποσυναρμολόγησης
- Ευαίσθητες σε τάσεις αποκόλλησης
- Επηρεάζονται αρκετά από περιβαλλοντικούς παράγοντες

## Τρόποι αστοχίας:

Οι τρόποι αστοχίας στις συνδέσεις με κόλλα διακρίνονται σε:

- Adhesive failure
- Cohesive failure
- Adherend failure



Adhesive failure



Cohesive failure



Adherend failure

## Προσεγγιστικές θεωρίες για την ανάλυση της αστοχίας:

Οι θεωρίες προσέγγισης που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της αστοχίας σε συνδέσεις με κόλλα είναι οι εξής:

- Μηχανική του συνεχούς μέσου
- Θραυστομηχανική
- Μηχανική της βλάβης
- Μέθοδος των εξελιγμένων πεπερασμένων στοιχείων

## Διάφορα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των συνδέσεων:

- Tsai - Hill
- Hashin
- Tsai - Wu
- Puck

Συμπεραίνεται ότι η μηχανική της βλάβης είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος για την προσέγγιση του τρόπου αστοχίας σε συνδέσεις με κόλλα διότι ενσωματώνει την έναρξη και τη διάδοση της βλάβης στο ίδιο μοντέλο, δεν απαιτεί προκαθορισμό αρχικής ρωγμής, έχει πολύ καλή ακρίβεια, είναι κατάλληλη τόσο για όλκιμα όσκα και για ψαθυρά υλικά και χρησιμοποιείται και για στοιχεία όγκου και για στοιχεία διεπιφανείας. Ως κριτήριο αστοχίας προτιμάται το Puck γιατί λαμβάνει υπ' όψιν τον τρόπο αστοχίας του σύνθετου υλικού.

## Συνεκτική ζώνη μοντελοποίησης (CZM)

Η θεωρία της συνεκτικής ζώνης μοντελοποίησης χρησιμοποιείται για την ανάλυση της έναρξης και διάδοσης της ρωγμής κάτω από στατικά φορτία. Σύμφωνα με αυτή την θεωρία, η θραύση θεωρείται σαν ένα σταδιακό φαινόμενο στο οποίο συμβαίνει διαχωρισμός μεταξύ δύο γειτονικών φανταστικών επιφανειών κατά μήκος της ακμής της ρωγμής και αντιστέκεται από την παρούσα συνεκτικών δυνάμεων.

### Νόμοι έλξης - διαχωρισμού:

Η σχέση μεταξύ της επιφάνειας έλξης και διαχωρισμού ονομάζεται νόμος έλξης - διαχωρισμού (Traction - Separation Law). Υπάρχουν αρκετοί νόμοι έλξης - διαχωρισμού αλλά όλοι παρουσιάζουν συνολικά την ίδια συμπεριφορά. Στη μοντελοποίηση η συνεκτική σχέση είναι ένας νόμος που περιγράφει την προευνετική βλάβη του υλικού, μειώνοντας την δυσκαμψία σταδιακά μέχρι την τελική αστοχία όπου γίνεται μηδενική.

### Παράμετροι που επηρεάζουν την CZM

- Μορφή συνεκτικού νόμου
- Μέγιστη δύναμη έλξης
- Μετατόπιση κρίσιμου ανοίγματος και κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας
- Διατμητικές συνιστώσες του κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας και της μέγιστης συνεκτικής δύναμης.

### Αναφορές:

- AMTAS, Advanced Materials in Transport Aircraft Structures, Overview of Advanced Composite Materials and Structures
- BIANCHI FRANCESCO, NUMERICAL MODELLING OF THROUGH-THICKNESS REINFORCED STRUCTURAL JOINTS, 2012