

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

"ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΟΠΕΣ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΒΛΑΣΣΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΑΝ/ΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΡΑΥΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012 ΑΘΗΝΑ

EMK ME 2012/07

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΟΠΕΣ"

ΒΛΑΣΣΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΑΝ/ΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΡΑΥΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ.Ι.Ραυτογιάννη στα πλαίσια της λήψης του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην κατεύθυνση του Δομοστατικού Σχεδιασμού και Ανάλυσης Κατασκευών από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβείου Πολυτεχνείου.

Η εργασία παρουσιάστηκε στις 25/10/2012 στο τμήμα ενώπιον τριμελούς εξεταστικής επιτροπής η οποία αποτελείτο από τους κ.κ

1. Ραυτογιάννη Ιωάννη Επίκουρο Καθηγητή

- 2. Ιωαννίδη Γεώργιο Καθηγητή
- 3. Αβραάμ Τάσο Λέκτορα

τους οποίους και ευχαριστώ για τη βοήθειά τους και ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή, χωρίς τον οποίο θα ήταν αδύνατη η εκπόνηση της εργασίας μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύνθετα υλικά έχουν κατά μεγάλο μέρος κυριαρχήσει στη βιομηχανία υλικών τόσο ως βελτιωτικά των φυσικών υλικών όσο και, το σημαντικότερο, ως πρόσθετα υψηλής μηχανικής και ανθεκτικά στην υγρασία που μπορούν να παραχθούν σε πολλές εύχρηστες μορφές.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των inclusions στη συμπεριφορά σύνθετων υλικών με κυκλική οπή. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε αφορούσε μόνο την περίπτωση που η φόρτιση είναι παράλληλη στο επίπεδο του σύνθετου υλικού, κατά την κύρια διεύθυνση x ώστε στο σύνορο της οπής να εφαρμόζονται οι μεγαλύτερες δυνατές τάσεις. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από υλικό Scotchply 1002: [0/45/90/-45]_s, [0/30/90/-30]_s, [0/60/90/-60]_s, [0₈], και [0₂/90₂]_s.Για το σκοπό αυτό έγινε η προσομοίωση του διαστρωματωμένου υλικού στο πρόγραμμα Sofistik. Με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση. Κατόπιν έγινε η σύγκριση των εντατικών καταστάσεων σε ακέραια δοκίμια σύνθετου υλικού υποβαλλόμενα σε εφελκυσμό με εκείνες στα αντίστοιχα δοκίμια που διαθέτουν κυκλική οπή και κατόπιν πλήρωση με inclusion. Τέλος ελέγχεται η αποκατάσταση αυτών των τάσεων σε σχέση με τις τάσεις του ακέραιου δοκιμίου.

Η αναγκαιότητα και η σκοπιμότητα αυτής της μελέτης πηγάζει από την επιδίωξη βελτιστοποίησης της συμπεριφοράς των διάτρητων διαστρωματώσεων χρησιμοποιώντας inclusions. Η αεροναυπηγική και η ναυτιλία επιβάλλουν τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών με πυρήνα, είτε εξ αρχής είτε να καθίσταται ανάγκη για δημιουργία πυρήνα αργότερα. Μια βλάβη ενός σύνθετου υλικού μπορεί να είναι συνδυασμός από θραύση ινών, αποκόλληση στρώσεων, και κατά μήκος διαχωρισμός των ινών. Συχνά για να γίνει αποκατάσταση του υλικού, γίνεται αποκοπή της περιοχής που έχει υποστεί βλάβη και αντικατάσταση από inclusion. Κατηγοριοποιούνται οι τύποι βλαβών του σύνθετου υλικού και εξετάζονται οι τρόποι αντιμετώπισης αυτών.

Γίνεται αναφορά στη διαδικασία και μεθόδους σχεδιασμού. Στη συνέχεια αναλύονται οι διαδικασίες παραγωγής των σύνθετων υλικών, καθότι η παραγωγή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος των ινών και του συνδετικού υλικού η θερμοκρασία που απαιτείται για το σχηματισμό τμήματος και το απαιτούμενο κόστος. Η επεξεργασία των πολυμερών συνδετικών περιλαμβάνει την τοποθέτηση των ινών στο εκμαγείο κατά τον επιθυμητό προσανατολισμό, τον εμποτισμό των ινών με ρητίνες, τη στερεοποίηση των εμποτισμένων ινών και απομάκρυνση του περιττού όγκου ρητινών, του αέρα και των υπόλοιπων πτητικών ουσιών. Μετά τη στερεοποίηση του πολυμερούς ακολουθούν η εξαγωγή από το εκμαγείο και οι τελικές διεργασίες όπως αυτή του φινιρίσματος.

Αναλυτικά εξετάζεται η αντοχή διάτρητων διαστρωματώσεων με ελλειπτική οπή. Η κατανομή τάσεων των τελευταίων είναι επαλληλία τάσεων που οφείλονται στο ομοιόμορφο πεδίο τάσεων και εκείνων που οφείλονται στην οπή του υλικού. Η πρόβλεψη της αντοχής των σύνθετων υλικών είναι δυνατή. Επιτυγχάνεται με την χρήση της μεθόδου "first ply failure" που εφαρμόζεται κατά μήκος του περιγράμματος μιας έλλειψης με αξονική μετατόπιση εν συγκρίσει με την οπή. Επίσης αναφέρονται οι σχέσεις για υπολογισμό τάσεων σε διαστρωματώσεις με πλήρωση οπής. Γίνεται σύγκριση των inclusion για διαφορετικά υλικά.

Σχετικά με τη δομή της διατριβής, αυτή διαμερίζεται σε επτά Κεφάλαια, τα οποία χωρίζονται σε κατάλληλες ενότητες, υποενότητες και παραγράφους. Συνοπτικά περιγράφεται το περιεχόμενο κάθε Κεφαλαίου στις παρακάτω γραμμές:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται η Εισαγωγή, μια σύντομη ιστορική αναδρομή και αναφορά σε βασικές έννοιες των σύνθετων υλικών. Ακολουθεί η κωδικοποίηση και κατηγοριοποίησή τους και γίνεται λόγος για τη λειτουργία των τμημάτων από τα οποία αποτελούνται: ίνες και συνδετικό υλικό. Κατόπιν αναφέρονται οι διαδικασίες σχεδιασμού και παραγωγής αυτών.

Στο Κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο περί σύνθετων υλικών, το γενικευμένο νόμο του Hooke και τις μηχανικές σταθερές. Εξετάζεται η επίπεδη εντατική κατάσταση για τετραγωνικώς συμμετρικό και για ισότροπο υλικό. Ακολουθούν ο μετασχηματισμός τάσεων και παραμορφώσεων. Κατόπιν ο μετασχηματισμός όρων ακαμψίας και ευκαμψίας. Το κεφάλαιο κλείνει με τον προσδιορισμό των μηχανικών σταθερών του υλικού.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας: μεγίστης τάσης, μεγίστης παραμόρφωσης, Tsai-Hill και Tsai-Wu.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στη μεμβρανική καταπόνηση, το μητρώο [A] που συνδέει μεμβρανικές δυνάμεις και παραμορφώσεις, και τον υπολογισμό αυτού.

Στο Κεφάλαιο 5 εξετάζονται οι διάτρητες διαστρωματώσεις με πλήρωση οπής, όσον αφορά τις χρήσεις και την αντοχή τους. Σε πρώτη φάση γίνεται η εκτίμηση αντοχής για σύνθετα υλικά διάτρητα, και κατόπιν με προσθήκη inclusion.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται ο αναλυτικός υπολογισμός τάσεων για λόγους σύγκρισης των αρχικών δοκιμίων σύνθετου υλικού με τα αντίστοιχα δοκίμια που διαθέτουν κυκλική οπή και εκείνα που έχουν πλήρωση αυτής. Με αυτό τον τρόπο παράλληλα επαληθεύουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό Sofistik το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε.

Στο κεφάλαιο 7 αναφέρεται το είδος των πεπερασμένων στοιχείων και οι εντολές του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν. Περιλαμβάνεται η ανάλυση των ανωτέρω δοκιμίων σύνθετων υλικών υπό ομοιόμορφου εφελκυστικού φορτίου με τη χρήση του Sofistik για τις περιπτώσεις

 $\begin{array}{l} \alpha) \; [0/45/90/-45]_{\rm S} \\ \beta) [0/30/90/-30]_{\rm S} \\ \gamma) [0/60/90/-60]_{\rm S} \\ \overline{\alpha}) [0_8] \\ \epsilon) [0_2/90_2]_{\rm S} \end{array}$

Κατόπιν με σύγκριση των αποτελεσμάτων εξετάζεται η αποτελεσματικότητα των inclusion. Επειδή η αστοχία του υλικού οφείλεται στις τάσεις που αναπτύσσονται πλησίον της οπής εξετάζουμε τις τάσεις αυτές στο ακέραιο υλικό, στο υλικό με οπή και σε εκείνο με inclusion. Παίρνουμε τέσσερις τομές (δυο κατά την κάθετη διεύθυνση και δύο κατά την οριζόντια) στην κρίσιμη για το δοκίμιο περιοχή της οπής και εξετάζουμε την ομοιομορφία τάσεων μέσω διαγραμμάτων. Εξετάζεται πίνακοποίηση των αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

The composite materials have largely predominated in the materials industry both as improvers of the natural materials and, most importantly, as high engineering additives, resistant to moisture that can be produced in many usable forms.

The object of this present paper is the exploration of the inclusions' effectiveness in the behavior of composite materials bearing a circular aperture. The analysis conducted concerned only the case where the load is parallel to the level of the composite material along the principal direction x so that the highest possible stress is applied on the border of the aperture. The test samples used were made of Scotchply 1002: [

0/45/90/-45]_s, [0/30/90/-30]_s, [0/60/90/-60]_s, [0₈] and [0₂/90₂]_s.

To this end, the simulation of the stratified material was conducted using the Sofistik software. Modeling was performed with the use of finite data. Then the stress states of integral composite material test samples subject to tension were compared to those of the respective test samples bearing a circular aperture and then filling with inclusions. Finally, the restoration of these stresses is examined in connection to the stresses of the integral test sample.

The necessity and purpose of the study stems from the aim of optimizing the behavior of the perforated plies using inclusions. Aeronautics and navigation impose the use of fiber reinforced polymers with a cell either from the beginning or later on. A failure of a composite material may be a combination of fiber fracture, ply separation and longitudinal separation of fibers. Often, in order for the material to be restored, the damaged area is cut off and replaced by an inclusion. The types of failures applying to composite materials are categorized and the ways of their treatment are examined.

Reference is made to the design procedures and methods. Then, the production methods of composite materials are analyzed, since the production depends on many factors, such as the type of fiber and binder, the temperature required for the formation of a part as well as the required cost. The process of polymer binders includes the placement of the fibers in the mold in the proper direction, the fiber impregnation with resins, the solidification of the impregnated fibers and removal of the surplus resins, air and other volatile substances. Following solidification of the polymer, extraction from the mold and final processes, such as finishing, is performed.

The resistance of elliptical-aperture perforated plies is analytically examined. The stress distribution of the latter is a sequence of stresses due to the uniform stress field and of those due to the aperture of the material. Predicting the tolerance of composite materials is possible. It is achieved through the "first ply failure" method applied along the outline of an ellipse with axial displacement compared to the aperture. Furthermore, the ratios for the calculation of stresses on aperture-filled plies are mentioned. Inclusions for different materials are finally compared. With reference to the structure of the dissertation, it is divided into seven Chapters, which are further broken down in sections, subsections and paragraphs. Please find below a brief description of the content of each Chapter:

Chapter 1 is an introduction, including a brief history and reference to the basic notions of composite materials. Then follows their codification and categorization, as well as the function of the parts comprising them: fibers and binder. Then, reference is made to the procedures of their design and production.

Chapter 2 includes the necessary theoretical background on composite materials, the general Hooke's law, and mechanical constants. The level stress state for square symmetric and isotropic material is examined. Tension and distortion transformation is then followed by the transformation of stiffness and flexibility terms. The chapter closes with the determination of the mechanical constants of the material.

Chapter 3 presents the widely used failure criteria: maximum stress, maximum distortion, Tsai-Hill and Tsai-Wu.

Chapter 4 refers to membrane stress, the [A] matrix connecting membrane forces and distortions, and calculation thereof.

Chapter 5 examines the aperture-filled perforated plies in terms of their uses and resistance. At first, resistance is assessed for perforated composite materials, and then with the addition of inclusions.

Chapter 6 concerns the detailed calculation of stresses for reasons of comparison of the initial composite material test samples to the corresponding test samples bearing a circular aperture and those bearing a filled one. Thus, the Sofistik generated results, that was used subsequently, are verified at the same time.

Chapter 7 refers to the type of finite data and the software commands used. It also includes the breakdown of the above composite material test samples under uniform tensile load with the use of Sofistik and in the following cases:

- a) [0/45/90/-45]_s
- b) [0/30/90/-30]_s
- c) [0/60/90/-60]_s
- d) [0₈]
- e) [0₂/90₂]s

Then, the results are compared and the inclusions' effectiveness is examined. Given that material failure is due to the stresses developed near the aperture, these stresses are examined on the integral material, on the aperture-bearing material and on the inclusion-bearing one. Four sections are taken (two perpendicular, and two horizontal ones) at the crucial for the test sample area of the aperture and the stress uniformity is examined via diagrams. Finally, the percentage by which these were restored is examined, and the results for all test samples are tabulated.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ii
ПЕРІЛНѰН	iii
ABSTRACT	vi
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	ix
καταλογός σχηματών	xi
καταλογός πινακών	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	1
1.2.1 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ	2
1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	3
1.4 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΛΙΚΑ	3
1.4.1 ΙΝΕΣ	3
1.4.2 ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	4
1.4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	8
1.4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ	14
2.1 ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	15
2.2 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΗΟΟΚΕ	15
2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ	17
2.4 ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	19
2.4.1 ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	19
2.4.2 ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΥΛΙΚΟ	19
2.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	21
2.6 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ	25
2.7 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	27
2.8 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΑΚΑΜΨΙΑΣ Q _{ij}	28
2.9 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ S _{ij}	
2.10 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΥΛΙΚΟΥ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° ΜΕΜΒΡΑΝΙΚΗ ΑΚΑΜΨΙΑ	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° ΔΙΑΤΡΗΤΕΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΛΗΡΩΣΗ ΟΠΗΣ	40
5 .1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΤΡΗΤΩΝ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΩΣΗ ΟΠΗΣ	40
5.2 ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΑΤΡΗΤΩΝ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΩΝ	45
5.2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ	45
5.2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΤΡΗΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	46
5.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΤΡΗΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	48
5.2.4 ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΛΗΡΩΣΗ ΟΠΗΣ	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ	54
A) [0/45/90/-45] _s	54
B)[0/30/90/-30] _s	57
Г)[0/60/90/-60] _s	59
Δ) [0 ₈]	61
E) [0 ₂ /90 ₂] _s	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOFISTIK	64
7.1 ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	64
7.2 ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ SOFISTIK	65
7.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	66
7.3.1 ΤΑΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ [0/45/90/-45] _s	68
7.3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΠΛΗΣΙΟΝ ΟΠΗΣ	85
A) [0/45/90/-45] _s	86
B) [0/30/90/-30] _s	87
Г) [0/60/90/-60] _s	88
Δ) [0 ₈]	89
E) [0 ₂ /90 ₂] _s	90
7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

		ΣΕΛ
Σχήμα 1.1:	Τρίπολο εξέλιξης των υλικών	1
Σχήμα 1.4.2a:	Επαλληλία τριών στρώσεων για δημιουργία διαστρωμάτωσης	6
Σχήμα 1.4.2b:	Κατασκευή διαστρωματώσεων με πυρήνα	7
Σχήμα 1.4.3	Διαδικασία Σχεδιασμού	8
Σχήμα 1.4.4	Χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης	10
Σχήμα 2	Σχέση δυνάμεων- μετατοπίσεων-παραμορφώσεων-τάσεων	14
Σχήμα 2.1	Τάσεις σε κύριο σύστημα αξόνων	15
Σχήμα 2.5	Υπολογισμός G ₁₂	22
Σχήμα 2.6a	Μετασχηματισμός τάσεων	25
Σχήμα 2.6b	Τομή α-α' και ισορροπία δράσεων	25
Σχήμα 2.6c	Τομή β-β' και ισορροπία δράσεων	26
Σχήμα 2.7	Μετασχηματισμός παραμορφώσεων	27
Σχήμα 2.8a	Μετασχηματισμός όρων ακαμψίας	28
Σχήμα 2.8b	Ορισμός γωνίας θ μεταξύ συστημάτων x-y και x'-y'	30
Σχήμα 2.9	Μετασχηματισμός των όρων ευκαμψίας	31
Σχήμα 3a	Πειραματικός υπολογισμός κρίσιμων τάσεων Χ, Χ', Υ, Υ',S	35
Σχήμα 5a	Επιφανειακού τύπου επισκευή	42
Σχήμα 5b	Επισκευή με έκχυση ρητίνης	42
Σχήμα 5c	Μερικώς κατασκευαστική πλήρωση οπής	42
Σχήμα 5d	Δομική επισκευή με μηχανικώς συνδεδεμένα doubler	43
Σχήμα 5e	Δομική επισκευή με λείανση	43
Σχήμα 5.2	Εντός επιπέδου τάσεις στους κυρίους άξονες ελλειπτικής οπής για διάτρητο σύνθετο υλικό	45
Σχήμα 5.2.1	Ορισμός χαρακτηριστικής διάστασης	46
Σχήμα 5.2.2a	Μειωτικός συντελεστής αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό για δοκίμια ινών π/4 με κυκλική οπή, συναρτήσει ακτίνας οπής	47
Σχήμα 5.2.2b	Μειωτικός συντελεστής αντοχής για δοκίμια AS4/3502 με κυκλική οπή, συναρτήσει ακτίνας οπής	47
Σχήμα 5.2.3a	Μειωτικός συντελεστής αντοχής συναρτήσει κανονικοποιη- μένου χαρακτηριστικού μήκους b₀ για μονοαξονική εφελκυστι- κή δύναμη για σύνθετα CFRP	48
Σχήμα 5.2.3b	Μειωτικός συντελεστής αντοχής συναρτήσει κανονικοποιη- μένου χαρακτηριστικού μήκους b₀ για μονοαξονική εφελκυστι- κή δύναμη για σύνθετα CFRP T300/5208 με μικρές ρωγμές	49
Σχήμα 5.2.3c	Μειωτικός συντελεστής αντοχής συναρτήσει κανονικοποιη- μένου χαρακτηριστικού μήκους b₀ για μονοαξονική εφελκυστι- κή δύναμη για σύνθετα CFRP T300/5208 με μεγάλες ρωγμές	49
Σχήμα 5.2.4a	Εφαπτομενική συγκέντρωση τάσεων στο σύνορο για Graphite - Epoxy $[0/\pm 45/90]_s$	51

Σχήμα 5.2.4b	Μειωτικός συντελεστής αντοχής για Graphite/Epoxy T300/5208 [0/±45/90] _{2S} laminate με ανοιχτή οπή και inclusions από αλουμίνιο και χάλυβα.	51
Σχήμα 5.2.4c	Μειωτικός συντελεστής αντοχής για Graphite/Epoxy T300/5208 [0₂/90]₅. με ανοιχτή οπή και inclusions από αλουμίνιο, χάλυβα και Ti	52
Σχήμα 5.2.4d	Μειωτικός συντελεστής αντοχής για Graphite/Epoxy T300/5208 [0/±45] _S με ανοιχτή οπή και inclusions από αλουμίνιο, χάλυβα και Ti	52
Σχήμα 7.1a	Μετατροπή τριγωνικού πεπερασμένου στοιχείου σε τετραεδρικά	64
Σχήμα 7.1b	Μετατροπή 1/4 του δίσκου σε τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία	64
Σχήμα 7.3a	Γενική άποψη μοντέλου 150mm x 40mm με οπή	66
Σχήμα 7.3b	Ενδεικτική αρίθμηση κόμβων μοντέλου	66
Σχήμα 7.3c	Ενδεικτική αρίθμηση στοιχείων μοντέλου	67
Σχήμα 7.3d	Ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 1kN/mm στο άκρο του δοκιμίου	67
Σχήμα 7.3.1.1	Τάσεις σ _x Στρώση 0°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	68
Σχήμα 7.3.1.2	Τάσεις σ _x Στρώση 0 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	68
Σχήμα 7.3.1.3	Τάσεις σ _y Στρώση 0 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	69
Σχήμα 7.3.1.4	Τάσεις σ _y Στρώση 0°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	69
Σχήμα 7.3.1.5	Τάσεις von Mises Στρώση 0 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλ. οπή	70
Σχήμα 7.3.1.6	Τάσεις von Mises Στρώση 0 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	70
Σχήμα 7.3.1.7	Τάσεις σ _x Στρώση 45 ° , δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	71
Σχήμα 7.3.1.8	Τάσεις σ _x Στρώση 45 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _S , με inclusion	71
Σχήμα 7.3.1.9	Τάσεις σ _ν Στρώση 45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	72
Σχήμ. 7.3.1.10	Τάσεις σ _ν Στρώση 45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	72
Σχήμ. 7.3.1.11	Τάσεις τ _{xv} Στρώση 45 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	73
Σχήμ. 7.3.1.12	Τάσεις τ _{xv} Στρώση 45 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	73
Σχήμ. 7.3.1.13	Τάσεις von Mises Στρώση 45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s με κυκλ. οπή	74
Σχήμ. 7.3.1.14	Τάσεις von Mises Στρώση 45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	74
Σχήμ. 7.3.1.15	Τάσεις σ _x Στρώση 90 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	75
Σχήμ. 7.3.1.16	Τάσεις σ _x Στρώση 90 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	75
Σχήμ. 7.3.1.17	Τάσεις σ _ν Στρώση 90 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	76
Σχήμ. 7.3.1.18	Τάσεις σ _y Στρώση 90 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	76
Σχήμ. 7.3.1.19	Τάσεις von Mises Στρώση 90°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκ. οπή	77
Σχήμ. 7.3.1.20	Τάσεις von Mises Στρώση 90°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	77
Σχήμ. 7.3.1.21	Τάσεις σ _x Στρώση -45 [°] , δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	78
Σχήμ. 7.3.1.22	Τάσεις σ _x Στρώση -45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	78
Σχήμ. 7.3.1.23	Τάσεις σ _v Στρώση -45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	79
Σχήμ. 7.3.1.24	Τάσεις σ _v Στρώση -45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	79
Σχήμ. 7.3.1.25	Τάσεις τ _{xv} Στρώση -45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκλική οπή	80
Σχήμ. 7.3.1.26	Τάσεις τ _{xv} Στρώση -45°, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	80
Σχήμ. 7.3.1.27	Τάσεις von Mises Στρώση -45 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με κυκ.οπή	81
Σχήμ. 7.3.1.28	Τάσεις von Mises Στρώση -45 °, δοκιμίου [0/45/90/-45] _s , με inclusion	81
Σχήμ. 7.3.1.29	Τομές Α,Β,Γ και Δ	82
Σχήμ. 7.3.1.30	Διαγράμματα τάσεων σ _x για τομές Α, Β, Γ και Δ, για 0°	83
Σχήμα 7.3.2	Σημεία Α, Β και Γ ελέγχου τάσεων	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

		ΣΕΛ
Пív. 1.2.1	Κωδικοποίηση πολύστρωτων πλακών	2
Пív. 2.2	Ελαστικές σταθερές	17
Пі́v. 2.5а	Ιδιότητες τυπικών σύνθετων υλικών	23
Пív. 2.5b	Ακαμψίες τυπικών σύνθετων υλικών	24
Пі́v. 2.5с	Ευκαμψίες τυπικών σύνθετων υλικών	24
Пív. З	Κρίσιμες τάσεις αστοχίας ορισμένων σύνθετων υλικών	37
Пív. 5а	Τύποι βλάβης	41
Пív.7.3.2а.	Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0/45/90/-45] _s	86
Пív.7.3.2b	Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0/30/90/-30] _s	87
Пív.7.3.2с	Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0/60/90/-60] _s	88
Пív.7.3.2d	Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0 ₈]	89
Пív.7.3.2е	Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0₂/90₂]s	90
Пív. 7.4	Απόκλιση % από αρχικό δοκίμιο για τάσεις von Mises	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι κατατάσσουμε τα υλικά σε μέταλλα και κράματα, σε μη μεταλλικά και ανόργανα υλικά με κυρίους εκπροσώπους τα κεραμικά υλικά και τα τεχνικά γυαλιά και σε οργανικά υλικά με ιδιαίτερη αναφορά στα πλαστικά. Η διάκριση μεταξύ των τριών αυτών κατηγοριών ομοιογενών υλικών με βάση τη χημική σύσταση, τη δομή και τις ιδιότητες φυσικές και μηχανικές είναι σαφής. Ωστόσο από αρχαιοτάτων χρόνων γίνεται χρήση υλικών των οποίων η κατάταξη σε μία από τις τρεις κλασσικές κατηγορίες δεν είναι δυνατή. Αν θεωρήσουμε ότι οι τρείς κλασσικές κατηγορίες υλικών καταλαμβάνουν τις κορυφές του τριπόλου εξέλιξης των υλικών (Σχήμα 1.1), ο συνδυασμός ανά δύο των υλικών αυτών οδηγεί σε οικογένειες νέων υλικών, των συνθέτων.



Σχήμα 1.1: Τρίπολο εξέλιξης των υλικών

1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Ως σύνθετο υλικό ορίζεται ο συνδυασμός δύο ή περισσοτέρων υλικών υπό διακριτή μορφή τα οποία συνεργάζονται και δημιουργούν ένα νέο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες..Τα πλέον συνήθη σύνθετα υλικά είναι αυτά που γίνονται με ισχυρές ίνες που συγκρατούνται με ένα συνδετικό υλικό.

Οι ανθρώπινες κατασκευές σύνθετων υλικών πάνε πίσω χρονικά στη χρήση αργίλου ενισχυμένης με άχυρο για τούβλο καθώς και κεραμικά είδη. Από τα πρώτα σύνθετα υλικά που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος είναι ο πηλός, η άσφαλτος και οι συνθετικές ρητίνες. Ενδείξεις χρησιμοποίησης αυτών των υλικών έχουμε σε κεραμικά του 5000 π.Χ. Τα πρώτα ενισχυμένα πολυμερικά υλικά φαίνεται να έχουν χρησιμοποιηθεί από τους Βαβυλώνιους κατά την περίοδο 4000-2000π.Χ. Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται στη Βίβλο, στα Κεφάλαια Γένεσης και Έξοδος. Γύρω στο 3000π.Χ στοιχεία από διάφορες άλλες πηγές μας πληροφορούν ότι στην Αίγυπτο και στη Μεσοποταμία είχαν κατασκευαστεί σχεδίες από καλάμια παπύρου που προηγουμένως είχαν εμβαπτισθεί σε πίσσα. .Αυτές οι σχεδίες θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι ο πρόδρομος των σύνθετων πλαστικών σκαφών που είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Επίσης το χαρτί είναι ένα φυσικό ινώδες σύνθετο υλικό.

Στα σύγχρονα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται μέταλλα, κεραμικά ή πολυμερή συνδετικά υλικά, οπλισμένα με διάφορες ίνες ή σωματίδια. Για παράδειγμα, τα σκάφη από

fiberglass κατασκευάζονται από πολυεστερική ρητίνη οπλισμένη με ίνες γυαλιού. Σε μερικές περιπτώσεις, τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από περισσότερα από δύο επιμέρους υλικά και ονομάζονται υβριδικά (hybrids). Π.χ. το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελείται από ένα τμήμα οπλισμένου σύνθετου υλικού (σκύρα και τσιμέντο), το οποίο οπλίζεται περαιτέρω με ράβδους χάλυβα οπλισμού θεωρούμενες ως ίνες. Σε άλλες περιπτώσεις διατάσσονται διαφορετικά υλικά σε στρώσεις έτσι ώστε να σχηματίζουν ένα τελικό προϊόν με αυξημένες ιδιότητες, όπως στην περίπτωση της κατασκευής sandwich, όπου ένας ασθενής πυρήνας υλικού περικλείεται μεταξύ δύο στρώσεων ισχυρών και δύσκαμπτων υλικών.

Προσδιορισμός σύνθετου υλικού

Ένα σύνθετο υλικό χαρακτηρίζεται από τους όρους "συμμετρικό", "μη συμμετρικό" ή "ισορροπημένο".

Συμμετρικό: κάθε στρώση έχει την συμμετρική της από το γεωμετρικό μέσο επίπεδο, όσον αφορά τις ιδιότητες, το πάχος και τον προσανατολισμό ινών.

<u>Μη συμμετρικό</u>: οι στρώσεις συνήθως παρουσιάζουν συσχετισμό μεταξύ τάσεων και καμπυλοτήτων. Για παράδειγμα, ένα δίστρωτο υλικό 0/90 θα καμφθεί με την εφαρμογή τάσης. Αυτό παύει να ισχύει άμα

Ισορροπημένο: χαρακτηρίζεται από ±θ προσανατολισμένες ίνες. Αφορά σύνθετα υλικά με στρώσεις εκτός του άξονα.

1.2.1 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

Πριν προχωρήσουμε στην αναλυτική μελέτη της πολύστρωτης πλάκας πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη αναφορά στον διεθνώς καθιερωμένο κωδικοποιημένο τρόπο περιγραφής τέτοιων συστημάτων πολύστρωτων σύνθετων υλικών. Ο κώδικας που θα δοθεί παρακάτω είναι ο πλέον διαδεδομένος διεθνώς και είναι ο εξής: Laminate Orientation Code Devised by Air Force Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, Ohio, by P.A. Parmley.

Οι γενικές αρχές του κώδικα είναι οι εξής:

Η κάθε στρώση αναπαριστάται από το αζιμούθιο (γωνία) των ινών της ως προς τον xάξονα της πλάκας. (πάχος πλάκας z=[-h/2, h/2])

Ως δείκτης στη στρώση μπαίνει ο αριθμός που υποδεικνύει τον αριθμό στρώσεων ίδιας γωνίας ινών.

Γίνεται χρήση της καθέτου ως διαχωριστικού αν αλλάζει η γωνία στρώσης.

Η αρίθμηση ξεκινά πάντα από την κάτω επιφάνεια της πλάκας (z=-h/2)

Όλη η διάταξη της πλάκας μπαίνει σε αγκύλες και τοποθετούνται δείκτες ως εξής:

"Τ" αν η διάταξη εντός των αγκυλών είναι ολοκληρωμένη

"S" αν η διάταξη εντός των αγκυλών είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο z=0.

Αγκύλες []	[0, 90] _s =0/90/90/0
	οι αγκύλες αφορούν ακολουθία στρώσεων
Δείκτης s [] _s	[0, 90] _s =0/90/90/0
	ο δείκτης αφορά συμμετρία
Επαναλαμβανόμενες	$[0_3/90_2] = 0/0/0/90/90/90/90/0/0/0$
στρώσεις θ _n	[0, (+45-45) ₂] ₃ =0/+45/-45/+45/-45/-45/+45/-45/+45/0
Δείκτης Τ [] _Τ	$[0/90/45/90/0]_{T} = 0/90/45/90/0$
	Μερικές φορές χρήση για να δηλώσει
	συνολική διαστρωμάτωση

Ονοματολογία

Πιν.1.2.1 : Κωδικοποίηση πολύστρωτων πλακών

1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους, έχοντας ως κύριες παραμέτρους τις ακόλουθες:

<u>Ενισχύσεις</u>

Συνεχείς επιμήκεις ίνες

- a. Ίνες ενιαίου προσανατολισμού
- b. Ίνες διπλού προσανατολισμού, όπως πλεκτές (woven)
- c. Τυχαίου προσανατολισμού

Ασυνεχείς ίνες

- a. Τυχαίου προσανατολισμού
- b. Συγκεκριμένου προσανατολισμού

Κοντές ίνες και σωματίδια

- a. Τυχαίου προσανατολισμού
- b. Συγκεκριμένου προσανατολισμού

Διαμόρφωση διαστρωμάτωσης

- a. Ενιαίου προσανατολισμού
- b. Συνήθης διαστρωμάτωση

<u>Υβριδική κατασκευή</u>

- a. Διαφορετικά υλικά σε διάφορες στρώσεις (όπως διμεταλλικά)
- b. Διαφορετική ενίσχυση στη στρώση (πχ αναμιγμένες ίνες βορίου και άνθρακα)

1.4 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΛΙΚΑ

1.4.1 INEΣ

Οι ίνες χρησιμοποιούνται ως οπλισμός επειδή τα περισσότερα υλικά είναι περισσότερο ανθεκτικά υπό μορφή ινών παρά στην συμπαγή μορφή τους. Αυτό οφείλεται στη προνομιακή κατεύθυνση των μορίων κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών και στην μείωση των ατελειών. Το ακατέργαστο E-glass έχει σχετικά μικρή εφελκυστική αντοχή (1,5-5,8 GPa), ενώ σε μορφή ίνας φθάνει ως και 72,3 GPa. Έτσι ένας μεγάλος αριθμός ινών ευθυγραμμίζονται μέσα στο μικρό πάχος ενός μικρού κελύφους ή πλάκας που ονομάζεται στρώση ή φύλλο. Μία στρώση με ίνες ενιαίου προσανατολισμού έχει τη μέγιστη αντοχή και δυσκαμψία κατά τη διεύθυνση των ινών και την ελάχιστη για διεύθυνση κάθετη στις ίνες. Όταν είναι επιθυμητές ίδιες ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση του επιπέδου της στρώσης, χρησιμοποιούνται ίνες με τυχαίο προσανατολισμό. Μία διαστρωμάτωση αποτελείται από δύο ή περισσότερες επάλληλες στρώσεις συνεργαζόμενες μεταξύ τους. Το τελικό προϊόν έχει τις διαφορετικές ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση στο επίπεδο της στρώσης.

Συνήθως χρησιμοποιούνται συνεχείς ίνες στις εφαρμογές των κατασκευών . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τέτοια υλικά έχουν πολύ μικρές παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού. Αντίθετα, σύνθετα υλικά που ενισχύονται με κοντές ίνες ή σωματίδια μπορούν να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις ακόμα και σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας.

Το μειωμένο βάρος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κίνητρα χρήσης των σύνθετων υλικών γενικά στις μεταφορές και σε συγκεκριμένες αεροναυπηγικές και διαστημικές εφαρμογές. Τα σύνθετα υλικά είναι ελαφρότερα από τα συμβατικά επειδή τόσο οι ίνες όσο και τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως συνδετικά υλικά έχουν χαμηλό ειδικό βάρος. Λεπτομερέστερα, οι ίνες έχουν υψηλότερες τιμές στους λόγους αντοχής - βάρους και δυσκαμψίας-βάρους από τα περισσότερα υλικά.

Οι πιο κοινοί τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά είναι από γυαλί, άνθρακα, οργανικές(Kevlar), βόριο, Silicone Carbide και αλουμίνιο, ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες και το κόστος αυτής.

Οι ίνες γυαλιού έχουν τις τυπικές ιδιότητες του γυαλιού όπως σκληρότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επίσης είναι εύκαμπτες ελαφρές και σχετικά φθηνές. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τις ίνες γυαλιού τον πλέον συνήθη τύπο ινών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές μικρού κόστους. Η υψηλή αντοχή των ινών γυαλιού αποδίδεται στον μικρό αριθμό και το μικρό μέγεθος των ατελειών στην επιφάνειά τους. Όλες οι ίνες γυαλιού έχουν παρόμοιες δυσκαμψίες αλλά διαφορετικές τιμές αντοχής και διαφορετική αντοχή σε περιβαλλοντικές επιδράσεις. Οι ίνες E-glass είναι το είδος ενίσχυσης που προτιμάται επειδή συνδυάζει τη μηχανική απόδοση, αντοχή στη διάβρωση και μικρό κόστος.

Η μέγιστη αντοχή που έχει μετρηθεί σε δοκιμές μίας ίνας (κατά ASTM D3379) μπορεί να φθάσει έως 3,5 GPa για ίνες E-glass, ωστόσο δεν επιτυγχάνονται αυτές οι τιμές στο σύνθετο υλικό καθότι υπάρχουν φθορές κατά την πορεία των διαφόρων φάσεων. Ενδεικτικά, κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων παραγωγής οι φθορές που επέρχονται μειώνουν περίπου στα 1,75 GPa την αντοχή της ίνας για ίνες E-glass.Η απομείωση της αντοχής οφείλεται μεταξύ των άλλων και σε παραμένουσες τάσεις καθώς και σε δευτερογενή φορτία, διατμητικά και εγκάρσια κατά τη διεύθυνση των ινών.

Η αντοχή των ινών σε διάβρωση εξαρτάται από τη σύνθεση της ίνας, το διαβρωτικό διάλυμα και τον χρόνο έκθεσης. Η εφελκυστική αντοχή των ινών γυαλιού, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για ένα εύρος τιμών θερμοκρασιών όπου τα πολυμερικά υλικά μπορούν να εκτεθούν (έως 275°C ανάλογα με το είδος του συνδετικού υλικού).

1.4.2 ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Οι ισχυρές ίνες δεν χρησιμοποιούνται μόνες τους (εκτός της περίπτωσης των καλωδίων) επειδή δεν αντέχουν σε θλιπτικά ή σε εγκάρσια φορτία. Απαιτείται λοιπόν ένα συνδετικό υλικό για να συγκρατεί τις ίνες στην προβλεπόμενη θέση τους, να μεταφέρει το φορτίο ανάμεσα στις ίνες και τις στηρίξεις. Η αντοχή σε διάβρωση του τελικού προϊόντος εξαρτάται κυρίως από το συνδετικό υλικό. Εξ' αιτίας της εξαιρετικής αντοχής σε περιβαλλοντικές και χημικές επιδράσεις των πολυμερών συνδετικών υλικών και των περισσοτέρων ινών, τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν κατακτήσει τις μεγάλες αγορές στις χημικές βιομηχανίες έναντι των συμβατικών υλικών όπως ο χάλυβας, το οπλισμένο σκυρόδεμα και το αλουμίνιο. Αυτή η τάση εξάπλωσης των σύνθετων υλικών στην κατασκευή έργων υποδομής και κυρίως στις επισκευές και τις ενισχύσεις οφείλεται στην αυξημένη αντοχή τους έναντι περιβαλλοντικής αποδιοργάνωσης (environmental degradation).

Τα συνδετικά υλικά μπορούν να είναι πολυμερή, μεταλλικά ή κεραμικά. Τα πολυμερή συνδετικά υλικά συνηθίζονται λόγω της ευκολίας κατασκευής πολύπλοκων σχημάτων με απλά εργαλεία.

Το συνδετικό υλικό εποξική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή, ανήκει στην κατηγορία των συνδετικών υλικών θερμικής διαμόρφωσης. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα λόγω της μεγάλης τους ικανότητας προσαρμογής, έχουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες και μεγάλη αντοχή σε διάβρωση. Οι εποξικές (epoxy) συρρικνώνονται λιγότερο από ότι άλλα υλικά (1,2 έως 4 % του όγκου), πράγμα το οποίο βοηθά στο να εξηγηθούν τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά δεσμού όταν χρησιμοποιούνται σαν συγκολλητικά (adhesives). Επηρεάζονται λιγότερο από την υγρασία και τη θερμοκρασία σε σχέση με άλλα πολυμερή συνδετικά. Προτιμώνται επίσης για την απλή διαδικασία στερεοποίησης που μπορεί να γίνει σε θερμοκρασίες μεταξύ 5° και 150°C.

Ένα από τα σημαντικότερα πέδία εφαρμογής των εποξικών ρητινών (epoxy) είναι η βιομηχανία των αεροσκαφών. Χρησιμοποιούνται σαν συγκολλητικό μέσο (adhesives) σε κατασκευές κυψελών για αεροσκάφη (aircraft honeycomb) και σαν διαστρωματικές ρητίνες στο σκελετό αεροσκαφών και σε εφαρμογές πυραύλων, σε κατασκευές με τη διαδικασία της περιέλιξης και για εργαλεία (tooling). Είναι πολύ χρήσιμες ως συστατικά στεγανοποίησης για την κατασκευή και επισκευή πλαστικών ή μεταλλικών σκαφών και αυτοκινήτων. Σε κτιριακά έργα και στην κατασκευή αυτοκινητοδρόμων χρησιμοποιούνται ως στεγανοποιητικά μέσα (όταν είναι επιθυμητή υψηλή αντοχή σε χημική διάβρωση) και ως μέσο επικάλυψης του σκυροδέματος.

Χρησιμοποιούνται επίσης ως συστατικό έγχυσης (casting compounds) περιορισμένης χρήσης σε κατασκευές και πρωτότυπων καλουπιών, βαφές σφραγίδων και εργαλείων. Τελικά, έχουν ένα μεγάλο εύρος χρήσης στο τομέα των ηλεκτρικών λόγω της εξαιρετικής ηλεκτρικής μόνωσης που προσφέρουν. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν *potting* και συστατικό συμπύκνωσης, εμποτισμένες (impregnating) ρητίνες και βερνίκια σε ηλεκτρικούς και ηλεκτρονικούς εξοπλισμούς. Το κόστος των εποξικών ρητινών (*epoxy*) είναι ανάλογο των εφαρμογών των ρητινών, το οποίο ποικίλει σε ένα ευρύ φάσμα, αλλά είναι συνήθως πιο ακριβές από τις ρητίνες vinylester.

Εποξικά συνδετικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες λειτουργίας (service) μεταξύ 125°C και 175°C. Για να αυξηθεί η σκληρότητα της ρητίνης και του σύνθετου υλικού, αυτό γίνεται με πρόσθετα στις βασικές εποξικές ρητίνες θερμικής διαμόρφωσης (thermoset), συμπεριλαμβανομένης και της προσθήκης θερμοπλαστικών (thermoplastics). Οι θερμοκρασίες λειτουργίας για τις σκληρυμένες ρητίνες είναι πάντα χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες μετάβασης του γυαλιού, που είναι υψηλές για εύθραυστα εποξικά (brittle epoxies) (έως 247°C) και χαμηλές για σκληρυμένα εποξικά (toughened epoxies) (μεταξύ 76 και 185°C).

Εφόσον τα πολυμερή μπορούν να μορφοποιηθούν σε πολύπλοκα σχήματα, ένα τμήμα σύνθετου υλικού μπορεί να αντικαταστήσει πολλά μεταλλικά τμήματα, τα οποία έτσι κι αλλιώς θα απαιτούνταν για να πετύχουν την ίδια λειτουργία. Η μείωση των απαιτούμενων τμημάτων (part-count reduction) συχνά μεταφράζεται σε βελτιστοποιημένη παραγωγή, η οποία αντισταθμίζει με το παραπάνω το υψηλότερο κόστος από τη χρήση σύνθετων υλικών.



Σχ.1.4.2a : Επαλληλία τριών στρώσεων για δημιουργία διαστρωμάτωσης

Επειδή η αντοχή και δυσκαμψία του πολυμερούς είναι ασήμαντες εν συγκρίσει με αυτές των ινών, οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι κάπως χαμηλότερες από αυτές των ινών. Η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων με βάση αναφοράς τις ίνες προς το τελικό προϊόν είναι ανάλογη της ποσότητας του συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται.

Αφού οι ίνες δεν συνεισφέρουν στην αντοχή κατά την εγκάρσια στην διεύθυνση των ινών έννοια, και με δεδομένο ότι η αντοχή του συνδετικού υλικού είναι πολύ μικρή, καθίσταται αναγκαίο να προστεθούν στρώσεις με διάφορους προσανατολισμούς ώστε να παραλαμβάνονται τα επιβαλλόμενα φορτία. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι να δημιουργηθεί μία διαστρωμάτωση με αλληλουχία στρώσεων με διάφορους προσανατολισμούς. Παρόλο που τέτοια διαστρωμάτωση μπορεί να παραλάβει φορτία επίπεδης έντασης, η αντοχή και δυσκαμψία της ανά μονάδα βάρους για δεδομένη διεύθυνση είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές μιας μεμονωμένης στρώσης.

Άλλη λύση για την ανάληψη φορτίων επίπεδης έντασης είναι να συνεργάζονται οι ενισχύσεις δύο διευθύνσεων σε κάθε στρώση, όπως π.χ. στο ύφασμα με πλέξη. Το συνδετικό υλικό μπορεί ακόμη να ενισχυθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι ιδιότητές του να είναι ίδιες σε κάθε διεύθυνση. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ίνες τυχαίου προσανατολισμού όπως συνεχείς ή κοντές δέσμες ινών, ή χρησιμοποιώντας κοντές ίνες διασκορπισμένες στο συνδετικό υλικό. Αυτοί οι τύποι οπλισμού επίσης χρησιμοποιόνται για τη μείωση του κόστους, όμως οι ιδιότητες τέτοιων σύνθετων υλικών είναι αρκετά μικρότερες από αυτές των σύνθετων υλικών με τις συνεχείς ίνες.

Συχνά, τα υλικά πληρώσεως (filler) όπως το ανθρακούχο ασβέστιο (calcium carbonate) χρησιμοποιούνται αναμιγμένα με το συνδετικό υλικό για τη μείωση του βάρους και του κόστους, για αυξημένη πυραντοχή και μείωση των προϊόντων καύσης, για τη μείωση της αποδιοργάνωσης του πολυμερούς από υπεριώδεις ακτινοβολίες (UV) λόγω έκθεσης στο ήλιο, κλπ.. Πάντως, τα υλικά πληρώσεως δεν θεωρούνται ως ενισχύσεις, η επιρροή τους όμως συνυπολογίζεται στην τροποποίηση των ιδιοτήτων του συνδετικού υλικού.

Υβριδικά σύνθετα υλικά (hybrids) χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, στην εξωτερική επιφάνεια μιας διαστρωμάτωσης οπλισμένης με ίνες άνθρακα τοποθετούνται στρώσεις οπλισμένες με γυαλί ή αραμίδιο (aramid) για λόγους προστασίας.

Οι ίνες άνθρακα παρέχουν δυσκαμψία και αντοχή ενώ οι ίνες γυαλιού προσδίδουν προστασία έναντι πρόσκρουσης αντικειμένων ή βλημάτων. Το πιο κοινό *υβριδικό σύνθετο υλικό* είναι η κατασκευή *sandwich:* Ένας ασθενής πυρήνας από στερεοποιημένο αφρό ή με κυψελωτή διάταξη περικλείεται μεταξύ δύο ισχυρών και δύσκαμπτων διαστρωματώσεων. Ο πυρήνας μεταξύ των δύο διαστρωματώσεων παίζει το ρόλο μοχλοβραχίονα αυξάνοντας την ροπή αδρανείας των δύο επιμέρους διαστρωματώσεων, υπό την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζεται η μεταξύ τους συνεργασία, και τελικώς καταλήγει σε αυξημένη καμπτική δυσκαμψία (bending stiffness) του όλου συστήματος με πολύ μικρή επιβάρυνση στο βάρος και το κόστος του τελικού προϊόντος. (Σχ.1.4.2b)



Σχ.1.4.2b Κατασκευή διαστρωματώσεων με πυρήνα

1.4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο σχεδιασμός είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες αποφάσεις για την κατασκευή, τον χειρισμό τη συντήρηση και την διάθεση ενός προϊόντος . Ο σχεδιασμός ξεκινάει με την αναγνώριση των αναγκών. Ορίζονται επίσης κριτήρια απόδοσης υπό την έννοια ότι κάθε λύση που θα προταθεί αργότερα πρέπει να ικανοποιεί αυτά τα κριτήρια ώστε να θεωρείται αποδεκτή.

Ο σχεδιασμός στηρίζεται στην ανάλυση της συμπεριφοράς ενός προϊόντος πριν αυτό κατασκευαστεί πραγματικά. Η ανάλυση χρησιμοποιεί μαθηματικούς τύπους για να καταλήξει μια παρουσίαση της πραγματικότητας από την οποία ο σχεδιαστής μπορεί να πάρει πληροφορίες για την πιθανή συμπεριφορά του τελικού προϊόντος. Η βέλτιστη λύση στη συνέχεια αποτιμάται σε σχέση με τα κριτήρια απόδοσης που διατυπώθηκαν στον ορισμό του προβλήματος. Τα κριτήρια απόδοσης γίνονται το μέτρο βαθμονόμησης, με το οποίο η απόδοση ή η επιλογή υπέρ οποιασδήποτε προτεινόμενης λύσης μετρώνται. Τα κριτήρια απόδοσης γίνονται είτε αντικειμενικές συναρτήσεις ή περιορισμοί για τη λύση.



Σχ. 1.4.3 Διαδικασία Σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός ενός δομικού υλικού περιλαμβάνει ταυτόχρονα το σχεδιασμό του υλικού και της κατασκευής. Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά όπως χάλυβας οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού μπορούν να σχεδιαστούν ταυτόχρονα με τις φάσεις κατασκευής. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών μπορούν να ποικίλουν μέσα σε ένα ευρύ φάσμα τιμών, ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Οι ιδιότητες των ινών και του συνδετικού υλικού μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας μικρομηχανική θεώρηση για να προκύψουν βελτιωμένες ιδιότητες για κάθε συνδυασμό αυτών. Παρόλο που η μικρομηχανική θεώρηση μπορεί να προβλέψει πολύ καλά τη δυσκαμψία του υλικού αλλά δεν είναι και τόσο ακριβής ως προς την πρόβλεψη της αντοχής του υλικού. Παρόλα αυτά πειραματικά δεδομένα για την αντοχή είναι πολύ σημαντικά στο σχεδιασμό. Έτσι, κατασκευαστές και εγχειρίδια στο χώρο των σύνθετων υλικών φροντίζουν να παραθέτουν τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών, τόσο από πλευράς ινών όσο και συνδετικών υλικών. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι οι δεδομένες γνωστές ιδιότητες αφορούν πολλές διαφορετικές ενισχύσεις και τεχνικές, που κάνουν τη σύγκριση προϊόντων πολύ δύσκολη.

Ο σχεδιασμός των σύνθετων υλικών μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ιδιότητες των ινών και συνδετικών υλικών καθώς και πειραματικά δεδομένα. Εάν χρησιμοποιούνται ιδιότητες από πειραματικά αποτελέσματα, δεν απαιτείται καταφυγή σε μοντέλα μικρομηχανικής. Η αλλαγή ενός συνδετικού υλικού κατά την πορεία σχεδιασμού ακυρώνει όλα τα βασικά δεδομένα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και απαιτεί ένα νέο πειραματικό πρόγραμμα για το νέο υλικό.

Με γνωστές τις ιδιότητες μιας μεμονωμένης στρώσης, οι ιδιότητες μιας διαστρωμάτωσης μπορούν να υπολογιστούν από το συνδυασμό των στρώσεων που σχηματίζουν τη διαστρωμάτωση. Ο σχεδιασμός μπορεί να ξεκινήσει απευθείας με τις πειραματικές τιμές των ιδιοτήτων της διαστρωμάτωσης. Οι ιδιότητες της διαστρωμάτωσης μπορούν πάντοτε να χρησιμοποιούνται σε έναν αρχικό σχεδιασμό της κατασκευής.

1.4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η επιλογή της διαδικασίας παραγωγής εξαρτάται από τον τύπο των ινών και του συνδετικού υλικού, τη θερμοκρασία που απαιτείται για το σχηματισμό του τμήματος και την στερεοποίηση του συνδετικού υλικού την επίδραση του κόστους στην επιλογή αυτής. Συχνά η διαδικασία παραγωγής είναι η τελική θεώρηση στο σχεδιασμό δομικών σύνθετων υλικών. Αυτό οφείλεται στο κόστος, τον όγκο παραγωγής, τον ρυθμό παραγωγής και την επάρκεια της διαδικασίας στο να παράγει το τύπο του δομικού στοιχείου που είναι επιθυμητό. Κάθε διαδικασία παραγωγής επιβάλει συγκεκριμένους περιορισμούς στον δομικό σχεδιασμό. Για το λόγο αυτό ο σχεδιαστής απαιτείται να γνωρίζει τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς, το κόστος, τη πορεία σχεδιασμού, τον όγκο και τις τυπικές χρήσεις διαφόρων παραγωγικών διαδικασιών. Κατά το σχεδιασμό ενός δομικού στοιχείου. από σύνθετα υλικά, το υλικό σχεδιασιόν κατασκευές υψηλών απαιτήσεων οι οποίες και επιβάλλουν στον σχεδιαστή τον τρόπο παραγωγής του υλικού. Ακολούθως παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών παραγωγής του υλικών.

Η χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης μιας διαστρωμάτωσης (hand lay-up), η χρήση προκατασκευασμένων στρώσεων (prepreg lay-up), η μόρφωση μέσω περιβλήματος (bag molding), η διαδικασία μόρφωσης μέσω κλιβάνου (autoclave processing), μέσω εκμαγείου συμπίεσης (compression molding), με καλούπι ρητινενέσεως (resin transfer molding), η διαδικασία παραγωγής με έλξη (pultrusion) και η διαδικασία περιέλιξης (filament winding) περιγράφονται στις παρακάτω παραγράφους.

ΧΕΙΡΩΝΑΚΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ-«HAND LAY-UP»

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την χειρωνακτική τοποθέτηση των ξηρών ενισχύσεων στο εκμαγείο και την ταυτόχρονη εφαρμογή της ρητίνης. Στη συνέχεια, το υπό υγρή μορφή σύνθετο υλικό διαμορφώνεται με χειροκίνητα ρολά ώστε να διευκολυνθεί η ομοιόμορφη διάστρωση και η απομάκρυνση των θυλάκων αέρα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό. πάχος. Έτσι προκύπτει μία κατασκευή με διαδοχικές στρώσεις. Η έκλυση πτητικών ουσιών, όπως στυρένιο (*styrene*), είναι υψηλή όπως και σε κάθε άλλη ανοικτή μέθοδο με καλούπια. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα βασικά βήματα: α) προετοιμασία εκμαγείου, β) επικάλυψη με ζελατίνη (gel coating), γ) διάστρωση (*lay-up*) και δ) στερεοποίηση (curing).



Σχ. 1.4.4 Χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης

ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ-«PREPREG LAY-UP»

Η προκατασκευασμένη στρώση (prepreg) είναι προ-εμποτισμένο υλικό ενισχυμένο με ίνες (pre- impregnated fiber reinforced material) όπου η ρητίνη έχει μερικώς στερεοποιηθεί ή είναι πιο παχύρρευστη. Οι ίνες είναι τακτοποιημένες σε μία ταινία μονού προσανατολισμού (unidirectional tape), ένα πλεκτό ύφασμα (woven fabric) ή σε φύλλα με κοντές ίνες τυχαίου προσανατολισμού (random chopped fiber sheets). Η βασική διαφορά μεταξύ της μεθόδου διαστρωμάτωσης με προκατασκευασμένες στρώσεις (prepreg lay-up) και της συμβατικής μεθόδου χειρωνακτικής μόρφωσης διαστρωμάτωσης (hand lay-up) είναι ότι χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένες στρώσεις (prepreg) ο εμποτισμός (impregnation) των ινών γίνεται πριν το καλούπωμα.

Τα prepregs χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή υψηλών απαιτήσεων τμημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία στην αεροναυπηγική. Τα περισσότερα είναι φτιαγμένα από συστήματα εποξικών ρητινών και οι ενισχύσεις είναι συνήθως από γυαλί, άνθρακα και αραμίδιο (aramid). Στα περισσότερα συστήματα prepregs το περιεχόμενο των ρητινών είναι υψηλότερο απ΄ το επιθυμητό τελικό τμήμα. Η απομάκρυνση της επιπλέον ρητίνης βοηθά στην εκτόπιση του παγιδευμένου αέρα και των πτητικών ουσιών, τα οποία δημιουργούν διάκενα στο τελικό τμήμα αν δεν απομακρυνθούν. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί για κάθε 1% διακένων υπάρχει 7% μείωση της ενδοστρωματικής διατμητικής αντοχής (shear strength) και επίσης σημαντικές μειώσεις στην θλιπτική αντοχή που προκύπτουν για περιεχόμενα κενά άνω του 2%. Χαμηλότερο περιεχόμενο ρητίνης επίσης μειώνει το βάρος και το κόστος χωρίς να επηρεάζει την αντοχή. Τα νέα prepregs φτιάχνονται με σχεδόν καθαρό περιεχόμενο ρητίνης (near net-resin) για την αποφυγή της απομάκρυνσης της επιπλέον ποσότητας, η οποία προσθέτει στο συνολικό κόστος. Το σχεδόν καθαρό περιεχόμενο ρητίνης (near netresin) σημαίνει ότι το ποσό της ρητίνης στο prepreg κυμαίνεται κοντά στην περιεχόμενη ρητίνη που είναι επιθυμητή στο τελικό τμήμα. Αυτά τα prepregs κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο εμποτισμού με θερμή εφαρμογή (hot melting impregnation method) που ελαχιστοποιεί τις πτητικές ουσίες που παρουσιάζονται

ΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕΣΩ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ - «BAG MOLDING».

Στη διαστρωμάτωση, και πριν αυτή στερεοποιηθεί, εφαρμόζεται μία ομοιόμορφη πίεση βελτιώνοντας την σταθεροποίηση των ινών και την απομάκρυνση της περιττής ρητίνης, του αέρα και των πτητικών ουσιών από το συνδετικό υλικό. Η πίεση εφαρμόζεται με τη βοήθεια ενός εύκαμπτου διαφράγματος ή ενός περιβλήματος (bag). Οι στρώσεις απλώνονται πρώτα στο καλούπι και ακολουθεί η ρητίνη. Μια απελευθερωτική μεμβράνη ή μέσο (release film ή agent) χρησιμοποιείται και στις δύο πλευρές της διαστρωμάτωσης για να την αποτρέψει να κολλήσει στο καλούπι ή στο breather. Μερικές φορές χρησιμοποιείται ένα peel-ply για να αφήσει σημάδι (imprint) ή ένα σχέδιο/πατρόν (pattern) στην επιφάνεια ώστε να δυναμώσει ο συγκολλητικός δεσμός (δευτερεύων δεσμός) αργότερα. Ο συνδυασμός breather-bleeder βοηθά στην διάδοση της αναρρόφησης (vacuum) ή των διόδων (channels) των πτητικών ουσιών και της περιττής ρητίνης στην έξοδο αναρρόφησης (vacuum port). Η διαστρωμάτωση μετά καλύπτεται με ένα εύκαμπτο περίβλημα (flexible bag), το οποίο είναι τέλεια σφραγισμένο στο εργαλείο. Στη συνέχεια εφαρμόζεται αναρρόφηση (vacuum) και το τμήμα στερεοποιείται με θέρμανση και πίεση. Με την εφαρμογή της αναρρόφησης (vacuum) κάτω από το περίβλημα (bag), η ατμοσφαιρική πίεση ασκείται ομοιόμορφα πάνω στη διαστρωμάτωση. Η αναρρόφηση (vacuum) βοηθά στην απομάκρυνση των πλεοναζόντων μειγμάτων πτητικών ουσιών, όπως διαλυτικά μέσα, παγιδευμένος αέρας ή στοιχεία ρητίνης με μικρό μοριακό βάρος. Μετά τον κύκλο, τα υλικά γίνονται ένα ενιαίο καλουπωμένο τμήμα με τη μορφή του επιθυμητού σχηματισμού.

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕΣΩ ΚΛΙΒΑΝΟΥ-«AUTOCLAVE PROCESSING».

Οι κλίβανοι (autoclaves) είναι δοχεία υπό πίεση που περιέχουν πεπιεσμένο αέρα κατά τη διάρκεια τη: επεξεργασίας του σύνθετου υλικού. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υψηλής ποιότητας πολύπλοκων, τμημάτων. Η μέθοδος είναι πολύ καλή για μεγάλα τμήματα και μέτριες ποσότητες παραγωγής.

Η διαδικασία μέσω κλιβάνου των σύνθετων υλικών είναι μια προέκταση της τεχνικής μόρφωσης μέσο: περιβλήματος (bag molding), παρέχοντας υψηλότερη πίεση που είναι διαθέσιμη από την αναρρόφηση (vacuum) και δίνει μεγαλύτερη συμπίεση και εξάλειψη των κενών. Αρχικά, το τμήμα του σύνθετου υλικού απλώνεται και εσωκλείεται σε ένα περίβλημα (vacuum bag). Κατόπιν γίνεται ολική ή μερική αναρρόφηση στο εσωτερικό τον περιβλήματος, ενώ στο εξωτερικό του περιβλήματος (vacuum bag) εφαρμόζεται πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Στη συνέχεια αυξάνεται η θερμοκρασία του τμήματος στην τελική φάση στερεοποίησης (cure) του πολυμερούς. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες επίσης μειώνουν την πυκνότητα του πολυμερούς βοηθώντας τον εμποτισμό της ενίσχυσης και τη στερεοποίηση του σύνθετου υλικού.

ΕΚΜΑΓΕΙΟ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ - «COMPRESSION MOLDING»

Η διαδικασία μέσω ενός εκμαγείου συμπίεσης (compression molding) χρησιμοποιεί εφαρμογές αρσενικού - θηλυκού τύπου και μεταλλικές μήτρες για το σχηματισμό του καλουπιού. Μια προμετρημένη ποσότητα του μίγματος (ίνες και ρητίνες) γεμίζει αρχικά το καλούπι. Κατόπιν χρησιμοποιείται μία υδραυλική πρέσα με θερμότητα και σχετικά υψηλή πίεση για τη στερεοποίηση των ινών και ρητινών κλείνοντας το αρσενικό και θηλυκό τμήμα του καλουπιού. Αφού το υλικό έχει στερεοποιηθεί, χαλαρώνει η πίεση και το τμήμα βγαίνει από το καλούπι.

Η διαδικασία αυτή μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί επιτρέποντας υψηλό όγκο παραγωγής με πολύ καλή ομοιομορφία. Ωστόσο δεν επιτρέπει υψηλό λόγο όγκου συνεχών ινών. Για το λόγο αυτό τμήματα που κατασκευάζονται δεν είναι κατάλληλα για κύριες κατασκευές παρόλο που χρησιμοποιούνται σε δευτερεύουσες κατασκευές.

KAΛΟΥΠΙ PHTINENEΣEΩΣ - RESIN TRANSFER MOLDING (RTM).

Η διαδικασία με το καλούπι ρητινενέσεως - Resin Transfer Molding (RTM) χρησιμοποιεί ένα καλούπι με εισόδους για την εισαγωγή της ρητίνης και εξόδους που επιτρέπουν τη διαφυγή του αέρα. Οι ίνες ενίσχυσης τοποθετούνται ξηρές στο καλούπι και αυτό κλείνεται. Από την είσοδο αντλείται υγρή ρητίνη μέσα στο καλούπι, εμποτίζοντας τις ίνες και γεμίζοντας την κοιλότητα του καλουπιού. Όταν αυτό γεμίσει, η παροχή ρητίνης σταματά, οι είσοδοι και έξοδοι σφραγίζονται και εφαρμόζεται θέρμανση ώστε να στερεοποιηθεί η ρητίνη. Στη συνέχεια, το καλούπι ανοίγεται και το τελικό τμήμα του σύνθετου υλικού απομακρύνεται.

Το γεγονός ότι οι ενισχύσεις-ίνες τοποθετούνται ξηρές στο καλούπι πριν την εφαρμογή της ρητίνης, επιτρέπει τον καλύτερο χειρισμό του προσανατολισμού των ινών και επιπλέον βελτιώνει τις ιδιότητες του υλικού. Επίσης, η επεξεργασία είναι πιο καθαρή με λιγότερες εκλύσεις πτητικών ουσιών και είναι λιγότερο επιρρεπής σε εξωγενείς επιδράσεις.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΕΛΞΗ - PULTRUSION

Η διαδικασία παραγωγής με έλξη (pultrusion) είναι μία συνεχής διαδικασία που χρησιμοποιείται για να κατασκευάζει σταθερές πρότυπες διατομές οιουδήποτε μήκους. Είναι χαμηλού κόστους διαδικασία επειδή κατορθώνει άμεση μόρφωση των συνεχών ινών και των ρητινών σε ένα τελικό τμήμα. Οι ίνες είναι εμποτισμένες με ρητίνη και έλκονται μέσω μιας θερμαινόμενης μήτρας, από όπου περνώντας σχηματίζεται κα. στερεοποιείται το τελικό προϊόν.

Στην απλούστερη γραμμή παραγωγής με έλξη (pultrusion), οι δέσμες των ινών τεντώνονται και οδηγούνται σε καλούπια προσχηματισμού. Τα performing guides θέτουν τις ίνες με κατάλληλη διάταξη μέσα στη διατομή του προϊόντος, όπως opίζεται από τον σχεδιαστή. Οι ενισχύσεις εισέρχονται ξηρές στο θάλαμο έγχυσης (injection chamber), όπου εμποτίζονται με ρητίνη υπό πίεση. Συχνά ο θάλαμος έγχυσης (injection chamber) είναι ολόκληρο τμήμα μήτρας. Η διατομή της μήτρας δίνει το τελικό σχήμα του προϊόντος. Καθώς οι εμποτισμένες ίνες κινούνται διαμέσου της μήτρας, η στερεοποίηση γίνεται με τη βοήθεια παρεχόμενης θερμότητας από μια σειρά θερμαντήρων. Όπως προκύπτει το σύνθετο υλικό. συρρικνώνεται και ξεχωρίζει από τα τοιχώματα της μήτρας και αφήνοντας τη μήτρα είναι ένα τελικό προϊόν. Το στερεοποιημένο τμήμα έλκεται με παλινδρομικούς εξολκείς (reciprocating pullers), συγχρονισμένους να παρέχουν σταθερή ταχύτητα. Για το λόγο αυτό το προϊόν παράγεται συνεχώς σε σχεδόν απεριόριστο μήκος. Ένα κινούμενο πριόνι τοποθετημένο παραχωγής με τα επιθυμητό μήκος χωρίς να σταματήσει η διαδικασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Στη μηχανική του παραμορφώσιμου στερεού εκφράζονται σε ένα τρισδιάστατο κύριο σύστημα υπό διανυσματική μορφή τα πεδία των

- μετατοπίσεων u_i
- παραμορφώσεων ε_{ij}
- τάσεων σ_{ij}
- δυνάμεων f_i

με i,j=1,2,3

Οι τάσεις συνδέονται με τις δυνάμεις μέσω των εξισώσεων ισορροπίας, οι παραμορφώσεις με τις τάσεις μέσω του νόμου ελαστικότητας και οι μετατοπίσεις με τις παραμορφώσεις μέσω των κινηματικών σχέσεων και των εξισώσεων συμβιβαστού.(ΣΧΗΜΑ)



Σχ.2. Σχέση δυνάμεων-μετατοπίσεων-παραμορφώσεων-τάσεων

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} * \varepsilon_{kl}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} * \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_k * \partial x_l} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{kl}}{\partial x_i * \partial x_j} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ik}}{\partial x_j * \partial x_l} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jl}}{\partial x_i * \partial x_k}$$

όπου i,j,k,l=1,2,3

Με βάση τη θεωρία μικρών παραμορφώσεων, η τρίτη (κινηματική) σχέση απλοποιείται ως:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

2.1 ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Το σύστημα 1-2-3 είναι κύριο σύστημα αξόνων όπου σ_i είναι οι ορθές τάσεις και τ_{ij} είναι οι διατμητικές τάσεις για i,j=1,2,3.



Οι τάσεις γράφονται υπό διανυσματική μορφή ως εξής: $\{\sigma\}^{T} = \{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \tau_{23} \tau_{31} \tau_{12}\}$ Ομοίως οι αντίστοιχες παραμορφώσεις συμβολίζονται με ε_i (ορθές) και γ_{ij} (διατμητικές). Είναι δε γ_{ij}=2ε_{ij} Το διάνυσμα των παραμορφώσεων είναι $\{\epsilon\}^{T} = \{\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \gamma_{23} \gamma_{31} \gamma_{12}\}$

Σχ. 2.1 Τάσεις σε κύριο σύστημα αξόνων

Ανάλογες σχέσεις ισχύουν και για ένα τυχαίο σύστημα x-y-z, όπου οι δείκτες λαμβάνουν τιμές i,j=x,y,z.

2.2 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΗΟΟΚΕ

Ο νόμος ελαστικότητας όπως εκφράστηκε προηγουμένως, συνδέει τάσεις και παραμορφώσεις με 81 ελαστικές σταθερές C_{ijkl} (i,j,k,l=1,2,3).Επειδή όμως οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι συμμετρικές (σ_{ij}=σ_{ji} και ε_{ij}=ε_{ji}), ο νόμος γίνεται :

$\left[\sigma_{i}\right]$		$\begin{bmatrix} C_{11} \end{bmatrix}$	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C_{16}	$\left\{ \epsilon_{1} \right\}$
σ_2		C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	ε2
σ		C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₅	C36	ε3
τ23	=	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	C446	γ ₂₃
τ31		C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	C 55	C ₅₆	γ ₃₁
τ12		C ₆₁	C ₆₂	C ₆₃	C ₆₄	C ₆₅	C ₆₆	$\left[\gamma_{12}\right]$

Αυτή η έκφραση είναι η πλέον γενική για ένα ανισότροπο γραμμικώς ελαστικό υλικό. Οι 36 ελαστικές σταθερές όμως δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Με W την ενέργεια παραμορφώσεως

$$\begin{split} W &= \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \\ \text{και παραγωγίζοντας ως προς τις παραμορφώσεις} \\ \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} &= C_{ij} \varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} \\ \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ji}} &= C_{ji} \varepsilon_{ji} = \sigma_{ji} \end{split}$$

Επειδή είναι σ_{ij}=σ_{ji}, για τις ελαστικές σταθερές, για τις ελαστικές σταθερές ισχύει C_{ij}=C_{ji}.Άρα οι ανεξάρτητες σταθερές είναι 21.Το υλικό στην περίπτωση αυτή λέγεται επίσης τρικλινικό.

Αν υπάρχει ένα επίπεδο συμμετρίας (π.χ. το 1-2), τότε το υλικό λέγεται μονοκλινικό και ο νόμος της ελαστικότητας απλοποιείται ως εξής:

σ		$\begin{bmatrix} C_{11} \end{bmatrix}$	C ₁₂	C ₁₃	0	0	C_{16}	$\left\{ \epsilon_{1} \right\}$
σ	2	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	0	0	C ₂₆	ε2
σ	3	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	0	0	C ₃₆	ε3
jτ₂	3	0	0	0	C ₄₄	C ₄₅	0	γ_{23}
τ	1	0	0	0	C ₅₄	C 55	0	Y 31
τ_1	2	C ₆₁	C ₆₂	C ₆₃	0	0	C ₆₆	$\left[\gamma_{12}\right]$

Οι ανεξάρτητες σταθερές στην περίπτωση αυτή είναι 13.

Αν υπάρχει συμμετρία ως προς 3 ορθογωνικά επίπεδα, το υλικό λέγεται ορθότροπο. Ο νόμος ελαστικότητας γίνεται:

$\left[\sigma_{1}\right]$	$\begin{bmatrix} C_{11} \end{bmatrix}$	C ₁₂	C ₁₃	0	0	0	$\left[\epsilon_1 \right]$
σ_2	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	0	0	0	ε2
σ_3	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	0	0	0	ε,
τ_{23}	0	0	0	C44	0	0	γ_{23}
τ_{31}	0	0	0	0	C_{55}	0	Y 31
$\left[\tau_{12}\right]$	0	0	0	0	0	C ₆₆ _	$\left(\gamma_{12}\right)$

και περιέχει 9 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές.

Μια ειδική περίπτωση ορθότροπου υλικού είναι αν το υλικό συμπεριφέρεται ισότροπα κατά μια διεύθυνση. Το υλικό αυτό λέγεται εγκαρσίως ισότροπο και περιγράφεται από τον ακόλουθο νόμο ελαστικότητας

				•	-			
$\left[\sigma_{I}\right]$		C ₁₁	C ₁₂	C ₁₂	0	0	0	$\left[\varepsilon_{1} \right]$
σ_2		C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	0	0	0	ε2
σ_3		C ₂₁	C ₃₂	C ₂₂	0	0	0	ε3
τ23	=	0	0	0	$\frac{1}{2}(C_{22} - C_{23})$	0	0	γ_{23}
τ ₃₁		0	0	0	0	C ₆₆	0	γ ₃₁
τ ₁₂		0	0	0	0	0	C 66	$\left(\gamma_{12}\right)$

Οι ανεξάρτητες σταθερές μειώνονται τώρα σε 5, όπου $C_{33}=C_{22}, C_{13}=C_{12}, C_{55}=C_{66}, C_{44}=1/2*(C_{22}-C_{23})$ Τέλος στα ισότροπα υλικά έχουμε

$\left[\sigma_{1}\right]$		$\begin{bmatrix} C_{11} \end{bmatrix}$	C ₁₂	C ₁₂	0	0	0]	$\left[\epsilon_{1} \right]$
σ_2		C ₂₁	C_{11}	C ₁₂	0	0	0	ε2
σ		C ₂₁	C ₂₁	C ₁₁	0	0	0	ε_3
τ_{23}	=	0	0	0	$\frac{1}{2}(C_{11} - C_{12})$	0	0	γ ₂₃
τ_{31}		0	0	0	0.	$\frac{1}{2}(C_{11} - C_{12})$	0	γ ₃₁
$\left[\tau_{12} \right]$		0	0	0	0	0	$\frac{1}{2}(C_{11} - C_{12})$	$\left(\gamma_{12}\right)$

Οι ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές είναι 2, όπου $C_{11}=C_{22}=C_{33}$ $C_{12}=C_{23}=C_{31}$ $C_{44}=C_{55}=C_{66}=1/2^*(C_{11}-C_{12})$

Υλικό	Ανεξάρτητες	1-2-3	x-y-z	Μη μηδενικές
Τρικλινικό	21	36	36	36
Μονοκλινικό	13	20	36	36
Ορθότροπο	9	12	20	36
Εγκ.Ισότροπο	5	12	20	36
Ισότροπο	2	12	12	12

Πίν.2.2: Ελαστικές Σταθερές

Αντιστρέφοντας την σχέση τάσεων-παραμορφώσεων έχουμε

$\left[\epsilon_{1} \right]$		S_{11}	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆	$\left\{\sigma_{1}\right\}$
ε2		9	S ₂₂	S ₂₃	S ₂₄	S ₂₅	S26	σ_2
έ3				S_{33}	S ₃₄	S ₃₅	S36	σ_3
γ ₂₃	>=				S44	S45	S46	τ_{23}
Y 31						S_{55}	S 56	τ ₃₁
(γ 12)							S ₆₆	$\left[\tau_{12} \right]$

όπου S_{ij} είναι οι όροι ευκαμψίας.

2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ

Οι μηχανικές σταθερές (μέτρα ελαστικότητας) προσδιορίζονται με απλά πειράματα.

• Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση σ₁ όπου σ₂=σ₃=τ₂₃=τ₃₁=τ₁₂=0 έχουμε

$$\varepsilon_{1} = \frac{1}{E_{1}}$$

$$\varepsilon_{2} = -v_{12}\varepsilon_{1} = -\frac{v_{12}}{E_{1}} * \sigma_{1}$$

$$\varepsilon_{3} = -v_{13}\varepsilon_{1} = -\frac{v_{13}}{E_{1}}\sigma_{1}$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0$$

• Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση σ₂ όπου σ₁=σ₃=τ₂₃=τ₃₁=τ₁₂=0 έχουμε

$$\varepsilon_{2} = \frac{1}{E_{2}}$$

$$\varepsilon_{1} = -v_{21}\varepsilon_{2} = -\frac{v_{21}}{E_{2}} * \sigma_{2}$$

$$\varepsilon_{3} = -v_{23}\varepsilon_{2} = -\frac{v_{23}}{E_{2}}\sigma_{2}$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0$$

• Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση σ₃ όπου σ₁=σ₂=τ₂₃=τ₃₁=τ₁₂=0 έχουμε $ε_2 = \frac{\sigma_3}{\sigma_3}$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{3} &= E_{3} \\
\varepsilon_{1} &= -\nu_{31}\varepsilon_{3} = -\frac{\nu_{31}}{E_{3}} * \sigma_{3} \\
\varepsilon_{2} &= -\nu_{32}\varepsilon_{3} = -\frac{\nu_{32}}{E_{3}}\sigma_{3} \\
\gamma_{12} &= \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0
\end{aligned}$$

- Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση τ₂₃ όπου σ₁=σ₂=σ₃=τ₃₁=τ₁₂=0 έχουμε $\gamma_{23} = \tau_{23}/G_{23}$
- Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση τ₃₁ όπου σ₁=σ₂=σ₃=τ₂₃=τ₁₂=0 έχουμε $\gamma_{31} = \tau_{31}/G_{31}$
- Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση τ₁₂ όπου σ₁=σ₂=σ₃=τ₂₃=τ₃₁=0 έχουμε $\gamma_{12} = \tau_{12}/G_{12}$

Έτσι το αντίστροφο του νόμου ελαστικότητας συναρτήσει των μηχανικών σταθερών είναι:

$$\begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{1}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{2}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{3}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{1}} & \frac{1}{E_{2}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{3}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{1}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{2}} & \frac{1}{E_{3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

Οι λόγοι Poisson ορίζονται ως εξής: $v_{ij} = -\varepsilon_j / \varepsilon_i$, όπου i,j=1,2,3. Επειδή το μητρώο ελαστικότητας είναι συμμετρικό, θα ισχύει $\frac{v_{ij}}{E_i} = \frac{v_{ji}}{E_j}$ με i,j=1,2,3.

Για εγκάρσια ισότροπα υλικά:

 $G_{13} = G_{12}, \quad E_2 = E_3, \qquad \nu_{21} = \nu_{31}, \qquad \nu_{23} = \nu_{32},$ кан $G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{32})},$ Гіа іо́отропта иλіка́: $G = G_{ij}, \quad E = E_{ij}, \qquad \nu = \nu_{ij}, \qquad$ кан $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$

2.4 ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Έστω ένα ορθότροπο υλικό σε επίπεδη εντατική κατάσταση δηλ σ₃=τ₂₃=τ₃₁=0.Τότε έχουμε:



Οι ανεξάρτητες σταθερές είναι πλέον τέσσερεις, δηλ Ε1, Ε2, ν12, G12 και ισχύει

$$\frac{v_{12}}{E_1} = \frac{v_{21}}{E_2}$$

2.4.1 ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Στην περίπτωση αυτή είναι Ε1=Ε2 και κατ επέκταση ν12=ν21.Ισχύει:

ſ	ε,]		1/E1	$-v_{12}/E_1$	0	$\left(\sigma_{1}\right)$	
{	ε2	>=	$-\nu_{12}/E_{1}$	$1/E_1$	0	$\{\sigma_2\}$	2
	Y 12		0	0	$1/G_{12}$	τ_{12}	

Το υλικό έχει τρεις ανεξάρτητες σταθερές E₁, v₁₂, G₁₂.Στα τετραγωνικώς συμμετρικά είναι: $G_{12} \neq \frac{E_1}{2(1+v_{12})}$

2.4.2 ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΥΛΙΚΟ

Ισχύει:

$$G_{12} = \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})}$$

και έχουμε πια δύο ανεξάρτητες σταθερές Ε₁, ν₁₂:

$$\begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \gamma_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1/E_{1} & -\nu_{12}/E_{1} & 0 \\ -\nu_{12}/E_{1} & 1/E_{1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{E_{1}} \end{bmatrix} \begin{cases} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \tau_{12} \end{cases}$$

Με αντιστροφή της σχέσης τάσεων παραμορφώσεων

$$\begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \gamma_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{1}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{2}} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{1}} & \frac{1}{E_{2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

έχουμε την γενική περίπτωση ορθότροπου υλικού

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{cases} = \frac{1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \begin{bmatrix} E_1 & \nu_{21} E_1 & 0 \\ \nu_{12} E_2 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu_{12} \nu_{21}) G_{12} \end{bmatrix} \begin{cases} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{cases}$$

και ορίζοντας τους όρους ακαμψίας Q_{ij} ως ακολούθως

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - v_{12}v_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - v_{12}v_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{v_{21}E_1}{1 - v_{12}v_{21}} = \frac{v_{12}E_2}{1 - v_{12}v_{21}} = Q_{21}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

έχουμε την σχέση

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{cases}$$

Στο κύριο σύστημα 1-2 οι όροι Q₁₆=Q₂₆=Q₆₁=Q₆₂=0

Χρησιμοποιώντας τους όρους ευκαμψίας S_{ij}

[ε,]		S ₁₁	S ₁₂	0	$\left[\sigma_{1}\right]$
{ε2	>=	S ₂₁	S ₂₂	0	$\{\sigma_2\}$
(Y 12)		0	0	S ₆₆ _	$\left[\tau_{12} \right]$

όπου S_{11} =1/ E_1 , S_{22} =1/ E_2 , S_{12} = S_{21} =- v_{12}/E_1 =- v_{21}/E_2 , S_{66} =1/ G_{12}

Συνήθως τα σύνθετα υλικά αντιμετωπίζονται σαν δισδιάστατα ελαστικά υλικά. Ειδικότερα στα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά με προσανατολισμένες ίνες, κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από την κύρια διεύθυνση (1) που είναι παράλληλη στις ίνες, από την εγκάρσια διεύθυνση (2) κάθετη στις ίνες, και την εκτός του επιπέδου 1-2 διεύθυνση (3).

2.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Με τον όρο μηχανικές ιδιότητες εννοούμε τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού σαν ομογενές σώμα .Για τον προσδιορισμό τους χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι:

Εμπειρικές και ημιαναλυτικές μέθοδοι. Στηρίζονται σε απλές αρχές και πειραματική επαλήθευση.

Ενεργειακές μέθοδοι .Λεπτομερειακή ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

Μηχανική προσέγγιση :

Η μηχανική προσέγγιση ανήκει στην κατηγορία των ημιαναλυτικών μεθόδων και στηρίζεται στις εξής παραδοχές

- 1) Οι ίνες αποτελούνται από ομογενές ισότροπο γραμμικώς ελαστικό υλικό
- 2) βρίσκονται σε κανονική διάταξη προσανατολισμένες
- 3) Το μητρώο αποτελείται από γραμμικώς ελαστικό υλικό
- 4) Το υλικό του μητρώου είναι ομογενές ισότροπο

Ωστόσο οι τρείς πρώτες δεν είναι ακριβείς παραδοχές.

Διαμήκες Μέτρο Ελαστικότητας Ε1

$$\begin{split} \sigma_1 A &= \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \to \sigma_1 = \sigma_f \frac{A_f}{A} + \sigma_m \frac{A_m}{A} \\ E_1 &= E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \\ E_1 &= v_f E_f + v_m E_m \end{split}$$

Εγκάρσιο Μέτρο Ελαστικότητας Ε2

$$\begin{split} \varepsilon_1 &= v_f \varepsilon_f + v_m \varepsilon_m \\ &= v_f \frac{\sigma_2}{E_f} + v_m \frac{\sigma_2}{E_m} \\ \sigma_2 &= E_2 \varepsilon_2 = E_2 (v_f \frac{\sigma_2}{E_f} + v_m \frac{\sigma_2}{E_m}) \end{split}$$

Άρα

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{\nu_m E_f + \nu_f E_m}$$

Λόγος Poisson (εξ ορισμού v12=-ε2/ε1)

όπου Δ η βράχυνση.
$$\varDelta = -H \varepsilon_2 = H v_{12} \varepsilon_1$$

όπου Δ η βράχυνση.
$$\varDelta = \varDelta_m + \varDelta_f$$

$$\begin{split} \Delta_m &= H \nu_m \nu_m \varepsilon_1 \\ \Delta_f &= H \nu_f \nu_f \varepsilon_1 \end{split}$$

Άρα

$$v_{12} = v_f v_f + v_m v_m$$

Μέτρο Διάτμησης G₁₂



Σχ. 2.5 Υπολογισμός G₁₂

Η μηχανική προσέγγιση είναι ακριβής για τα E_1 και v_{12} αλλά όχι για τα E_2 και G_{12} .Για το λόγο αυτό προτάθηκαν βελτιώσεις βασισμένες σε πειραματικά αποτελέσματα.

Βελτίωση κατά Halpin και Tsai

Χρησιμοποιείται ο διορθωτικός όρος

$$\eta = \frac{E_f / E_m - 1}{E_f / E_m + \xi}$$

όπου ξ μια παράμετρος προσδιοριζόμενη από πειραματικά δεδομένα
Τότε τα μέτρα Ε2 και G12 υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta v_f}{1 - \eta v_f}$$
$$\frac{G_{12}}{G_m} = \frac{1 + \xi \eta v_f}{1 - \eta v_f}$$

Παρατηρήθηκε ότι για τιμή της παραμέτρου ξ=2 υπάρχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Βελτίωση κατά Tsai και Hahn

Εισάγεται η παράμετρος διαχωρισμού τάσεων η₂ και με βάση αυτήν υπολογίζονται τα μέτρα E₂ και G₁₂ από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[\frac{v_f}{E_f} + \frac{\eta_2 v_m}{E_m} \right]$$
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[\frac{v_f}{G_f} + \frac{\eta_2 v_m}{G_m} \right]$$

Παρατηρήθηκε ότι για τιμή της παραμέτρου διαχωρισμού τάσεων η₂=0,50 υπάρχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Μη προσανατολισμένες ίνες

Όταν οι ίνες είναι τυχαία διατεταγμένες στο σύνθετο υλικό η συμπεριφορά του τείνει να γίνει ισότροπη. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζονται πρώτα τα μέτρα Ε₁ και Ε₂ βάσει της μηχανικής προσέγγισης ή των προτεινόμενων βελτιώσεων και κατόπιν τα Ε και G από τις ακόλουθες ημιαναλυτικές σχέσεις κατά Naughton

$$E = \frac{3}{8}E_1 + \frac{5}{8}E_2$$
$$G = \frac{1}{8}E_1 + \frac{1}{4}E_2$$

και τελικά ο λόγος Poisson v από τη σχέση

$$v = \frac{E}{2G} - 1$$

Τύπος	Υλικό	E₁(GPa)	E ₂ (GPa)	V ₁₂	G ₁₂ (GPa)	Vf	P(g/cm3)			
T300/5208	Graphite/Epoxy	181	10.3	0.28	7.17	0.70	1.6			
B(4)/5505	Boron/Epoxy	204	18.5	0.23	5.59	0.50	2.0			
AS/3501	Graphite/Epoxy	138	8.96	0.30	7.10	0.66	1.6			
Scotchply 1002	Glass/Epoxy	38.6	8.27	0.26	4.14	0.45	1.8			
Kevlar 49	Aramid/Epoxy	76	5.50	0.34	2.30	0.60	1.46			

Πιν.2.5a: Ιδιότητες τυπικών σύνθετων υλικών

Τύπος	1-v ₁₂ *v ₂₁	Q ₁₁	Q ₂₂	Q ₁₂	Q 66			
T300/5208	1.0045	181.8	10.34	2.897	7.17			
B(4)/5505	1.0048	205.0	18.58	4.275	5.59			
AS/3501	1.0059	138.8	9.013	2.704	7.10			
Scotchply 1002	1.0147	39.16	8.392	2.182	4.14			
Kevlar 49	1.0084	76.64	5.546	1.886	2.30			

Πιν.2.5b: Ακαμψίες τυπικών σύνθετων υλικών (σε GPa)

Πιν.2.5c: Ευκαμψίες τυπικών σύνθετων υλικών (σε TPa⁻¹)

Τύπος	S ₁₁	S ₂₂	S ₁₂	S ₆₆
T300/5208	5.525	97.09	-1.547	139.5
B(4)/5505	4.902	54.05	-1.128	172.7
AS/3501	7.246	111.6	-2.174	140.8
Scotchply 1002	25.91	120.9	-6.744	241.5
Kevlar 49	13.16	181.8	-4.474	434.8

2.6 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ

Στα σύνθετα υλικά (ορθότροπα ή ανισότροπα)

- Οι ιδιότητες του υλικού επηρεάζονται από τον προσανατολισμό των ινών.
- Ο μετασχηματισμός είναι αναγκαίος για τον προσδιορισμό των τάσεων και παραμορφώσεων στο σύστημα υλικού 1-2.
- Ο μετασχηματισμός είναι αναγκαίος για τον προσδιορισμό των όρων ακαμψίας και ευκαμψίας καθώς και των ισοδύναμων μέτρων ελαστικότητας.



Σχ. 2.6a Μετασχηματισμός τάσεων



Σχ.2.6b Τομή α-α και ισορροπία δράσεων

Θεωρώντας τομή α-α κάθετα στη διεύθυνση των ινών και ισορροπία του τριγωνικού στοιχείου έχουμε:

Από ισορροπία κατά τον άξονα x, ΣF_x=0 c σ_x *s τ_{xy} =c σ_1 -s τ_{12}

Ισορροπία κατά τον άξονα y (ΣF_y=0) δίνει s σ_y+c τ_{xy}=s σ₁-c τ₁₂

Λύνοντας τις εξισώσεις αυτές ως προς τις τάσεις σ1 και τ12

 $\sigma_1 = c^2 \sigma_x + s^2 \sigma_y + 2cst_{xy}$ $\tau_{12} = -cs\sigma_x + cs + \sigma_y + (c^2 - s^2)\tau_{xy}$



Σχ.2.6b Τομή β-β και ισορροπία δράσεων

Κάνουμε μια τομή β-β παράλληλα στη διεύθυνση των ινών και θεωρούμε την ισορροπία του τριγωνικού στοιχείου

Ισορροπία κατά τον άξονα x (ΣFx=0) s $\sigma_{x^{-}}$ c τ_{xy} s $\sigma_{2^{-}}$ c τ_{12} Ισορροπία κατά τον άξονα y (ΣFy=0) c $\sigma_{y^{-}}$ s τ_{xy} =c σ_{2} +s τ_{12}

Λύνοντας τις παραπάνω δύο εξισώσεις ως προς τις τάσεις σ₂ και τ₁₂ παίρνουμε την έκφραση

 $\sigma_2 = s^2 \sigma_x + c^2 \sigma_y - 2cs\tau_{xy}$

Οπότε

$\left[\sigma_{1}\right]$	c ²	s ²	2cs]	$\left[\sigma_{x}\right]$	1.1	σ _x]
$\{\sigma_2\}=$	s ²	c ²	- 2cs	$\{\sigma_y\}$	} ≈ [T _σ ⁺]{	σ, }
$\left[\tau_{12}\right]$	-cs	cs	$c^2 - s^2$	$\left\{ \tau_{xy} \right\}$		¢ _{xy} ∫

όπου με τη βοήθεια του μητρώου μετασχηματισμού των τάσεων σ_x, σ_y, τ_{xy}, παίρνουμε τις τάσεις στο σύστημα υλικού 1-2. Έτσι προσδιορίζονται οι τάσεις σ₁, σ₂, τ₁₂.Η γωνία θ είναι θετικά ορισμένη.

Το μητρώο αντίστροφου μετασχηματισμού μπορεί να προκύψει με την αντιστροφή του $[T_{\sigma}^{+}].$

Χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό οι τάσεις σ_x σ_y και τ_{xy} υπολογίζονται από τις τάσεις σ_1 , σ_2 και τ_{12} . Έτσι:

$$\begin{cases} \sigma_{x} \\ \sigma_{y} \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} c^{2} & s^{2} & -2cs \\ s^{2} & c^{2} & 2cs \\ cs & -cs & c^{2} - s^{2} \end{bmatrix} \begin{cases} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \tau_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} T_{\sigma} \end{bmatrix} \begin{cases} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \tau_{12} \end{cases}$$

2.7 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ



Σχ.2.7 Μετασχηματισμός παραμορφώσεων

Οι παραμορφώσεις ορίζονται βάσει των μετατοπίσεων ως ακολούθως:

$$\varepsilon_{1} = \frac{\partial u_{1}}{\partial x_{1}}$$

$$\varepsilon_{2} = \frac{\partial u_{2}}{\partial x_{2}}$$

$$\gamma_{12} = \frac{\partial u_{2}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial u_{1}}{\partial x_{2}}$$

$$\varepsilon_{x} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_{y} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

Για τα συστήματα συντεταγμένων ισχύει $x_1=x \cos\theta + y \sin\theta = c x + s y$ $x_2=-x \sin\theta + y \cos\theta=-s x + c y$ και αντιστρόφως $x=c x_1 - s x_2$ $y=s x_1 + c x_2$

 $\begin{aligned} O\mu oίως για τις μετατοπίσεις ισχύει \\ u_1 = c \ u + s \ v & u_2 = -s \ u + c \ v \end{aligned}$

και αντιστρόφως u=c u₁- s u₂

V=S U₁-C U₂

Συνεπώς για την παραμόρφωση ε1 είναι:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} =$$

$$= \frac{\partial(c \ u + s \ v)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial(c \ u + s \ v)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial u}{\partial x} c^2 + \frac{\partial v}{\partial x} s \ c + \frac{\partial u}{\partial y} \ c \ s + \frac{\partial v}{\partial y} s^2$$
$$= \varepsilon_x c^2 + c \ s \ \gamma_{xy} + s^2 \varepsilon_y$$

Καθ όμοιο τρόπο προσδιορίζονται οι εκφράσεις των παραμορφώσεων ε2 και γ12. Άρα:

$$\begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \gamma_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} c^{2} & s^{2} & cs \\ s^{2} & c^{2} & -cs \\ -2cs & 2cs & c^{2} - s^{2} \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} T_{\varepsilon}^{+} \end{bmatrix} \{ \varepsilon \}$$

Ο μετασχηματισμός αυτός των παραμορφώσεων είναι επίσης ένας καθαρά γεωμετρικός μετασχηματισμός και το μητρώο[Τ_ε⁻] του αντίστροφου μετασχηματισμού υπολογίζεται θέτοντας αρνητική γωνία στο [Τ_ε⁺] δηλαδή:

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} c^{2} & s^{2} & -cs \\ s^{2} & c^{2} & cs \\ 2cs & -2cs & c^{2} - s^{2} \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \gamma_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} T_{\varepsilon}^{-} \end{bmatrix} \{ \varepsilon \}$$

Η διαφορά μεταξύ των μητρώων μετασχηματισμού [Τ_σ] και [Τ_ε] έγκειται στον ορισμό της διατμητικής παραμόρφωσης γ₁₂=2 ε₁₂.Γενικά ισχύει:

$$\begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \frac{1}{2}\gamma_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} T_{\sigma}^{+} \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} \end{cases}$$

Εισάγοντας τον συντελεστή 1/2, ο οποίος πολλαπλασιάζει τις παραμορφώσεις γ, στους όρους του μητρώου μετασχηματισμού των τάσεων [T_σ⁺] παίρνουμε το μητρώο μετασχηματισμού των παραμορφώσεων [T_ε⁺].

2.8 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΑΚΑΜΨΙΑΣ Q_{ij}

Στο σύστημα υλικού 1-2, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι:

$\left[\sigma_{1}\right]$		Q ₁₁	Q ₁₂	0]	$\left\{ \epsilon_{1} \right\}$	
{σ ₂	} =	Q ₁₂	Q ₂₂	0	$\{\epsilon_2\}$	
$[\tau_{12}]$	ļ	0	0	Q 66]	γ ₁₂	

Έστω ένα σύστημα x-y στραμμένο κατά γωνία θ σε σχέση με το σύστημα υλικού.



Σχ.2.8a Μετασχηματισμός όρων ακαμψίας

1ο βήμα

Εκφράζουμε τις παραμορφώσεις $ε_1$, $ε_2$ και $γ_{12}$ ως προς τις παραμορφώσεις $ε_x$, $ε_y$ και $γ_{xy}$ στο σύστημα x-y μέσω του θετικού μετασχηματισμού τάσεων [$T_ε^+$].

$$\varepsilon_{1} = c^{2}\varepsilon_{x} + s^{2}\varepsilon_{y} + cs\gamma_{xy}$$

$$\varepsilon_{2} = s^{2}\varepsilon_{x} + c^{2}\varepsilon_{y} - cs\gamma_{xy}$$

$$\gamma_{12} = -2cs\varepsilon_{x} + 2cs\varepsilon_{y} + (c^{2} - s^{2})\gamma_{xy}$$

2ο βήμα

Ekprázoume tig σ_1 , σ_2 , τ_{12} wg prog tig ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} .

$$\begin{split} \sigma_{1} &= \left(c^{2}Q_{11} + s^{2}Q_{12}\right)\varepsilon_{x} + \left(s^{2}Q_{11} + c^{2}Q_{12}\right)\varepsilon_{y} + \left(Q_{11} - Q_{12}\right)cs\gamma_{xy} \\ \sigma_{2} &= \left(c^{2}Q_{12} + s^{2}Q_{22}\right)\varepsilon_{x} + \left(s^{2}Q_{12} + c^{2}Q_{22}\right)\varepsilon_{y} + \left(Q_{12} - Q_{22}\right)cs\gamma_{xy} \\ \tau_{12} &= -2csQ_{66}\varepsilon_{x} + 2csQ_{66}\varepsilon_{y} + \left(c^{2} - s^{2}\right)Q_{66}\gamma_{xy} \end{split}$$

3ο βήμα

Εκφράζουμε τα $σ_x$, $σ_y$, $τ_{xy}$ ως προς τις $ε_x$, $ε_y$, $γ_{xy}$.(αρνητικό $[T_{\sigma}]$)

$$\begin{split} \sigma_{\mathbf{x}} &= \left[c^4 Q_{11} + s^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 Q_{12} + 4c^2 s^2 Q_{66} \right] \varepsilon_{\mathbf{x}} + \\ &+ \left[c^2 s^2 Q_{11} + c^2 s^2 Q_{22} + \left(c^4 + s^4 \right) Q_{12} - 4c^2 s^2 Q_{66} \right] \varepsilon_{\mathbf{y}} + \\ &+ \left[c^3 s Q_{11} - c s^3 Q_{22} + \left(c s^3 - c^3 s \right) Q_{12} + 2(c s^3 - c^3 s) Q_{66} \right] \gamma_{\mathbf{xy}} = \\ &= \overline{Q}_{11} \varepsilon_{\mathbf{x}} + \overline{Q}_{12} \varepsilon_{\mathbf{y}} + \overline{Q}_{16} \gamma_{\mathbf{xy}} \end{split}$$

Ομοίως αναπτύσσουμε τα σ_ν και τ_{xy} και προσδιορίζουμε τις εκφράσεις

$$\sigma_{y} = \overline{Q}_{i2}\varepsilon_{x} + \overline{Q}_{22}\varepsilon_{y} + \overline{Q}_{26}\gamma_{xy}$$

$$\tau_{xy} = \overline{Q}_{i6}\varepsilon_{x} + \overline{Q}_{26}\varepsilon_{y} + \overline{Q}_{66}\gamma_{xy}$$

Οι μετασχηματισμένοι όροι ακαμψίας Q_{ij} υπολογίζονται συναρτήσει των Q_{ij} ως ακολούθως:

$$\begin{cases} \overline{Q}_{11} \\ \overline{Q}_{22} \\ \overline{Q}_{12} \\ \overline{Q}_{66} \\ \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{26} \end{cases} = \begin{cases} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & -2c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ c^3s & -cs^3 & cs^3 - c^3s & 2(cs^3 - c^3s) \\ cs^3 & -c^3s & c^3s - cs^3 & 2(c^3s - cs^3) \end{cases} \begin{bmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{bmatrix}$$

Η σχέση μετασχηματισμού των όρων ακαμψίας γράφεται υπό συμβολική μορφή

Qīj=[Ta] Qīj

όπου το $[T_{\text{Q}}]$ είναι ένα μητρώο 6x4

Στο σύστημα 1-2 οι όροι Q_{16} , και Q_{26} είναι μηδενικοί.

Ο παραπάνω μετασχηματισμός ισχύει για προσήμανση με γωνία θ θετική.

Αν η θ είναι αρνητική απαιτείται αλλαγή προσήμων στην ανωτέρω σχέση.

Θετικό ή αρνητικό πρόσημο στη γωνία θ επηρεάζει μόνο το πρόσημο των όρων

Q16, Q26.

Τελικά για το σύστημα 1-2 έχουμε την ακόλουθη σχέση τάσεων παραμορφώσεων στο σύστημα x-y.

 $\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{cases} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases}$

Το μητρώο ακαμψίας [Q] είναι συμμετρικό Q12= Q21, Q16= Q61 και Q26= Q62.

Στην περίπτωση που γνωρίζουμε τα \overline{Q}_{ij} σε ένα σύστημα x'-y' και θέλουμε να προσδιορίσουμε τα \overline{Q}_{ij} σε ένα άλλο σύστημα x-y, ισχύει η ακόλουθη σχέση μεταξύ των \overline{Q}_{ij} και \overline{Q}_{ij} . (με θ τη γωνία μεταξύ των x-y και x'-y').



Σχ, 2.8b: Ορισμός γωνίας θ μεταξύ x-y και x'-y'

$\left[\overline{Q}_{11}\right]$		⊂c ⁴	· s ⁴	$2c^2s^2$	$4c^2s^2$	$-4c^{3}s$	$-4cs^3$	$\left[\overline{Q}_{11}'\right]$
\overline{Q}_{22}		s ⁴	c ⁴ .	$2c^2s^2$	$4c^2s^2$	$4cs^3$	4c ³ s	\overline{Q}'_{22}
\overline{Q}_{12}		c^2s^2	c^2s^2	$c^{4} + s^{4}$	$-4c^2s^2$	$2(c^3s - cs^3)$	$2(cs^3-c^3s)$	\overline{Q}_{12}'
\overline{Q}_{66}	(-	c^2s^2	c^2s^2	$-2c^2s^2$	$(c^2 - s^2)^2$	$2(c^3s-cs^3)$	$2(cs^3-c^3s)$	\overline{Q}_{66}'
\overline{Q}_{16}		c ³ s	$-cs^3$	$cs^3 - c^3s$	$2(cs^3-c^3s)$	$c^4 - 3c^2s^2$	$3c^2s^2 - s^4$	\overline{Q}_{16}'
\overline{Q}_{26}		cs ³	$-c^{3}s$	$c^3s - cs^3$	$2(c^3s-cs^3)$	$3c^2s^2 - s^4$	$c^4 - 3c^2s^2$	$\left[\overline{Q}_{26}^{\prime}\right]$

2.9 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ S_{ij}

Για τους άξονες υλικού 1-2, η σχέση είναι:

	(e ₁)		S ₁₁	S ₁₂	0]	$\left[\sigma_{i}\right]$)
ł	ε2	} ≃	S ₁₂	S_{22}	0.	σ_2	ł
	Y12		0	0	S ₆₆	$\left[\tau_{12}\right]$	ļ

Σε ένα σύστημα x-y, θα έχουμε:



Σχ. 2.9 Μετασχηματισμός των όρων ευκαμψίας

1ο βήμα:

Εκφράζουμε τις τάσεις σ₁, σ₂, τ₁₂ ως προς σ_x, σ_y, τ_{xy} με θετικό T_{σ}

$$\sigma_1 = c^2 \sigma_x + s^2 \sigma_y + 2cs\tau_{xy}$$

$$\sigma_2 = s^2 \sigma_x + c^2 \sigma_y - 2cs\tau_{xy}$$

$$\tau_{12} = -cs\sigma_x + cs\sigma_y + (c^2 - s^2)\tau_{xy}$$

2ο βήμα:

Eκφράζουμε τις ε₁, ε₂, γ₁₂ ως προς σ_x, σ_y, τ_{xy} ε_i = S₁₁(c²σ_x + s²σ_y + 2csτ_{xy}) + S₁₂(s²σ_x + c²σ_y - 2csτ_{xy}) ε₂ = S₁₂(c²σ_x + s²σ_y + 2csτ_{xy}) + S₂₂(s²σ_x + c²σ_y - 2csτ_{xy}) γ₁₂ = S₆₆(-csσ_x + csσ_y + (c² - s²)τ_{xy})

και αναδιατάσσοντας έχουμε $ε_1 = (c^2 S_{11} + s^2 S_{12})\sigma_x + (s^2 S_{11} + c^2 S_{12})\sigma_y + 2cs(S_{11} - S_{12})\tau_{xy}$ $ε_2 = (c^2 S_{12} + s^2 S_{22})\sigma_x + (s^2 S_{12} + c^2 S_{22})\sigma_y + 2cs(S_{12} - S_{22})\tau_{xy}$ $\gamma_{12} = -csS_{66}\sigma_x + csS_{66}\sigma_y + (c^2 - s^2)S_{66}\tau_{xy}$

3ο βήμα:

Εκφράζουμε τις εχ, εγ, γχγ ως προς σχ, σγ, τχγ με αρνητικό Τε. Για παράδειγμα για την εχ είναι

 $\varepsilon_{x} = c^{2}\varepsilon_{1} + s^{2}\varepsilon_{2} - cs\gamma_{12}$

Αναπτύσσοντας και αναδιατάσσοντας τους όρους προκύπτει η ακόλουθη σχέση μετασχηματισμού για τους όρους ευκαμψίας

 $\begin{cases} \overline{S}_{11} \\ \overline{S}_{22} \\ \overline{S}_{12} \\ \overline{S}_{66} \\ \overline{S}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -c^2s^2 \\ 4c^2s^2 & 4c^2s^2 & -8c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ 2c^3s & -2cs^3 & 2(cs^3 - c^3s) & cs^3 - c^3s \\ 2cs^3 & -2c^3s & 2(c^3s - cs^3) & c^3s - cs^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{bmatrix}$

ή υπό συμβολική μορφή δίj=[Τ₅]Sij, όπου Τs είναι ένα μητρώο 6x4.

Οι διαφορές μεταξύ των μητρώων μετασχηματισμού [T_S] και [T_Q], οφείλονται στον ορισμό της διατμητικής παραμόρφωσης γ_{ij}=2ε_{ij}.Τελικά, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων με όρους ευκαμψίας γίνεται στο στραμμένο σύστημα x-y:

$ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x} \end{cases} = $	$\begin{bmatrix} \overline{S}_{11} \\ \overline{S}_{12} \\ \overline{S}_{14} \end{bmatrix}$	\overline{S}_{12} \overline{S}_{22} \overline{S}_{26}	\overline{S}_{16} \overline{S}_{26} \overline{S}_{66}	$\left\{ \begin{matrix} \sigma_{\mathbf{x}} \\ \sigma_{\mathbf{y}} \\ \tau_{\mathbf{x}} \end{matrix} \right\}$
[Y _{xy}]	$[3_{16}]$	3 ₂₆	۵ ₆₆]	[^T xy]

Ο μετασχηματισμός των S_{ij}' από ένα σύστημα x'-y' σε ένα άλλο x-y είναι:

(Su)	c4	s ⁴	$2c^2s^2$	c^2s^2	$-2c^3s$	$-2cs^3$	$\left(\overline{S}_{11}^{\prime}\right)$
Sn		·s ⁴	c ⁴	$2c^2s^2$	c^2s^2	$2cs^3$	2c ³ s	\overline{S}_{22}'
5 ₁₂		c^2s^2	c^2s^2	$c^4 + s^4$	$-c^2s^2$	$c^3s - cs^3$	$cs^3 - c^3s$	\overline{S}'_{12}
566	}=	$4c^2s^2$	$4c^2s^2$	$-8c^2s^2$	$(c^2 - s^2)^2$	$4(c^{3}s - cs^{3})$	$4(cs^3 - c^3s)$	\overline{S}_{66}
S ₁₆		$2c^{3}s$	$-2cs^3$	$2(cs^3 - c^3s)$	$cs^3 - c^3s$	$c^4 - 3c^2s^2$	$3c^2s^2 - s^4$	\overline{S}_{16}'
[<u>5</u> 26	J	2cs ³	$-2c^3s$	$2(c^3s-cs^3)$	$c^3s - cs^3$	$3c^2s^2 - s^4$	$c^4 - 3c^2s^2$	\overline{S}_{26}

2.10 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Για να έχουμε μια εικόνα της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού οι ίνες του οποίου σχηματίζουν γωνία θ με το σύστημα x-y, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τα μέτρα ελαστικότητας, τους λόγους Poisson και το μέτρο διάτμησης που αντιστοιχούν στο στραμμένο σύστημα x-y.Οι ιδιότητες αυτές στο στραμμένο σύστημα x-y ονομάζονται μηχανικές σταθερές του υλικού και ορίζονται ως εξής:

\overline{S}_{11}	\overline{S}_{12}	\overline{S}_{16}		1/E _x	$-v_{yx}/E_y$	v_{sx}/G_{xy}
\overline{S}_{21}	\overline{S}_{22}	\overline{S}_{26}	÷	$-v_{xy}/E_x$	$1/E_y$	v_{sy}/G_{xy}
\overline{S}_{61}	\overline{S}_{62}	S ₆₆		v_{xs}/E_x	v_{ys}/E_y	1/G _{xy} ∫

Εμφανίζονται οι ν_{xs} και ν_{ys} που εμπλέκουν κύριες και διατμητικές παραμορφώσεις. Οι όροι αυτοί δεν υπάρχουν στα ισότροπα υλικά. Το παραπάνω μητρώο είναι συμμετρικό, αλλά οι λόγοι Poisson είναι διαφορετικοί.

Πειραματικά οι μηχανικές σταθερές προσδιορίζονται ως 1.Μονοαξονικός εφελκυσμός κατά x



 $\begin{array}{l} O\rho i\zeta ovt \alpha i \\ v_{xy}=-\epsilon_y/\epsilon_x=-\overline{S}_{21}/\overline{S}_{11} \\ v_{xs}=\gamma_{xy}/\epsilon_x=\overline{S}_{61}/\overline{S}_{11} \end{array}$

$$\begin{aligned} &\mathcal{A}\rho\alpha:\\ &\overline{S}_{21}=-\nu_{xy}\overline{S}_{11}=-\frac{\nu_{xy}}{E_x}\\ &\overline{S}_{61}=\nu_{xs}\overline{S}_{11}=\frac{\nu_{xs}}{E_x}\end{aligned}$$

2.Μονοαξονικός εφελκυσμός κατά γ

$$\epsilon_{x} = \overline{S}_{12}\sigma_{y}$$

$$\epsilon_{y} = \overline{S}_{22}\sigma_{y}$$

$$\gamma_{xy} = \overline{S}_{62}\sigma_{y}$$

Ορίζονται $v_{yx}=-ε_x/ε_y=-\overline{S}_{12}/\overline{S}_{22}$ $v_{ys}=v_{xy}/ε_y=\overline{S}_{62}/\overline{S}_{22}$

Άρα

$$\overline{S}_{12} = -v_{yx}\overline{S}_{22} = -\frac{v_{yx}}{E_y}$$
$$\overline{S}_{62} = v_{ys}\overline{S}_{22} = \frac{v_{ys}}{E_y}$$

3.Καθαρή διάτμηση



Ορίζονται ν₅x=εx/γxy=\$16/\$66 ν₅y=εy/γxy=\$26/\$66

Άρα: <u>S</u>16=V_{5X} <u>S</u>66=V_{5X}/G_{xy} <u>S</u>26=V_{5y} <u>S</u>66=V_{5y}/G_{xy}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας σύνθετων υλικών είναι

- a) Το κριτήριο μέγιστης τάσης
- b) Το κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης
- c) Το κριτήριο Tsai-Hill
- d) και Tsai-Wu

Ορίζονται οι ακόλουθες κρίσιμες τάσεις αστοχίας: Χ τάση αστοχίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό κατά x Χ' τάση αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη κατά x Υ τάση αστοχίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό κατά y Υ' τάση αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη κατά y S τάση αστοχίας σε καθαρή διάτμηση

Οι κρίσιμες τάσεις Χ, Χ', Υ, Υ' υπολογίζονται πειραματικά όπως στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3α: Πειραματικός υπολογισμός κρίσιμων τάσεων Χ, Χ', Υ, Υ', S

όπου ex, e'x, ey, e'y και γs είναι οι αντίστοιχες κρίσιμες παραμορφώσεις.

Α. Κριτήριο Μέγιστης Τάσης

Διατυπώθηκε υπό τον Jenkins (1920) για τα ορθότροπα υλικά και αποτελεί επέκταση του κριτηρίου Rankine για τα ισότροπα. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, αστοχία λαμβάνει χώρα όταν δεν ικανοποιείται μία από τις παρακάτω σχέσεις : X'<σ₁<X Y'<σ₂<Y $|T_{12}|$ <S

Β. Κριτήριο Μέγιστης Παραμόρφωσης

Διατυπώθηκε από τον Waddoups (1967) και αποτελεί επέκταση του κριτηρίου St.Venant για τα ισότροπα υλικά. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, αστοχία του υλικού επέρχεται όταν δεν ικανοποιείται έστω μία από τις σχέσεις: e'_x<ε_1<e_x e'_y<ε_2<e_y |γ_{12}|<γ_s Μια άλλη διατύπωση του κριτηρίου αυτού συναρτήσει των κρίσιμων τάσεων είναι:

 $\begin{array}{ll} \frac{X'}{E_1} < \epsilon_1 < \frac{X}{E_1} & \frac{Y'}{E_2} < \epsilon_2 < \frac{Y}{E_2} & |\gamma_{12}| < \frac{S}{G_{12}} \\ \\ \epsilon_1 = \sigma_1 / E_1 - \nu_{12} \sigma_2 / E_1 = X / E_1 & \sigma_2 = (\sigma_1 - x) / \nu_{12} & (\kappa \lambda i \sigma_1 \ 1 / \ \nu_{12}) \\ \epsilon_2 = \sigma_2 / E_2 - \nu_{21} \sigma_1 / E_2 = Y / E_2 & \sigma_2 = Y + \nu_{12} \sigma_1 & (\kappa \lambda i \sigma_1 \ \nu_{21}) \end{array}$

Γ. Κριτήριο Tsai-Hill

Ο Hill(1950) παρουσίασε μια θεωρία αστοχίας για ανισότροπα υλικά

 $(G+H)\sigma_{1}^{2}+(F+H)\sigma_{2}^{2}+(F+G)\sigma_{3}^{2}-2H\sigma_{1}\sigma_{2}-2G\sigma_{1}\sigma_{3}-2F\sigma_{2}\sigma_{3}+2L\tau_{23}^{2}+2M\tau_{31}^{2}+2N\tau_{12}^{2}\leq 1$

όπου οι G, H, F, L, Μ και Ν είναι σταθερές του υλικού.

Το κριτήριο αυτό είναι τετραγωνικό κριτήριο και παρόμοιο με το κριτήριο von Mises για ισότροπα.

To von Mises συνδέεται με την ενέργεια στρεβλώσεως.

Στα ανισότροπα υλικά, η ενέργεια στρεβλώσεως και η ενέργεια μεταβολής όγκου δεν μπορούν να απομονωθούν διότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση.

Οι έξι σταθερές υλικού G,H,F,L,M, N μπορούν να αντιστοιχιστούν με τις τάσεις αστοχίας.

Το κριτήριο αυτό είναι γενικό για τρισδιάστατη καταπόνηση.

Στη συνέχεια ο Tsai(1968) συνέδεσε τις σταθερές υλικού στο κριτήριο Hill με τις κρίσιμες τάσεις αστοχίας.

Εφαρμόζοντας μόνο τάση σ1 έχουμε (G+H)X2=1 οπότεG+H=1/X2Εφαρμόζοντας μόνο τάση σ2F+H=1/Y2και εφαρμόζοντας μόνο τάση σ3F+G=1/Z2όπου η Z είναι η τάση αστοχίας κατά τη διεύθυνση 3.Με επίλυση ως προς τις σταθερές H, G, F προκύπτει2H=1/X2+1/Y2-1/Z22G=1/Z2+1/X2-1/Y22F=1/Y2+1/Z2-1/X2Τέλος, εφαρμόζοντας μόνο τάσεις τ23, τ31, και τ12 προκύπτει2L=1/S2Y22M=1/S2X, και2N=1/S2

Για ένα σύνθετο υλικό με προσανατολισμένες ίνες κατά τη διεύθυνση x, οι ιδιότητες κατά y είναι ίδιες με αυτές κατά z και συνεπώς $2H=1/X^2$ $2G=1/X^2$ $2F=2/Y^2-1/X^2$

To κριτήριο Tsai-Hill εκφρασμένο στο επίπεδο απλοποιείται στη μορφή $(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 + 2N$ τ₁₂≤1 και από αντικατάσταση $\frac{\sigma_{-1}^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_{-2}^2}{Y^2} + \frac{\tau_{-12}^2}{S^2} \le 1$

Αστοχία υλικού λαμβάνει χώρα όταν δεν ικανοποιείται η ανωτέρω σχέση.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι κρίσιμες τάσεις αστοχίας [MPa} X, X', Y, Y' και S ορισμένων τυπικών σύνθετων υλικών καθώς και αυτές του αλουμινίου για σύγκριση.

Τύπος	Υλικό	vr	X	X	Y	Y'	S
T300/5208	Graphite Epoxy	0.70	1500	1500	40	246	68
B(4)/5505	Boron Epoxy	0.50	1260	- 2500	61	202	67
AS/3501	Graphite Epoxy	0.66	1447	1447	51.7	206	93
Scotchply 1002	Glass Epoxy	0.45	1062	610	31	118	72
Kevlar 49	Aramid Epoxy	0.60	1400	235	12	53	34
	Αλουμίνιο		400	400	400	400	230

Πίν.3: Κρίσιμες τάσεις αστοχίας ορισμένων σύνθετων υλικών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° ΜΕΜΒΡΑΝΙΚΗ ΑΚΑΜΨΙΑ

Δεχόμαστε σταθερή παραμόρφωση κατά το πάχος της διαστρωμάτωσης, δηλαδή είναι:

$$\begin{split} & \epsilon_x(z) = \epsilon_x(0) = \epsilon_x^0 \\ & \epsilon_y(z) = \epsilon_y(0) = \epsilon_y^0 \\ & \gamma_{xy}(z) = \gamma_{xy}(0) = \gamma_{xy}^0 \end{split}$$

Ορίζοντας βοηθητικά τη μέση τάση $\overline{\sigma_x} = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz$ $\overline{\sigma_y} = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz$ $\overline{\tau_{xy}} = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz$

και αντικαθιστώντας την σχέση τάσεων-παραμορφώσεων {σ}=[Q]{ε}, για παράδειγμα στην πρώτη των τριών ανωτέρω, έχουμε

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{11}\varepsilon_x + \bar{Q}_{12}\varepsilon_y + \bar{Q}_{16}\gamma_{xy})dz =$$

$$= \frac{1}{h} \left[\int \bar{Q}_{11} dz \,\varepsilon_x + \int \bar{Q}_{12} dz \,\varepsilon_y + \int \bar{Q}_{16} dz \,\gamma_{xy} \right] =$$

$$= \frac{1}{h} (A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{16}\gamma_{xy})$$

Μεταθέτοντας στο αριστερό μέλος της παραπάνω σχέσεως το πάχος h και ορίζοντας τη μεμβρανική δύναμη Nx ως το γινόμενο σx*h έχουμε την έκφραση

$$N_x = \bar{\sigma}_x * h = A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{16}\gamma_{xy}$$

Η μεμβρανική δράση Ν_x είναι αξονική δύναμη ανά μονάδα μήκους που εφαρμόζεται στο μέσο επίπεδο της διαστρωμάτωσης και ουσιαστικά αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε στρώση. Καθ' όμοιο τρόπο ορίζονται οι μεμβρανικές δυνάμεις Ν_y, Ν_{xy}.

Ορίζοντας λοιπόν τους όρους μεμβρανικής ακαμψίας

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} dz$$

με i, j =1,2,6

μπορούμε να γράψουμε τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων που προκύπτει μετά την ολοκλήρωση των τάσεων ως προς το πάχος της διαστρωμάτωσης ως εξής:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon^0_x \\ \varepsilon^0_y \\ \gamma^0_{xy} \end{pmatrix}$$

όπου οι όροι Α_ί λέγονται μεμβρανικές ακαμψίες της διαστρωμάτωσης και έχουν μονάδες κατανεμημένης δύναμης.

Αντιστρέφοντας την προηγούμενη σχέση έχουμε :

$$\begin{cases} \varepsilon^{0}{}_{x} \\ \varepsilon^{0}{}_{y} \\ \gamma^{0}{}_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{cases} N_{x} \\ N_{y} \\ N_{xy} \end{cases}$$

όπου οι όροι a_{ij} είναι οι μεμβρανικοί όροι ευκαμψίας της διαστρωμάτωσης.

Αν κάθε στρώση k έχει πάχος t_k τότε η σχέση για το A_{ij} γίνεται :

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} \, dz = \sum_{k=1}^{N} (\bar{Q}_{ij})_k \, t_k$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° ΔΙΑΤΡΗΤΕΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΛΗΡΩΣΗ ΟΠΗΣ

5 .1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΤΡΗΤΩΝ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΩΣΗ ΟΠΗΣ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροναυπηγική αλλά και στη ναυτιλία, όπου η θαλάσσια βιομηχανία επιδιώκει την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού από πλευρά βάρους, αντοχής υλικού και κόστους. Ο στόχος είναι να κατασκευαστεί το πλοίο καθ' ολοκληρία ή μέρη αυτού κατά το δυνατόν ελαφρότερο και ανθεκτικότερο στη διάβρωση, χωρίς συμβιβασμό στην αντοχή και το κόστος. Ενδεικτικά ένα πλοίο περιπολείας 55m και εκτοπίσματος 300 τόνων φτιαγμένο από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες υάλου, μπορεί να έχει βάρος 10% λιγότερο από ένα αντίστοιχο από αλουμίνιο, ή 35% συγκριτικά με ένα κατασκευασμένο από ατσάλι. Ωστόσο ακόμα και το κόστος συντήρησης, η μειωμένη κατανάλωση καυσίμου που οφείλεται στο μειωμένο βάρος είναι σημαντικά παράπλευρα ωφέλη.

Στα περιβάλλοντα όπως αεροναυπηγική και ναυτιλία μπορεί να προκληθεί βλάβη στο σύνθετο υλικό. Η συνηθέστερη, η βλάβη από πρόσκρουση είναι συνδυασμός από θραύση ινών, αποκόλληση στρώσεων, και κατά μήκος διαχωρισμός των ινών. Η αντοχή σε κρουστικό φορτίο εξαρτάται από την ανθεκτικότητα του συνδετικού υλικού, της διεπιφάνειας ινώνμήτρας, και των ινών.

Η πρόσκρουση μπορεί να είναι είτε με χαμηλή είτε με υψηλή ταχύτητα με βλάβη στο υλικό μη διατρητικής ή διατρητικής φύσης. Για παράδειγμα χαμηλής ταχύτητας θεωρείται η βλάβη από πτώση κάποιου βάρους στην εν λόγω επιφάνεια. Μια σημαντική κατηγορία βλαβών είναι η ζημιά που οφείλεται σε πρόσκρουση που γίνεται με υψηλή ταχύτητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι πρόσκρουση βλημάτων ή θραυσμάτων.

Οι επισκευές διακρίνονται ανάλογα με το σκοπό τους σε:

- αποκατάσταση επιφανείας
- αποκατάσταση στατικής αντοχής και δυσκαμψίας
- αποκατάσταση αντοχής σε κόπωση και μακροχρόνιας ανθεκτικότητας

Επισκευές μπορεί να αφορούν μέρη κατασκευαστικά ή μη. Η επισκευή ζημιάς μικρής περιοχής δεν είναι κρίσιμη, όπως αυτή που αφορά αποκολλήσεις στρώσεων ή θραύση ινών. Παρόλα αυτά μπορεί να επιβάλλεται για αισθητικούς λόγους ή για να αποφευχθεί μια συν τω χρόνω υποβάθμιση του υλικού. Μια επισκευή μη κατασκευαστικού μέρους μπορεί να γίνει σε μη ελεγχόμενο περιβάλλον.

Τύπος βλάβης	Ταξινόμηση επισκευής	Περιγραφή βλάβης
Μη κατασκευαστική	Καταγραφή και παρατήρηση	Όταν η φύση της βλάβης δε δικαιολογεί κανενός είδους επισκευή. Καταγραφή της μορφής της βλάβης ώστε να παρατηρηθεί και να συγκριθεί με τυχόν μελλοντική αλλοίωση.
	Επιφανειακή	Για τοπικές επιφανειακές αλλοιώσεις. Επαναφορά της επιφάνειας στην αρχική της μορφή ώστε π.χ να αποφευχθεί είσοδος της υγρασίας στο υλικό.
	Προσωρινή	Μόνο όταν υπάρχουν λειτουργικοί λόγοι που εμποδίζουν άλλη επισκευαστική προσέγγιση. Τέτοιου είδους επισκευές πρέπει να γίνονται μόνιμες όταν έρχεται ο καιρός της κανονικής συντήρησης τους.
Κατασκευαστική	Περιορισμένη	Κατασκευαστική αποκατάσταση στην περιορισμένη περιοχή βλάβης για να διασφαλισθεί η πλήρης λειτουργικό- τητα .Απαιτείται αυξημένη συχνότητα επιθεώρησης για να διασφαλισθεί η αποτελεσματικότητα της επισκευής.
	Εκτεταμένη	Εκτεταμένη αποκατάσταση της αρχικής ακεραιότητας της κατασκευής

Πιν.5α: Τύποι βλάβης

Η αξιολόγηση της ζημιάς είναι ένα σημαντικό βήμα πριν την επισκευή. Περιλαμβάνει μια σειρά από επιθεωρήσεις και αξιολογήσεις για να προσδιοριστεί η έκταση της ζημιάς. Στην περίπτωση σύνθετων υλικών ο ακριβής εντοπισμός της περιοχής που έχει υποστεί βλάβη είναι ένα περίπλοκο καθήκον γιατί μπορεί να υπάρχει εσωτερική βλάβη αποκόλλησης των στρώσεων που δεν φαίνεται με εξωτερικά. Για παράδειγμα σε ένα στρατιωτικό αεροσκάφος ένα βλήμα διαμέτρου 23mm μπορεί να αφήσει μια οπή 25mm σε διάμετρο, περιβαλλόμενη από αποκόλληση των στρώσεων σύνθετου υλικού διαμέτρου 15mm περισσότερο. Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται διάφοροι μη καταστροφικοί μέθοδοι εκτίμησης όπως παλμών υπερήχων ή υπέρυθρης ακτινογραφίας.

Επιφανειακού τύπου επισκευή (Cosmetic Repairs)

Ένα υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται για να επαναφέρει το τμήμα στην αρχική του επιφάνεια. Πρόκειται για εξωτερική επέμβαση που δεν επιδρά στην αντοχή. Αναφερόμαστε σε πολύ μικρές περιοχές που έχουν υποστεί ζημιά και για μη δομικά στοιχεία.



Σχ 5a Επιφανειακού τύπου επισκευή

Επισκευή με έκχυση ρητίνης (Resin Injection Repairs)

Συστήνεται για επισκευή μικρών αποκολλήσεων στρώσεων στην άκρη, κατά μήκος της ζώνης στα άκρα με την προϋπόθεση ότι υπάρχει πλήρης πρόσβαση για την πραγματοποίηση της επισκευής.



Σχ. 5b Επισκευή με έκχυση ρητίνης

Μερικώς κατασκευαστική πλήρωση οπής (Semi Structural Plug/Patch)

Αυτού του είδους η επισκευή χρησιμοποιείται για να ξανακερδίσουμε τμήμα της αρχικής αντοχής της κατασκευής. Ένα έμβολο πυρήνα ή ένα υλικό πληρώσεως με διπλό επικάλυμμα συμβάλλει στην ομαλότερη μεταφορά των φορτίων γύρω από την περιοχή που έχει υποστεί βλάβη. Το μηχανικά-τοποθετημένο έμβολο (πχ έμβολο πυρήνα) και το "μπάλωμα" στην επιφάνεια μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στα συμπαγή μεγάλου πάχους σύνθετα υλικά, κωνικού τύπου επισκευές είναι προτιμότερες.



Σχ. 5c Μερικώς κατασκευαστική πλήρωση οπής

Δομική επισκευή με μηχανικώς συνδεδεμένα doubler (Structural Mechanically Fastened Doubler Repairs)

Δομικές επισκευές με την χρήση doubler μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση που τα σύνθετα υλικά είναι συμπαγή με μεγάλο φορτίο. Συχνά είναι το μόνο πρακτικό μέσο για επισκευή τέτοιου είδους κατασκευών. Το φορτίο μεταφέρεται πάνω, κάτω και γύρω από την περιοχή που έχει υποστεί βλάβη. Ωστόσο τέτοιου είδους επισκευές δεν είναι αεροδυναμικά λείες. Σε περιπτώσεις όπως πολεμικά αεροσκάφη που υπάρχουν απαιτήσεις χαμηλής αναγνωρισιμότητας από ανιχνευτικές μεθόδους του εχθρού αποτελεί πιθανό τρωτό σημείο.



Σχ. 5d Δομική επισκευή με μηχανικώς συνδεδεμένα doubler

Δομική επισκευή με doubler με συγκολλητική ουσία (Structural Adhesively Bonded Doubler Repairs)

Δομικές επισκευές με doubler χρησιμοποιούνται μερικές φορές για μικρού πάχους κατασκευές από σύνθετα υλικά (οι επισκευές με χρήση μπουλονιών συνίστανται για μεγαλύτερα πάχη). Τα υλικά και οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για αυτού του είδους τις επισκευές μπορεί να αφορούν υγρό στρώσιμο σε καλούπια(wet lay-up) ή υλικά προεμποτισμένα(prepreg), να γίνονται σε θερμοκρασία δωματίου ή υψηλές θερμοκρασίες κύκλων πολυμερισμού, να έχουν άμεση ή έμμεση σύνδεση στην κατασκευή.

Δομική επισκευή με λείανση (Flush Structural Repair)

Για λεπτά συμπαγή υλικά, συμπαγή ή sandwich, θεωρείται ο πιο αποτελεσματικός τρόπος. Αποκαθιστούν την αντοχή και τη δυσκαμψία με ελάχιστη αύξηση βάρους. Με αυτού του είδους την επισκευή που ονομάζεται taperedscarf, μπορεί να επιτευχθεί η αρχική επιπεδότητα. Η διαδικασία επιτυγχάνεται με την λείανση του κωνικού



Σχ. 5e Δομική επισκευή με λείανση

σχήματος τεμαχίου, γύρω από την περιοχή που είχε υποστεί ζημιά (όπως φαίνεται στην εικόνα). Έπειτα οι στρώσεις που προορίζονται για επισκευή τοποθετούνται κατά μήκος της

λειασμένης επιφάνειας επικαλύπτοντας τις αντίστοιχες αρχικές στρώσεις. Κάθε στρώση έχει προσανατολισμό ίδιο με την αντίστοιχη στρώση της αρχικής κατασκευής. Η βάση που προορίζεται για το κωνικού σχήματος τμήμα που θα προσθέσουμε, πρέπει να έχει λειανθεί και διαμορφωθεί υπό γωνία. Αυτή είναι διαδικασία που γίνεται από καλά εκπαιδευμένο τεχνικό ή μηχανικό

Επισκευή με εμφύσηση ρητίνης (Resin Infusion Repairs)

Οι βασικές αρχές είναι και πάλι εντοπισμός και αφαίρεση των στρώσεων με τη βλάβη, κατασκευή, και προετοιμασία της περιοχής. Ωστόσο τα υλικά που χρησιμοποιούνται δεν είναι προεμποτισμένα σε συνδετικό υλικό αλλά εν ξηρώ. Μέρος του σχεδιασμού είναι να βεβαιωθούμε ότι το συνδετικό υλικό θα διατρέξει όλη την περιοχή που είχε υποστεί βλάβη. Αυτό γίνεται δημιουργώντας κενό, αφού έχουμε σφραγίσει αυτό το τμήμα. Η υποπίεση για έκχυση συνδετικού υλικού είναι προτιμότερη από την έκχυση υλικού μέσω πίεσης μεγαλύτερης από τον ατμοσφαιρικό αέρα, καθώς στη δεύτερη περίπτωση οι παραμικρές ρωγμές μπορούν να ανοίξουν εντείνοντας την αποκόλληση στρώσεων και τη συνολική ζημιά. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε μεγάλες κατασκευές όπως κελύφη πλοίων.

5.2 ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΑΤΡΗΤΩΝ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΩΝ

Το εντός επιπέδου φορτίο σ_i, ο προσανατολισμός των κυρίων αξόνων της έλλειψης ψ, και ο λόγος a/b από τον οποίο αυτή χαρακτηρίζεται, είναι δεδομένα αυθαίρετα.



Σχ. 5.2 Εντός επιπέδου τάσεις στους κύριους άξονες ελλειπτικής οπής για διάτρητο σύνθετο υλικό

5.2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Η κατανομή των τάσεων εξαιτίας ενός ανοίγματος αποκτάται από την επαλληλία τάσεων

 $\{\sigma\}=\{\sigma^0\}+\{\sigma^*\},\$

όπου {σ⁰} η τάση από το ομοιόμορφο πεδίο τάσεων και { σ } η τάσεις λόγω ανοίγματος.

Όλες οι συνιστώσες τάσεων αναφέρονται στους κυρίους και δευτερεύοντες άξονες της έλλειψης. Η σχέση μεταξύ του πεδίου τάσεων στο άπειρο στους άξονες 1-2 του σύνθετου υλικού, και αυτού στους άξονες της έλλειψης δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

 $\begin{array}{l} \sigma_1^0=\sigma_1*\sin^2\psi+\sigma_2*\cos^2\psi+\sigma_6*\sin2\psi\\ \sigma_2^0=\sigma_1*\cos^2\psi+\sigma_2*\cos^2\psi-\sigma_6*\sin2\psi\\ \sigma_6^0=-(\sigma_1-\sigma_2)*\sin\psi*\,\cos\psi-\sigma_6*\cos2\psi \end{array}$

Το πεδίο τάσεων λόγω του ανοίγματος είναι:

$$\begin{split} \sigma_1^* &= Re\left[(\mu_1^2 * f_1 * g_2 - \mu_2^2 * f_2 * g_1)/(\mu_1 - \mu_2)\right] \\ \sigma_2^* &= Re\left[(f_1 * g_2 - f_2 * g_1)/(\mu_1 - \mu_2)\right] \\ \sigma_6^* &= Re[-(\mu_1 * f_1 * g_2 - \mu_2 * f_2 * g_1)/(\mu_1 - \mu_2)] \end{split}$$

όπου:

 $f_{j} = (1-i\mu_{j}\lambda)/[\beta\sqrt{\beta^{2}-1-\mu_{j}^{2}\lambda^{2}}+\beta^{2}-1-\mu_{j}^{2}\lambda^{2}]$

 $g_j = -(1-i\mu_j\lambda)\sigma_6^{o}-\mu_j\sigma_2^{o}+i\lambda\sigma_1^{o}$

j = 1,2

 $\beta = (1+\alpha)\cos\theta + \mu_i(\lambda+\alpha)\sin\theta$

 $\lambda = b/a, \alpha = b_0/a$

και το b₀ είναι η χαρακτηριστική διάσταση που μετράται ακτινικά, όπως φαίνεται στο σχήμα:



Σχ. 5.2.1 Ορισμός χαρακτηριστικής διάστασης

Ο μιγαδικός αριθμός μ_j είναι η λύση της ακόλουθης χαρακτηριστικής εξίσωσης: $a_{11}\mu^4 - 2a_{16}\mu^3 + (2a_{12} + a_{66})\mu^2 - 2a_{26}\mu + a_{22} = 0$

όπου a_{ij} είναι οι μεμβρανικοί όροι ευκαμψίας της διαστρωμάτωσης.

Για μια ορθότροπη πλάκα a₁₆=a₂₆=0, οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

 $a_{11}\mu^4 + (2a_{12} + a_{56})\mu^2 + a_{22} = 0$

Για τετράγωνη συμμετρική, $a_{11}=a_{22}$, οπότε η χαρακτηριστική εξίσωση γίνεται: $a_{11}\mu^4+(2a_{12}+a_{66})\mu^2+a_{11} = 0$

Για ισότροπη πλάκα, $a_{11}=a_{12}+a_{66}/2=a_{66}=2(a_{11}-a_{12})$ $\mu^4+2\mu^2+1 = 0$

5.2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΤΡΗΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η πρόβλεψη αστοχίας μέσω της μεθόδου "first ply failure" είναι η μέθοδος που χρησιμοποιεί στοιχεία από το διαστρωμένο υλικό θεωρώντας το ότι είναι ομογενές. Έπειτα παίρνει το φορτίο που εφαρμόζεται στο σύνθετο υλικό και βρίσκει τις τάσεις που εφαρμόζονται σε κάθε στρώση. Κατόπιν, ένα κριτήριο αστοχίας (Tsai-Wu, Max-Stress κλπ) χρησιμοποιείται για να καθορίσει το φορτίο κάτω από το οποίο παρατηρείται αστοχία σε μία από τις στρώσεις. Οπότε τότε, σύμφωνα με τη μέθοδο First Ply Failure τότε θα έχει αστοχήσει και το σύνθετο υλικό εξ ολοκλήρου. Η πρόβλεψη της αντοχής βασίζεται στην προαναφερθείσα μέθοδο "αστοχίας της πρώτης στρώσης" (First Ply Failure-FRF) κατά μήκος του περιγράμματος της έλλειψης με μια ακτινική μετατόπιση b_0 κατά μήκος και των δύο αξόνων 1 και 2. Το περίγραμμα αυτό περιγράφεται από την εξίσωση

$x^{2}/(a+b_{0})^{2}+y^{2}/(b+b_{0})^{2}=1$

Οι λόγοι μήκους και πλάτους της εσωτερικής και της εξωτερικής έλλειψης δεν είναι οι ίδιοι. Η αντοχή του σύνθετου υλικού με οπή θα εξαρτηθεί από τον χαμηλότερο λόγο δύναμης/αντοχής R κατά μήκος αυτού του περιγράμματος

Ένας μειωτικός συντελεστής της αντοχής καθορίζεται ως εξής:

SRF=λόγος της αντοχής του σύνθετου υλικού με οπή προς εκείνου χωρίς οπή

Η χωρίς οπή αντοχή καθορίζεται από μια πλάκα χωρίς οπές χρησιμοποιώντας το τετραεδρικό κριτήριο αστοχίας FPF.Av υποθέσουμε ότι ο παράγοντας μείωσης της αντοχής παραμένει ο ίδιος για την αστοχία της τελευταίας στρώσης και για πειραματικά μετρημένη μέγιστη αντοχή, μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίστοιχη αντοχή για το σύνθετο με οπή υλικό.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΝΟΤCHED LAMINATES

Έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα με δοκίμια γωνίας ινών π/4 με οπές και ίνες από άνθρακα και γυαλί, που αφορούν κυκλική οπή και ομοιόμορφο αξονικό εφελκυστικό φορτίο. Γύρω από την οπή το περίγραμμα b₀ παίρνει την τιμή 0,05 inch. Οι διπλανές είναι οι καμπύλες που ταιριάζουν καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα.



Σχ. 5.2.2a: Μειωτικός συντελεστής αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό για δοκίμια ινών π/4 με κυκλική οπή, συναρτήσει ακτίνας οπής

Για μια πλάκα με κυκλικές οπές που υπόκεινται μονοαξονική θλίψη, το χαρακτηριστικό μήκος b₀ που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα είναι 0,015 για θλίψη και

0,025 για εφελκυσμό.Το υλικό είναι CFRP AS4/3502. Στο διπλανό φαίνεται σχήμα 0 μειωτικός SRF συντελεστής αντοχής χρησιμοποιώντας αυτά тα χαρακτηριστικά μήκη b₀.Mɛ κουκίδες φαίνονται τα πειραματικά μεγέθη που έχουν προκύψει για εφελκυσμό και με τα τρίγωνα για θλίψη.

Σχ. 5.2.2b: Μειωτικός συντελεστής για δοκίμια AS4/3502 συναρτήσει ακτίνας.



5.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΤΡΗΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Το κλειδί για τον υπολογισμό της αντοχής των notched laminates είναι το χαρακτηριστικό μήκος. Το χαρακτηριστικό μήκος καθορίζεται εμπειρικά από μετρήσεις αντοχής των σύνθετων υλικών με οπή ή ρωγμές. Θεωρείται ότι το χαρακτηριστικό μήκος είναι μία συνάρτηση των ακόλουθων παραμέτρων:

Οι στρώσεις που χρησιμοποιούνται πχ CFRP, GFRP κλπ

- Η διαδοχική σειρά των στρώσεων
- Ο λόγος πλευρών του ανοίγματος πχ κυκλικές οπές ή ρωγμές

Το φορτίο που εφαρμόζεται σε απόσταση που θεωρείται "άπειρη" πχ {σ_i}
 Επίσης κάνουμε την υπόθεση ότι το χαρακτηριστικό μήκος δεν μεταβάλλεται σημαντικά με:

- Το απόλυτο μέγεθος του ανοίγματος
- Το απόλυτο πάχος του σύνθετου υλικού

Από πειράματα τριών σημείων λυγισμού με ρωγμές στα άκρα και το κέντρο προέκυψε

ότι οι ζώνες βλάβης παρέμειναν σχεδόν ίσες στο μέγεθος. Όση επέκταση είχαμε για το υλικό των 32 στρώσεων είχαμε και για το υλικό 64 στρώσεων.

Στο σχήμα απεικονίζεται η αντοχή συναρτήσει του χαρακτηριστικού μήκους για οπές που υποβάλλονται σε μονοαξονικό εφελκυστικό φορτίο. Με πειράματα πάνω σε σύνθετα υλικά CFRP όπου επιτρεπόταν μόνο γωνίες ινών 0°, 45°, 90° και -45°, τα υψηλότερης αντοχής ήταν αυτά που είχαν συνδυασμούς που φαίνονται στο διπλανό σχήμα. Το χαρακτηριστικό μήκος είναι κανονικοποιημένο με την ακτίνα a της οπής.

Για το ίδιο χαρακτηριστικό μήκος b₀, μεγαλύτερο κανονικοποιημένο μήκος συνεπάγεται μικρότερη ακτίνα οπής. Όσο μειώνεται η κυκλική οπή σε διάμετρο τόσο αυξάνεται η αντοχή του notched laminate.

Όταν η το μέγεθος της οπής πλησιάσει στο μηδέν, η αντοχή του unnotched laminate αποκαθίσταται.





Αφού το χαρακτηριστικό μήκος δεν μεταβάλλεται με το μέγεθος και το πάχος του σύνθετου υλικού, το προηγούμενο διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και την εκτίμηση βλάβης. Το διαστρωμένο υλικό με την μεγαλύτερη αντοχή (για ίδιο χαρακτηριστικό μήκος) είναι το $[0_6/\pm45]_{\rm s}$. Μάλιστα παρατηρούμε ότι είναι σημαντικά υψηλότερη η αντοχή του από το $[0/90/\pm45]_{\rm s}$.

Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η αντοχή για CFRP T300/5208 που έχουν ρωγμές κάθετες σε μονοαξονικό εφελκυστικό φορτίο, συναρτήσει του κανονικοποιημένου χαρακτηριστικού μήκους b₀/a.



Σχ.5.2.3b: Μειωτ. συντελεστής αντοχής συναρτήσει κανονικοποιημένου b₀ για μονοαξονική εφελκυστική δύναμη σε δοκίμιο με μικρές ρωγμές



Σχ.5.2.3c: Μειωτ. συντελεστής αντοχής συναρτήσει κανονικοποιημένου b₀ για μονοαξονική εφελκυστική δύναμη σε δοκίμιο με μεγάλες ρωγμές

Το σύνθετο υλικό $[0_6/\pm 45]_s$ είναι το δυνατότερο laminate μέχρι να έχουμε μεγάλη οπή. Η επίδραση του απόλυτου μεγέθους της οπής φαίνεται από το αμέσως προηγούμενο σχήμα, αν εντοπίσουμε ένα σημείο της καμπύλης. Για παράδειγμα για b₀/a=0,20 και θεωρώντας b₀=0,1 inch μπορούμε να υπολογίσουμε ότι το μισό μήκος ανοίγματος είναι a=0,1/0,2=0,5 inch.

5.2.4 ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΛΗΡΩΣΗ ΟΠΗΣ

Για ένα σύνθετο υλικό που περιλαμβάνει ένα inclusion, η ανάλυση στηρίζεται σε εκείνη του σύνθετου υλικού με οπή. Θα εξετάσουμε τη βασικότερη περίπτωση που οι κύριοι άξονες της έλλειψης συμπίπτουν με τους άξονες του σύνθετου υλικού, πχ γωνία ψ=90°. Συνεχίζουν να ισχύουν για το διαστρωματωμένο υλικό οι σχέσεις:

 $\{\sigma\} = \{\sigma^0\} + \{\sigma^*\}$

$$\begin{aligned} \sigma_{1}^{0} &= \sigma_{1} * sin^{2}\psi + \sigma_{2} * cos^{2}\psi + \sigma_{6} * sin2\psi \\ \sigma_{2}^{0} &= \sigma_{1} * cos^{2}\psi + \sigma_{2} * cos^{2}\psi - \sigma_{6} * sin2\psi \\ \sigma_{6}^{0} &= -(\sigma_{1} - \sigma_{2}) * sin\psi * cos\psi - \sigma_{6} * cos2\psi \end{aligned}$$

και

$$\begin{split} \sigma_1^* &= Re\left[(\mu_1^2 * f_1 * g_2 - \mu_2^2 * f_2 * g_1)/(\mu_1 - \mu_2)\right] \\ \sigma_2^* &= Re\left[(f_1 * g_2 - f_2 * g_1)/(\mu_1 - \mu_2)\right] \\ \sigma_6^* &= Re\left[-(\mu_1 * f_1 * g_2 - \mu_2 * f_2 * g_1)/(\mu_1 - \mu_2)\right] \end{split}$$

Ωστόσο τώρα είναι:

$$\mathbf{g}_{j} = (\sigma_{1} \cdot - \sigma_{1} \cdot)\lambda \mathbf{i} - (\sigma_{2} \cdot - \sigma_{2} \cdot)\mu_{j} - (\sigma_{6} \cdot - \sigma_{6} \cdot)(1 - \mathbf{i}\mu_{j}\lambda)$$

όπου j=1,2 και σ_1 ', σ_2 ', σ_6 ' είναι οι τάσεις για το inclusion στους άξονες του laminate.

Οι τάσεις αυτές μπορούν να γραφτούν:

$$\sigma_{1}' = (\sigma_{1}^{*}/D1)[a_{11}a_{22}(k + n) + a_{11}a_{22}'k(1 + n) + a_{22}(a_{12} + a_{66} + a_{12}')] + (\sigma_{2}^{*}/D2)[a_{11}(a_{22} - a_{22}') + a_{22}(a_{12} - a_{12}')(n + k)/k^{2}] \sigma_{2}' = (\sigma_{1}^{*}/D1)[a_{22}(a_{11} - a_{11}') + a_{11}(a_{12} - a_{12}')k(1 + n)] + (\sigma_{2}^{*}/D2)[a_{11}a_{22}(1 + n)/k + a_{22}a_{11}'(n + k)/k^{2} + a_{11}(a_{12} + a_{66} + a_{12}')] \sigma_{6}' = (\sigma_{6}^{*}/D6)[a_{11}nk + (2a_{12} + a_{66})k + a_{22}(2 + n)]$$

όπου a_{ij} και a_{ij}' (i,j=1,2,6) είναι οι όροι ευκαμψίας του υλικού με διαστρωματώσεις και του inclusion και είναι

D1 =
$$(a_{11}a_{22} + a_{11}'a_{22}')k + a_{22}(a_{66} + 2a_{12}') + (a_{11}a_{22}'k + a_{22}a_{11}')n - (a_{12} - a_{12}')^2k$$

$$D2 = (a_{11}a_{22} + a_{11}'a_{22}')/k + a_{11}(a_{66} + 2a_{12}') + (a_{22}a_{11}'/k + a_{11}a_{22}')n/k - (a_{12} - a_{12}')^2/k$$

$$D6 = a_{11}kn + (2a_{12} + a_{66}')k + a_{22}(2 + n)$$

στην οποία

$$k = -\mu_1 \mu_2 = \sqrt{a_{22}/a_{11}}$$

$$n = -i(\mu_1 + \mu_2) = \sqrt{(2a_{12} + a_{66})/a_{11}} + 2\sqrt{a_{22}/a_{11}}$$

Έστω υλικό [0/±45/90]_s από CFRP T300/5208. Οι εφαπτομενικές τάσεις στο σύνορο σύνθετου υλικού και inclusion είναι αυτές που φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Η μέγιστη θετική εφαπτομενική τάση βρίσκεται στον άξονα κάθετα στο εφαρμοζόμενο φορτίο. Στο σχήμα φαίνονται οι συγκεντρώσεις τάσεων για τις εξής περιπτώσεις:

- a) Απουσία inclusion, όπου παίρνει την τιμή 3.
- b) Για αλουμίνιο inclusion όπου παίρνει την τιμή 1,004.
- c) Για CFRP π/4 inclusion όπου παίρνει την τιμή 1.
- d) Για inclusion από χάλυβα όπου παίρνει την τιμή 1,44.



Σχ. 5.2.4a: Εφαπτομενική συγκέντρωση τάσεων στο σύνορο για Graphite/Epoxy [0/±45/90]_s.

Η αντοχή ενός laminate με inclusion μπορεί να προβλεφθεί χρησιμοποιώντας ένα χαρακτηριστικό μήκος που καθορίζεται από ένα laminate με οπή.

Για CFRP T300/5280 [0±45/90]_s χρησιμοποιώντας το χαρακτηριστικό μήκος b₀=0,05" (το οποίο ταιριάζει καλύτερα για την περίπτωση οπής), μπορεί επίσης να υπολογιστεί η μείωση της αντοχής για inclusion αλουμινίου ή χάλυβα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μείωση της αντοχής για το laminate με inclusion, είναι μεγαλύτερη απ ότι χωρίς inclusion. Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής μείωσης της αντοχής είναι 0,4 για το π/4 laminate με οπή, 0,8 για αυτό που έχει inclusion από χάλυβα και 0,996 για εκείνο με inclusion αλουμινίου.



Σχ. 5.2.4b: Μειωτικός συντελεστής αντοχής για Graphite/Epoxy T300/5208 [0/±45/90]₂₈ laminate με ανοιχτή οπή και inclusions από αλουμίνιο και χάλυβα.

Οι εκτιμήσεις αντοχής για Glass/Epoxy [0/±45/90]_s με κυκλική οπή, και πυρήνα από χάλυβα ή αλουμίνιο συγκρίνονται στο παραπάνω σχήμα. Ο μειωτικός συντελεστής αντοχής γι αυτό το π/4 laminate για οπή ακτίνας 0,5" είναι 0,4. Με χρήση αλουμινένιου πυρήνα, η αντοχή αποκαθιστάται κατά 77% σε σχέση με την αντοχή του σύνθετου αν δεν υπήρχε άνοιγμα. Με χρήση χαλύβδινου πυρήνα η αποκατάσταση είναι μικρότερη, στο 70%.

Ακολουθούν δύο μελέτες παραμέτρων για ορθότροπα laminates με κυκλικά inclusions. Μελετούνται inclusions από τρία υλικά αλουμίνιο, τιτάνιο και χάλυβα. Στο σχήμα φαίνεται η απομείωση αντοχής για CFRP T300/5208 [0/±45]_s laminate με οπή, συγκρινόμενο με ένα που έχει inclusion. Ένα χαρακτηριστικό μήκος b₀=0,05" που είναι το καλύτερο για οιονεί ισοτροπικό σύνθετο υλικό, χρησιμοποιήθηκε. Η αντοχή του σύνθετου υλικού με το inclusion τιτανίου, είναι η υψηλότερη ανάμεσα στα τρία αυτά υλικά. Ωστόσο, το σύνθετο υλικό με το είχε απλά την κυκλική οπή για διάμετρο μεγαλύτερη από 0,6".

Στο ακόλουθο σχήμα χρησιμοποιείται το T300/5208 [0₂/90]₅. Πάλι ισχύει το ότι η αντοχή του σύνθετου υλικού είναι σημαντικά υψηλότερη με οποιοδήποτε από τα inclusions, σε σχέση με το αν δεν υπήρχαν αυτά. Την υψηλότερη αντοχή τη δίδει ο πυρήνας από τιτάνιο, και τη χαμηλότερη από αλουμίνιο.



Σχ. 5.2.4c Μειωτ. Συντελεστής Αντοχής συναρτήσει ακτίνας οπής για T300/5208 $[0_2/90]_S$

Παρατηρούμε ότι ο χάλυβας είναι περισσότερο δύσκαμπτος από το αλουμίνιο και το τιτάνιο, η αντοχή που προσδίδει σαν πυρήνας στο σύνθετο υλικό είναι μικρότερη από τα άλλα δύο ή βρίσκεται στο ενδιάμεσο αυτών. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω του ότι η



αναντιστοιχία δυσκαμψίας ανάμεσα στο σύνθετο υλικό και το αλουμινένιο inclusion, είναι μεγαλύτερη από τους άλλους συνδυασμούς υλικών. н κατανομή των τάσεων και οι περιοχές αστοχίας είναι διαφορετικές στις παραπάνω περιπτώσεις. Μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη επισκευής για κατασκευαστικούς και όχι εξωραϊστικούς λόγους, πρέπει το inclusion που θα χρησιμοποιηθεί να έχει παρόμοιες ελαστικές ιδιότητες με το σύνθετο υλικό, ώστε να μειωθούν συγκεντρώσεις τάσεων στο OI τελευταίο.



Η μέθοδος Ιεράρχησης laminates που παρουσιάστηκε, μπορεί να καθορίσει εκείνα τα σύνθετα υλικά που έχουν τη μεγαλύτερη αντοχή εάν είχαν οπή. Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της σοβαρότητας της ζημιάς. Θεμελιώδες σε αυτή τη μέθοδο είναι το χαρακτηριστικό μήκος. Αυτό καθορίζεται εμπειρικά ψάχνοντας τις καμπύλες SRF που ταιριάζουν καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ

Κάνουμε επίλυση με το χέρι για να επαληθεύσουμε αργότερα τα αποτελέσματα του προγράμματος. Θα εξετάσουμε σύνθετο υλικό Glass/Epoxy [0/45/90/-45]_s με ιδιότητες

- E₁=38,6 GPa
- E₂=8,27 GPa
- $v_{12}=0,214$
- $G_{12}=4,14$

με πάχος t=1mm η κάθε στρώση, για ομοιόμορφη εφελκυστική δύναμη, για επίπεδη εντατική κατάσταση

Q ₁₁ =39,16 GPa	S ₁₁ =25,91 TPa⁻¹
Q ₂₂ =8,392 GPa	S ₂₂ =120,9 TPa ⁻¹
Q ₁₂ =2,182 GPa	S ₁₂ =6,744 TPa ⁻¹
Q ₆₆ =4,14 GPa	S ₆₆ =241,5 TPa⁻¹

A) [0/45/90/-45]_s

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} (\bar{Q}_{ij})_k t_k$$

Ισχύει

$$\begin{cases} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \\ \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{26} \\ \end{cases} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & -2c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ c^3s & -cs^3 & cs^3 - c^3s & 2(cs^3 - c^3s) \\ cs^3 & -c^3s & c^3s - cs^3 & 2(c^3s - cs^3) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{pmatrix}$$

οπότε για θ=45°

$$\begin{cases} Q_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 & 1/2 & 1 \\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & 1 \\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & -1 \\ 1/4 & 1/4 & -1/2 & 0 \\ 1/4 & -1/4 & 0 & 0 \\ 1/4 & -1/4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 39,16 \\ 8,392 \\ 2,182 \\ 4,14 \end{pmatrix} = \begin{cases} 17,119 \\ 17,119 \\ 8,839 \\ 10,797 \\ 7,692 \\ 7,692 \\ 7,692 \end{pmatrix} [\frac{kN}{mm^2}]$$

Για θ=90°

$$\begin{cases} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 39, 16 \\ 8, 392 \\ 2, 182 \\ 4, 14 \end{pmatrix} = \begin{cases} 8, 392 \\ 39, 16 \\ 2, 182 \\ 4, 14 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} [\frac{kN}{mm^2}]$$

$$\begin{cases} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 & 1/2 & 1 \\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & 1 \\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & -1 \\ 1/4 & 1/4 & -1/2 & 0 \\ -1/4 & 1/4 & 0 & 0 \\ -1/4 & 1/4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} 39,16 \\ 8,392 \\ 2,182 \\ 4,14 \end{cases} = \begin{cases} 17,119 \\ 17,119 \\ 8,839 \\ 10,797 \\ -7,692 \\ -7,692 \\ -7,692 \end{cases} [\frac{kN}{mm^2}]$$

Άρα:

 $\begin{array}{l} A_{11} = 163,58 \ kN/mm \\ A_{22} = 163,58 \ kN/mm \\ A_{12} = 44,084 \ kN/mm \\ A_{66} = 59,748 \ kN/mm \\ A_{16} = 0 \ kN/mm \\ A_{26} = 0 \ kN/mm \end{array}$

Είναι

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{xy} \end{cases} = [A]^{-1} \begin{cases} N_{x} \\ N_{y} \\ N_{xy} \end{cases}$$

οπότε οι παραμορφώσεις είναι:

$$\begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 163,58 & 44,084 & 0 \\ 44,084 & 163,58 & 0 \\ 0 & 0 & 59,748 \end{bmatrix}^{-1} \begin{cases} 0,5 \\ 0 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,003296 \\ -0,000888 \\ 0 \end{cases}$$

Εύρεση τάσεων:

Για θ=0°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 39,16 & 2,182 & 0 \\ 2,182 & 8,392 & 0 \\ 0 & 0 & 4,14 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,003296 \\ -0,000888 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{cases} 0,1271 \\ -0,0003 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

Για θ=45°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 17,119 & 8,839 & 7,692 \\ 8,839 & 17,119 & 7,692 \\ 7,692 & 7,692 & 10,797 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,003296 \\ -0,000888 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,0485 \\ 0,0139 \\ 0,01852 \end{cases} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

Για θ=90°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 8,392 & 2,182 & 0 \\ 2,182 & 39,16 & 0 \\ 0 & 0 & 4,14 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,003296 \\ -0,000888 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{cases} 0,0257 \\ -0,0275 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

Για θ=-45°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 17,119 & 8,839 & -7,692 \\ 8,839 & 17,119 & -7,692 \\ -7,692 & -7,692 & 10,797 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,003296 \\ -0,000888 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,0485 \\ 0,0139 \\ -0,0185 \end{cases} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

B)[0/30/90/-30]_s

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} (\bar{Q}_{ij})_k t_k$$

Ισχύει

$$\begin{cases} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & -2c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ c^3s & -cs^3 & cs^3 - c^3s & 2(cs^3 - c^3s) \\ cs^3 & -c^3s & c^3s - cs^3 & 2(c^3s - cs^3) \end{bmatrix} \begin{cases} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} Q_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5625 & 0,0625 & 0,375 & 0,750 \\ 0,0625 & 0,5625 & 0,375 & 0,750 \\ 0,0625 & 0,5625 & 0,375 & 0,750 \\ 0,1875 & 0,1875 & 0,6249 & -0,750 \\ 0,1875 & 0,1875 & -0,375 & 0,250 \\ 0,3247 & -0,1083 & -0,2164 & -0,4328 \\ 0,1083 & -0,3247 & 0,2164 & 0,4328 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 39,16 \\ 8,392 \\ 2,182 \\ 4,14 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 26,456 \\ 11,189 \\ 7,175 \\ 9,133 \\ 9,542 \\ 3,780 \end{pmatrix} [\frac{kN}{mm^2}]$$

Για θ=90°

$$\begin{cases} Q_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 39, 16 \\ 8, 392 \\ 2, 182 \\ 4, 14 \end{pmatrix} = \begin{cases} 8, 392 \\ 39, 16 \\ 2, 182 \\ 4, 14 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} [\frac{kN}{mm^2}]$$

 $\Gamma_{I\alpha} \theta = -30^{\circ}$

$\left(\begin{array}{c} Q_1 \\ - \end{array} \right)$	L)	г 0,562	0,0625	0,375	0,750 ן		1	ر 26,456	
Q_2	2	0,0625	0,562	0,375	0,750	(39,16)		11,189	
$\int \overline{Q}_1$	2 L _	0,1875	0,1875	1	-0,750) 8,392 (_ J	7,175	kN
$)\bar{Q}_{6}$	s (=	0,1875	0,1875	-0,375	0,25) 2,182 (=)	9,133	mm^2
\overline{O}_{1}		-0,3247	0,1083	0,2164	0,4328	(4,14)		-9,542	
	°	L-0,1083	0,3247	-0,2164	0,4328			-3,780J	
\mathbf{Q}_2	5'								

Άρα:

 $\begin{array}{l} A_{11} = 200,93 \text{ kN/mm} \\ A_{22} = 139,86 \text{ kN/mm} \\ A_{12} = 37,428 \text{ kN/mm} \\ A_{66} = 53,092 \text{ kN/mm} \\ A_{16} = 0 \\ A_{26} = 0 \end{array}$

Είναι

$$\begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} = [A]^{-1} \begin{cases} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{cases}$$

οπότε οι παραμορφώσεις είναι:

1	(ε_x))	[200,93	37,428	0	-1	(0,5)		(0,00262))
	ε_y	=	37,428	139,86	0		0	· = ·	-0,0007	ł
	(γ_{xy})		L O	0	53,092		$\left(0 \right)$			1

Εύρεση τάσεων:

Για θ=0°

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 39,16 & 2,182 & 0 \\ 2,182 & 8,392 & 0 \\ 0 & 0 & 4,14 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0,00262 \\ -0,0007 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{cases} 0,1010 \\ -0,0002 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

Για θ=30°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 26,456 & 7,175 & 9,542 \\ 7,175 & 11,189 & 3,780 \\ 9,542 & 3,780 & 9,133 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,00262 \\ -0,0007 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,0642 \\ 0,0110 \\ 0,0223 \end{cases} [\frac{kN}{mm^2}]$$

Για θ=90°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 8,392 & 2,182 & 0 \\ 2,182 & 39,16 & 0 \\ 0 & 0 & 4,14 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,00262 \\ -0,0007 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,0204 \\ -0,0217 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

Για θ=-30°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 26,456 & 7,175 & -9,542 \\ 7,175 & 11,189 & -3,780 \\ -9,542 & -3,780 & 9,133 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,00262 \\ -0,0007 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,0643 \\ 0,0110 \\ -0,0223 \end{cases} [\frac{kN}{mm^2}]$$
Г)[0/60/90/-60]_S

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} (\bar{Q}_{ij})_k t_k$$

Ισχύει

$$\begin{cases} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & -2c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ c^3s & -cs^3 & cs^3 - c^3s & 2(cs^3 - c^3s) \\ cs^3 & -c^3s & c^3s - cs^3 & 2(c^3s - cs^3) \end{bmatrix} \begin{cases} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{cases}$$

οπότε για θ=60°

$$\begin{pmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0625 & 0,5625 & 0,375 & 0,750 \\ 0,5625 & 0,0625 & 0,375 & 0,750 \\ 0,5625 & 0,0625 & 0,375 & 0,750 \\ 0,1875 & 0,1875 & 0,6249 & -0,750 \\ 0,1875 & 0,1875 & -0,375 & 0,250 \\ 0,1083 & -0,3247 & 0,2164 & 0,4328 \\ 0,3247 & -0,1083 & -0,2164 & -0,4328 \end{bmatrix} \begin{cases} 39,16 \\ 8,392 \\ 2,182 \\ 4,14 \end{pmatrix} = \begin{cases} 11,091 \\ 26,475 \\ 7,175 \\ 9,133 \\ 3,780 \\ 9,542 \end{cases} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_{I\alpha} \theta = 90^{\circ} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 39, 16 \\ 8, 392 \\ 2, 182 \\ 4, 14 \end{bmatrix} = \begin{cases} 8.392 \\ 39, 16 \\ 2.182 \\ 4, 14 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\frac{kN}{mm^2}]$$

 $\Gamma_{I\alpha} \theta = -60^{\circ}$

ĺ	(Q_{11})		г 0,0625	0,5625	0,375	0,750	1	(11,091)	
I	Q_{22}		0,5625	0,0625	0,375	0,750	(39,16)	26,475	
J	\bar{Q}_{12}	_	0,1875	0,1875	0,625	-0,750) 8,392 (7,175	kN
)	\overline{Q}_{66}	/ =	0,1875	0,1875	-0,375	0,250) 2,182 (= ·	9,133	mm^2
I	\overline{O}_{1c}		-0,1083	0,3247	-0,2164	-0,4328	(4,14)	-3,780	
	\overline{O}		L-0,3247	0,1083	0,2164	0,4328	J	(<u>-9.542</u>)	
`	Q26								

Άρα:

 $\begin{array}{l} A_{11}=2^{*}(39,16+11,091+8,392+11,091)=139,468 \ \text{kN/mm} \\ A_{22}=2^{*}(8,392+26,475+39,16+26,475)=201,004 \ \text{kN/mm} \\ A_{12}=2^{*}(2,182+7,175+2,182+7,175)=37,428 \ \text{kN/mm} \\ A_{66}=2^{*}(4,14+9,133+4,14+9,133)=53,092 \ \text{kN/mm} \\ A_{16}=2^{*}(0+3,780+0-3,780)=0 \\ A_{26}=2^{*}(0+9,542+0-9,542)=0 \end{array}$

Είναι

$$\begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} = [A]^{-1} \begin{cases} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{cases}$$

οπότε οι παραμορφώσεις είναι:

1	(ε_x))	[139,468	37,428	0]	-1	(0,5))	(0,00377)
-	ε_y	} =	37,428	201,004	0		0	} = ·	-0,0007	ł
	(γ_{xy}))	L O	0	53,092		$\left(0 \right)$		0.)

Εύρεση τάσεων:

Για θ=0°

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 39,16 & 2,182 & 0 \\ 2,182 & 8,392 & 0 \\ 0 & 0 & 4,14 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0,00377 \\ -0,0007 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{cases} 0,1461 \\ 0,0023 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

Για θ=60°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 11,091 & 7,175 & 3,780 \\ 7,175 & 26,475 & 9,542 \\ 3,780 & 9,542 & 9,133 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,00377 \\ -0,0007 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,0368 \\ 0,0085 \\ 0,0075 \end{cases} [\frac{kN}{mm^2}]$$

Για θ=90°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 8,392 & 2,182 & 0 \\ 2,182 & 39,16 & 0 \\ 0 & 0 & 4,14 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0,00377 \\ -0,0007 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{cases} 0,0301 \\ -0,0019 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

Για θ=-60°

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 11,091 & 7,175 & -3,780 \\ 7,175 & 26,475 & -9,542 \\ -3,780 & -9,542 & 9,133 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,00377 \\ -0,0007 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,0368 \\ 0,0085 \\ -0,0075 \end{cases} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} (\bar{Q}_{ij})_k t_k$$

 $\begin{array}{l} A_{11} = 2^{*}(39, 16^{*}4) = 313, 28 \text{ kN/mm} \\ A_{22} = 2^{*}(8, 392^{*}4) = 67, 136 \text{ kN/mm} \\ A_{12} = 2^{*}(2, 182^{*}4) = 17, 456 \text{ kN/mm} \\ A_{66} = 2^{*}(4, 14^{*}4) = 33, 12 \text{ kN/mm} \\ A_{16} = 0 \\ A_{26} = 0 \end{array}$

Είναι

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{xy} \end{cases} = [A]^{-1} \begin{cases} N_{x} \\ N_{y} \\ N_{xy} \end{cases}$$

οπότε οι παραμορφώσεις είναι:

$$\begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 313,28 & 17,456 & 0 \\ 17,456 & 67,136 & 0 \\ 0 & 0 & 33,12 \end{bmatrix}^{-1} \begin{cases} 0,5 \\ 0 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,00162 \\ -0,0004 \\ 0 \end{cases}$$

Εύρεση τάσεων:

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 39,16 & 2,182 & 0 \\ 2,182 & 8,392 & 0 \\ 0 & 0 & 4,14 \end{bmatrix} \begin{cases} 0,00162 \\ -0,0004 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{cases} 0,0626 \\ 0,00018 \\ 0 \end{bmatrix} [\frac{kN}{mm^2}]$$

E)
$$[0_2/90_2]_{S}$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} (\bar{Q}_{ij})_k t_k$$

Ισχύει

$$\begin{cases} Q_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & 4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -4c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & -2c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ c^3s & -cs^3 & cs^3 - c^3s & 2(cs^3 - c^3s) \\ cs^3 & -c^3s & c^3s - cs^3 & 2(c^3s - cs^3) \end{bmatrix} \begin{cases} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{26} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} 39,16 \\ 8,392 \\ 2,182 \\ 4,14 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{cases} 8.392 \\ 39.16 \\ 2.182 \\ 4.14 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kN \\ mm^2 \end{bmatrix}$$

Άρα:

 $\begin{array}{l} A_{11}=2^{*}(39,16^{*}2+8,392^{*}2)=190,208 \text{ kN/mm} \\ A_{22}=2^{*}(8,392^{*}2+39,16^{*}2)=190,208 \text{ kN/mm} \\ A_{12}=2^{*}(2,182^{*}2+2,182^{*}2)=17,456 \text{ kN/mm} \\ A_{66}=2^{*}(4,14^{*}2+4,14^{*}2)=33,12 \text{ kN/mm} \\ A_{16}=0 \\ A_{26}=0 \end{array}$

Είναι

$$\begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} = [A]^{-1} \begin{cases} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{cases}$$

οπότε οι παραμορφώσεις είναι:

$$\begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} 190,208 & 17,456 & 0 \\ 17,456 & 190,208 & 0 \\ 0 & 0 & 33,12 \end{bmatrix}^{-1} \begin{cases} 0,5 \\ 0 \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} 0,00265 \\ -0,00024 \\ 0 \end{cases}$$

Εύρεση τάσεων:

Για θ=0°

$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases}$	=	39,16 2,182 0	2,182 8,392 0	$\begin{bmatrix} 0\\0\\4,14 \end{bmatrix}$	$ \begin{pmatrix} 0,00265 \\ -0,00024 \\ 0 \end{pmatrix} $	(0,1032) 0,0037 0	$\left[\frac{kN}{mm^2}\right]$
(10) /			Ũ	-)	· · · · ·	· · · ·	

Για θ=90°

$\left\{ \begin{matrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{matrix} \right\} =$	= ^{[8,392} 2,182	2,182 39,16	$\begin{bmatrix} 0\\0 \end{bmatrix}$	{ 0,00265 {-0,00024	=	{ 0,0217 }-0,0036	$\left[\frac{kN}{mm^2}\right]$
$\left(\tau_{xy} \right)$	0	0	4,14)		¹ mm ²

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOFISTIK

7.1 ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Όσον αφορά τη γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων, τετράγωνα και ισόπλευρα τρίγωνα είναι το καλύτερα σχήματα. Ωστόσο όπως είναι γνωστό υπό προϋποθέσεις παρεκκλίσεις από αυτά τα σχήματα είναι επιτρεπτές. Δυο τρίγωνα δεν ισοδυναμούν με ένα τετράπλευρο, εφόσον το τετράπλευρο διαθέτει τουλάχιστον έξι εσωτερικές εντατικές καταστάσεις ενώ το τρίγωνο μόνο μία. Συνεπώς τετράεδρη διακριτοποίηση είναι προτιμότερη συγκριτικά με συνδυασμούς τρίπλευρης διακριτοποίησης. Οποιοδήποτε τριγωνικό στοιχείο μπορεί να μετατραπεί σε συνδυασμό από τετραεδρικά:



Σχ.7.1a Μετατροπή τριγωνικού πεπερασμένου στοιχείου σε τετραερδικά

Με αυτή τη μέθοδο εύκολα μπορεί να επιμεριστεί και μία κυκλική πλάκα σε τετραεδρικά στοιχεία:



Σχ. 7.1b Μετατροπή 1/4 του δίσκου σε τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία

Επιμερισμός του 1/4 του δίσκου

Τα αποτελέσματα για αυτό το στοιχείο αποκτώνται από τα ακόλουθα σημεία:

- Στο κέντρο του στοιχείου
- Στα επονομαζόμενα σημεία Gauss μέσα στο στοιχείο
- Στους κόμβους που προκύπτουν κατ επέκταση των γνωστών συντεταγμένων κόμβων

Για τη διαστασιολόγηση των στοιχείων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι τιμές στο κέντρο του στοιχείου. Κατόπιν η τιμή αυτή πρέπει να εφαρμόζεται σε ολόκληρη την περιοχή του εν λόγω στοιχείου. Σε περιπτώσεις στηρίξεων μεγάλων σε διαστάσεις, είναι για παράδειγμα λογικό να τοποθετηθεί υπολογιστικά το κέντρο του στοιχείου στην άκρη της στήριξης. Τα σημεία Gauss χρειάζονται μόνο για τον ακριβή προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης και συνήθως δεν χρειάζονται να είναι γνωστά από τον χρήστη.

7.2 ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ SOFISTIK

<u>AQUA</u>

Με την εντολή MATE του υποπρογράμματος AQUA ορίζονται οι ακόλουθες ιδιότητες του σύνθετου υλικού

- Παράμετρος **NO**: δίνεται αριθμός που αντιστοιχεί στο υλικό
- Παράμετρος OAL: η κατεύθυνση των ινών
- Παράμετρος **Ε90/Ε**: τα μέτρα ελαστικότητας
- Παράμετρος **MUE**: ο λόγος Poisson
- Παράμετρος G: το μέτρο διάτμησης

SOFIMSHA

Με την εντολή **SYST TYPE PESS** ορίζεται ότι το σύστημα αφορά plain stress δηλαδή επίπεδη εντατική κατάσταση. Για να εντοπιστούν τα πεπερασμένα στοιχεία και να εξετάστούν οι τάσεις και παραμορφώσεις τους χρησιμοποιείται η παράμετρος Group Divisor (**GDIV**). Με την εντολή **NODE** και τις παραμέτρους NO,X,Y,Z, ορίζονται κόμβοι δίνοντας αύξοντα αριθμό και συντεταγμένες. Με την παράμετρο FIX υπάρχει η δυνατότητα να ορίσουμε τους βαθμούς ελευθερίας των αντίστοιχων κόμβων.

Η εντολή **QUAD** ορίζει τα πεπερασμένα τετραεδρικά στοιχεία. Η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία έχει γίνει και με το πρόγραμμα NASTRAN και με το πρόγραμμα SOFISTIK. Επιλέξαμε το NASTRAN ως καταλληλότερη και εισάγαμε τα δεδομένα των κόμβων στο SOFIMSHA. Επειδή καλούμασταν να εξετάσουμε δύο περιπτώσεις: με και χωρίς inclusion, διευκόλυνε η εγγραφή των τετράδων κόμβων που συνιστούν τα QUADs σε ξεχωριστό αρχείο ".dat" και να τα ανακαλέσουμε στο πρόγραμμα μέσω της εντολής **#include**.

SOFILOAD

Με την εντολή LC ορίζεται η φόρτιση. Με την παράμετρο LINE TYPE PXX ορίζεται το γραμμικό φορτίο. Για να ορίσουμε 1000N/mm² ομοιόμορφο φορτίο χρησιμοποιούμε τις παραμέτρους P1, X1, Y1, για το πρώτο σημείο και τις P2, X2, Y2 για το τελευταίο.

<u>ASE</u>

Στο υποπρόγραμμα αυτό καλείται να γίνει επίλυση από το SOFISTIK της παραπάνω φόρτισης, μέσω της εντολής **LC**



7.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Σχ.7.3a: Γενική άποψη μοντέλου 150mm x 40mm με οπή





Στο πρόγραμμα λόγω συμμετρίας αναλύσαμε το 1/4 του φορέα, εξασφαλίζοντας, όπως φαίνεται στα σχήματα κύλιση κατά x στους κόμβους τις πάνω πλευράς και κατά y στην μία κάθετη. Το εφαρμοζόμενο φορτίο μακριά από την οπή είναι 1kN/mm.

Στις επόμενες σελίδες, στα σχήματα 7.3.1.1-28 για λόγους συντομίας φαίνονται οι τάσεις σ_x, σ_y, τ_{xy} και von Mises που αναπτύσσονται στις στρώσεις του [0/45/90/-45]_s.

7.3.1 ΤΑΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ [0/45/90/-45]_s



Σχ.7.3.1.1 Στρώση 0°, τάση σ_x με κυκλική οπή

8,3 8,3 8,0 129 130 130 131 131 9,3 9,6 123 125 126 128 128 129 129 119 121 123 124 126 126 127 128 118 120 121 123 124 125 126 127 119 121 122 123 124 125 125 12' 117 118 118 119 120 121 122 123 124 125 119 119 118 118 119 119 120 120 121 122 123 123 124 125 125 121 121 120 120 120 119 119 120 120 121 121 122 122 123 124 124 125 125 Σχ.7.3.1.2 Στρώση 0°, τάση σ_x με inclusion

Παρατηρούμε ότι για τη στρώση 0° αυξάνονται οι τάσεις, και σε αρκετά πεπερασμένα υπερδιπλασιάζονται. Αυτό ωστόσο είναι ωφέλιμο, αφού αυτή η διεύθυνση ινών είναι η ισχυρότερη για την παραλαβή των εφελκυστικών τάσεων.



Σχ.7.3.1.3 Στρώση 0°, τάση σ_y με κυκλική οπή



Σχ.7.3.1.4 Στρώση 0, τάση σ_y, με inclusion

Για την ίδια στρώση των 0° οι τάσεις σ_y, χωρίς και με inclusion, παραμένουν μηδενικές, πράμα επιθυμητό δεδομένου ότι για τις σ_y η κάθετη διεύθυνση είναι εξαιρετικά ασθενής σε αντοχή. Ομοίως οι διατμητικές εμφανίζονται μηδενικές.

 $\dot{\Sigma}$ 2.7.3.1.6 Στρώση 0°, τάση von Mises, με inclusion



Σχ.7.3.1.5 Στρώση 0° , τάση von Mises



Σχ.7.3.1.8 Στρώση 45°, τάση σ_x , με inclusion

ī							eş.	61 4	₽₽	546 4	5 <u>5</u>	54	53	52 +	52 +	51 +	51 +	-51 -+	50 +	50 +	50 +
	R					¥/	€ 2	55 +	54 +	5 <u>3</u>	52 +	5 <u>2</u>	51	51	51	50	540	s₽	50	50	49
	K					55	545 4,9	50	50 +	50	ър	50 +	50	50	50	50 +	50	49	49 +	49 4	49 +
	R					14		45	47	47	48	4 <u>8</u>	49 +	49 +	49 +	49 +	49 +	49 +	49 +	49 +	49 +
	\geq		83 4		3336	4₽	49°4 41	3 4 4	45 +	45	45	47	47	4₽	48	4₿	4₽	48	48	4 <u>8</u>	48
	\geq	2 <u>2</u>	20 4		+ +	39	' 4 2	43 +	44	45 +	45 ‡	46	47	47	47	4.8 +	48	4.8 +	4.8 +	48 +	48
	\geq	33 +	33	35	38 +	40 +	4 <u>2</u>	43 +	44 +	44	45	45	45	45	47	47	47	47	4 <u>8</u>	48	4 <u>8</u>
	\geq	3ª	39 4	40 +	41 +	42 +	4,3 +	4 <u>3</u>	44 +	44	45	45	45	45	45	47 4	47	47	47 47	47	4 <u>a</u>
	\geq	4 <u>1</u>	42 4 2	43 +	43	44 +	44	44	44 +	45 +	45	\$	45	45	45	47	47	47	47 4	47	47
	\geq	43 +	44 +	44 +	44	45	45	45	45 4	45 +	45 +	46	45	45	45	45	\$2	47	47	47	47
	\geq	44	45	45	45	46	45	46	45	45	45	46	46	45	46	46	\$7	\$7	47	47	47
	\geq	45	45	45	45	46	45	45	45	45	45	46	45	45	45	46	45	\$7	\$7	47	47
	\geq	45	45	46	45	\$7	\$2	\$7	45	45	45	45	45	45	45	45	45	47	47	47	47
	\triangleright	4,6	46	47	47	47	47	47	47	47	47	47	4.6	46	46	46	46	47	47	\$2	47

ΙΚ Σχ.7.3.1.7 Στρώση 45°, τάση σ_x με κυκλική οπή

							4	13 +	20	2 <u>5</u>	24 ⁸	32 4	34	346	38	39	40	4 <u>1</u>	42 ‡	43 +
					- 7	$^{-4}_{+}$	240 24	27 4	30	33 +	35	37	3 <u>8</u>	3 <u>9</u>	40	4 <u>1</u> +	42 +	4 <u>3</u>	44	44
					2	15 49	3 <u>8</u>	40 4	4 <u>1</u> +	4 <u>1</u> +	42 +	42 +	42 +	43 +	43	44	44	45 +	45	45 +
					45 5	7 55	53 +	52 +	50 4	42	43	47	47	48	46	46	48	46	47	47
		_	10	71 4 98 86	74	아 ^누 다	61 4	5,9 +	56	5 <u>4</u>	52 +	5 <u>1</u>	50	42	42	4 <u>a</u>	42	48	4 <u>8</u>	48
$\left\ \right $	141	144	2qa	+ +	746	÷ ₽	65 +	62 4	60 +	548	56	54	5,3 +	52 +	51	50	50	50	49	49
$\left\ \right>$	191	98	°₽	80	73	68 4	65 +	63 +	€‡	59	57	5,6	55	53	53	52	51	51	50	50
$\left \right $	82	78	74	70	6 7	65 +	64 +	62 +	€1 ∓	59	5ga	57	5,6	sş	54	53	52	52 +	5 <u>1</u>	5 <u>1</u>
$\left\ \right>$	72	69	65 +	et3	62 +	针	61 +	εo	ęo	şş	5ª	57	5,6 +	55	54 +	54 +	53	53 +	52 +	52 +
$\left\ \right>$	66 +	εş	60 +	59	58	58	5 <u>8</u>	58 4	58	58 +	57	57	5,6	55	55	54	54	53	5,3	5,3
$\left\ \right>$	62 +	εo	57 +	56	55	55	5.6 +	5,6	546	5_6	5,6	546	5,6	55	55	55	54	54	53	53
$\left\ \right\rangle$	εo	57	55	54	54	54	54	54	55	55	55 +	55 +	55	55	55 +	55	54 +	54 +	54	54
$\left\ \right>$	\$ 7	5 ₄ 5	54	5_3	52	52	52	5,3	53	54	54	55	s ₄ s	s_s	55	s_s	s _s s	54	54	54
\gg	5,6	5,4	5.3	52	51	51	51	52	52	5,3	5.4	5,4	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,4	5,4



14e ¥ 1,0 ¥ ¥ ¥ ¥ Ŧ ¥ 12 12 ¥ ¥ 12 ¥ 1,3 1,3 12 1,3 1,3 1,4 1,4 1.5 1,4 1,4 1,4 1,4 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3 1,3

Σχ.7.3.1.9 Στρώση 45°, τάση σ_y με κυκλική οπή

Σχ.7.3.1.10 Στρώση 45°, τάση σ_y, με inclusion

Σχ.7.3.1.12 Στρώση 45°, τάση τ_{xy,} με inclusion



Σχ.7.3.1.11 Στρώση 45°, τάση τ_{xy} με κυκλική οπή





Σχ.7.3.1.13 Στρώση 45°, τάση von Mises με κυκλική οπή



Σχ.7.3.1.14 Στρώση 45°, τάση von Mises, με inclusion

Παρατηρούμε μία ελαφρά μείωση στις τιμές των τάσεων von Mises.

						4	4	5	7	1 <u>2</u>	14 +	16 +	47	1 <u>8</u>	149 14	20	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	2 <u>2</u>
					7	4	ŧ	4	¥	13 4	15 +	146 44	18 +	19 +	20 +	20 +	21 +	22 +	22 +
					4	\$ 1,4	12 +	13 +	14 4	16 +	17	18 4	19	20 4	20	2 <u>1</u> +	22 4	2 2	2 2
					13 ⁺ 24	×24	12	华	19	1 2 9	19 +	20 +	20 +	21 +	2 <u>1</u> +	22 +	22 +	22 +	2,3 +
				49 44 36	28	27°24	⁶ 25	24	243	2 <u>2</u>	2 <u>2</u>	2 <u>2</u>	2 <u>2</u>	2 2	2 <u>2</u>	243	2 <u>3</u>	243	2 ₄ 3
\mathbb{P}		ęp	¥	4₽∓	34	* 3 <u>1</u>	249	27	26	2,5	24	24 +	24	23	23	24	24	24 +	24 +
	50	4,8 +	44 +	40 4	37	34 +	3 <u>2</u>	зo	29	27 -	2.6 +	2,6	25 4	2 <u>5</u>	25 4	24	24	24	24
\mathbb{P}	41	4 <u>1</u> +	40 +	38	37	35	33 +	32 +	30 +	29	2 <u>8</u>	27	2,6 +	2,6 +	26	25 +	25 +	25	2,5 +
\mathbb{R}	37	37 +	37 +	3 <u>-</u> 6	3 <u>6</u>	3 <u>5</u>	3 <u>4</u>	32 +	3 <u>1</u>	30 +	29 +	2,8	27	27	2 ₄ 6	2,6 +	2 ₄ 6	2_6	246
\mathbb{R}	34	34 +	3 <u>4</u>	3 <u>4</u>	3 <u>4</u> +	34	33 +	32 +	3 <u>1</u>	30	30 4	29	28	28	27	27	2 ₆	26	2,6 +
\mathbb{R}	32 +	3,3 +	3 <u>3</u>	343	3 <u>3</u>	3 <u>4</u> 3	33 +	32 +	31 +	31 +	30 +	29	29	28	2 <u>8</u>	27	27	27	27
\mathbb{R}	3부	3 <u>1</u> +	3 <u>2</u>	3 <u>2</u>	3 <u>2</u>	3 <u>2</u>	3 <u>2</u>	3 <u>2</u>	3 <u>1</u>	3 <u>1</u> +	30 4	30	29	29	28	28	27	27	27
\mathbb{P}	\$ 2	ao ‡	31 +	31 +	31 +	31 +	31 +	31 +	31 +	30	30 +	30	29	29	29	28	28	28	27
>	3,0	зp	sp	зp	зp	31	31	3,1	зp	зp	3,0	зp	2,9	2,9	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8

 $\Sigma \chi$.7.3.1.15 Στρώση 90°, τάση σ_xμε κυκλική οπή



Σχ.7.3.1.16 Στρώση 90°, τάση σ_x, με inclusion

Οι δε τάσεις τ_{xy} είναι παραμένουν μηδενικές και με inclusion.



							-41	-21	-15	-13	- <u>1</u> 2	-13	-13	-14	-15	-15	-16	-16	- 1 7
					- 7	-71	-41 +	-47	-40	-17	-16	-15	-15	-46	- 1 e	-46	-17	-17	-17
					-36	38 -51	-44	-35	-48	-24	-41	-40	-49	-18	-18	-18	-18	-18	-18
					1-4	°=		-44	-38	-32	-28	-25	-23	-22	-21	-40	-20	-40	-19
				-34		55 ⁻⁵	P-\$7	7-52		-4º	-35	-31	-48	-46	-24	-23	-22	-41	-21
\mathbb{R}	-45	-48	-44	+	-49	- <u></u> =2	- 4 0	-\$7			-40	-36	- <u>3</u> 2	-30	-27	-26	-24	-23	-23
	-e	-13	-42	-38		- 4 0	- <u></u> f1	-58	-54		-44	-40	-36	-33	-30	-48	-46	-25	-24
	2		-18	-34		-55	-58	-57	-55			-42	-39	-35	-33	-30	-28	-47	-26
	4		-16	-49	-41	-49	-53	-54				-44	-40	-37	-34	-32	-30	-28	-27
	- 2	77	-15	-46	-36	-43						-44	-41	-38	-35	-33	-31	-30	-28
	-e +	-2	-16	-24	-32	-39	-44				-45	-43	-41	-38	-36	-34	-32	-30	-29
	-10	-12	-47	-24	-30	-36	-40	-43	-44	-44	-43	-42	-40	-38	-36	-34	-32	-31	-30
	-13	-15	-19	-24	-29	-33	-37	-40	-41	-41	-41	-40	-39	-37	-36	-34	-33	-31	-30
	-17	-18	-21	-24	-28	-32	-35	-37	-38	-39	-39	-38	-37	-36	-35	-34	-32	-31	-30
Σχ.7.3	3.1.1	7 Στ	ρώσ	η 90)°, то́	ίση α	σ _ν με	KUK	λική	οπή									

						-56 -	42 +						27	248	30	3 <u>1</u>	3 <u>2</u>	343	34
					7	72	4.6 +	3 <u>4</u> +	2,9 +	27	27 4	28	2,9 +	30 +	31 +	32 +	33 +	33 +	34 +
					39	42 62	54 +	47 4	40 +	37 +	35	34 +	343	33	3 <u>4</u> +	34	34	35	35 4
					P sp	4	65 1	5 <u>9</u>	52 +	47 47	43 +	40 +	39 +	38 +	37	37 +	37 +	37 +	37 +
		_	-	44 ¥	B	2 ⁺⁷ +	75	69 4	et3	5 <u>-</u> 6	51	47 +7	44 +	4 <u>2</u> +	4 <u>1</u>	40 +	3-9	3,9 +	38
\mathbb{R}	22	8 <u>2</u>	Ş¢	थ +	74	°‡	٩p	746	70	6 <u>4</u>	58	53 +	50	47 +	45 +	43 +	42 +	41 +	40 +
\mathbb{R}	54 +	5 ₄ 6	59 4	۴ 7	746	8 <u>2</u>	8 <u>2</u>	7 9	74	68 +	63 +	58	54	51	48 4	4,6 +	4 <u>4</u> +	43 +	4 <u>2</u>
\mathbb{R}	40 +	44 +	52 +	εş	73	7 9	80 +	78 +	75 +	70	ę¢	61 +	57	54 +	51	49 +	47 +	45 +	44 +
R	36 +	40 +	47 +	57	ŧ	743	74 ⁶	76 +	74	7 <u>1</u> +	ę7	€3	5 <u>9</u>	5 <u>-</u> 6	5 <u>3</u>	5 <u>1</u>	49 +	47 +	4,6 +
K	3 <u>5</u>	38 +	45 +	5 <u>3</u>	6 <u>1</u> +	\$7 	71	72 +	7 <u>2</u>	ęş	ę	63 +	ê0	57 4	55 +	52 +	50 +	49 +	47 +
K	36 +	38 +	43 +	50	57	εş	66 +	68 +	69 +	67 +	65 +	ş	ę	58	55	5 <u>3</u>	54	50	48 4
K	347 1	3,9 +	43 4	49 4	54	5g	63 +	65 +	÷	е <u>5</u>	64 +	62 +	ęο	58 +	5,6	54 +	5 <u>2</u>	5 <u>1</u>	49 4
\mathbb{R}	39 +	40 +	44 +	48 +	52 +	56 +	59 +	62 +	63 +	63 +	62 +	61 +	59 +	57 +	56 +	54 +	52 +	51 +	50 +
\mathbb{R}	4 <u>1</u>	4 <u>2</u>	44 +	48 +	51	5 <u>4</u>	57	5,9	εo	εo	εo	5,9	58	57	55	54	543	5 <u>2</u>	51

Σχ.7.3.1.19 Στρώση 90°, τάση von Mises με κυκλική οπή

	暭	Ψ	P 1	₽¥.	막	45 +	54	\$7	56	55 4	54	5,3 +	53 +	52 4	51	5 <u>1</u>	5 <u>1</u>	50 +	50 4	5₽ ₽
R	말	80	90 81	¥.,	11 1	4 <u>9</u>	53 4	5 <u>4</u>	54 +	5 <u>4</u>	53 4	53 +	52 +	52 +	51 +	51 +	50 +	50 +	50 +	49 4
K	Ψ	₽₽	्य	80	55 +	₩ 4,8	50	5 <u>1</u>	51 +	5 <u>2</u>	51 4	51 +	51 +	5 <u>1</u> +	50 +	50 +	50 +	50 +	49 +	49 4
K	вp	Ψ	박 막		54 41	45	45 4	47 +	4 <u>8</u>	49 +	49 +	49 +	50 +	50	49 +	49 4	49 4	49 +	49 +	49 +
K	81 4	81 4	4.6	°‡ ⊈3 42	43	² τ ² 4 μ ² τ ⁴	42 42	43 +	45 +	4 <u>6</u>	47 4	47 47	48 +	4,8 +	48 +	49 +	49 +	49 +	49 +	48 +
K	25	33	Ŧ	-+	40	39	329	4 <u>1</u>	42 +	43 +	45 +	46 +	4 ₄ 6	47	47	48	48 4	4 <u>8</u>	4 <u>8</u>	4 <u>8</u>
K	40	3 <u>9</u>	3-9 +	3,9 +	3 <u>8</u>	37	38 +	39 +	40 +	42 4 2	43	44 +	45 +	46 +	46 +	47	47	47 +	47	48 +
R	45 +	44 +	42 4	40 +	3 <u>8</u>	37 +	38 +	39 +	40 +	4 <u>1</u> +	4 <u>2</u>	43 +	44 +	45 +	45 +	46 +	46 +	47 +	47 4	47 +
K	47 +	46 +	44 +	41 +	40	39 +	3 <u>8</u>	39 4	39 4	40 +	4 <u>1</u>	42 4 2	43 +	44 +	45 +	45 +	4,6 +	4 ₄ 6 +	4 ₄ 6 +	47 4
K	48 +	47	45 +	43 +	41	40 +	39 +	39 +	40 +	40 +	41 +	42 +	43 +	4 <u>4</u> +	4 <u>4</u> +	45 +	45 +	4 ₄ 6 +	46 +	46 +
K	47 47	47	45 4	44 +	4 <u>2</u>	4 <u>1</u>	4₽	40	40 +	4 <u>1</u> +	41 4	42 +	43 +	43 +	44 +	44 +	45 +	45 +	46 +	46 +
\mathbb{R}	47	47	4 ₄ 6	44 +	43 4 3	4 <u>2</u>	41	4 <u>1</u>	41	41	42 +	42 +	43 +	43 +	44 +	44 +	45 +	45 +	45 +	46 +
\mathbb{R}	47 4	4 ₄ 6	4 ₄ 6 +	4,5 +	44 +	43 +	42 +	42 +	42 +	42 +	42 +	42 +	4,3 +	4 <u>3</u>	44 +	44 +	44 +	45 +	45 +	45 +
\mathbb{R}	4,6 +	4 ₄ 6	4 ₄ 6 +	45 +	44 +	4 <u>3</u>	43 +	42 +	42 4 2	42 4 2	42 4 2	43 +	43 +	43 +	44 +	44 +	44 +	45 +	45 +	45 +

 Σ_{χ} .7.3.1.20 Στρώση 90°, τάση von Mises, με inclusion

Σχ.7.3.1.22 Στρώση -45°, τάση σ_x , με inclusion



Σχ.7.3.1.21 Στρώση -45°, τάση σ_x με κυκλική οπή

							Ŧ	3	11	18 +	2 <u>4</u> 3	27	3 <u>1</u>	33	36	37	39	4 <u>0</u>	41	42 Ŧ
					- 7	-6 +	7	ę	후	1 <u>5</u>	20 +	2,5 +	2,9 +	32 +	34 +	3,6 +	38	3,9 +	40	4 <u>1</u> +
					9	4	7	4	3	15 +	2 <u>0</u>	24	2 <u>4</u> 8	31	343	35	37	3 ₄ 8	42	41
					۽ بو	-+ 	s 4	12 4	1 <u>5</u>	18	2 <u>2</u>	25 +	2 <u>8</u>	31	3 <u>4</u> 3	35	37	3 <u>8</u>	89 4	40
11~			4	22 24 50	32	27 24 4	5 24 +	23	23 +	24 +	2,6 +	28 +	30 +	32 4	34 +	36 +	37	38 +	39	40
	-29	87 +	74	학	47	38	3 ₆	3 ₄ 3	31	30 +	31	32 +	3 <u>3</u>	34	346	37	3 <u>a</u>	3 <u>9</u>	40	41
	왁	₽0	8 <u>1</u> +	70	÷0	5 <u>1</u>	4 ₆	42	3 <u>9</u>	37	36	3,6	36 +	37	38	38	39	40	41	41
	84 +	84	⁸ ‡	75	ев Г	€ <u>1</u>	54 +	49 4	45 +	43 4	41	42	40	39 +	40 4	40	41	4 <u>1</u> +	42	42 +
	75	77	77	75	70	65 +	5-9 +	55 +	5 <u>1</u>	4.8 +	4.5 +	44	4,3 +	42	\$2	42	42	42	43 4	4 <u>3</u>
	> ¥	72	73	7 2	70 4	еŧе	€²	58 +	54	5 <u>1</u>	42	47	4,6	45	44 +	44	44 +	4.4 +	44 +	44 +
	≥ ₆₅	68 4	ę	မ္	€ ⁸	еŧе	63 Ŧ	60 +	\$7	54 +	52 +	50 +	4.8 +	47	4.6 +	4.6 +	45 +	4.5 +	45 +	45 +
	≥ ₽	64 +	66 +	67 +	ее +	65 +	63 +	€‡	58	546	54	5 <u>2</u>	50	49	48 4	47	47	4,6 +	4,6 +	4,6 +
	> ep	62 4	63 +	6 <u>4</u>	64 +	6 <u>4</u>	62 4	61 +	59	57	55	53	52	51	50 4	49	48	4,8 +	47 +	47
	> 58	5,9	61	62	62	62	62	60	5,9	5,7	5,6	5,4	5,3	5,2	5,1	5,0	5,0	4,9	4,9	4,8



Σχ.7.3.1.23 Στρώση -45°, τάση σ_y με κυκλική οπή

					1	0	-19	-8 +	72	3	ŧ	₽.	7	¥	¥	1 2	1 <u>3</u>	13 +	1 <u>4</u>	14 +
					- 7	-27	-24	- 1 e	72		4	4	ŧ	₽ [°]	7	10 4	11	12 4	13 +	13 +
					- 1 4	₽ -26	-25	-40	-13			9	3	\$	7	7	14	¥	¥	1 2
					7-1	7 -3	2-22	-19	-12	-40		74	ŧ	4	ŧ	7	ŝ.	14	10	¥
			7	79 7	- 1 °	-1	7-17	- 1 e	-13	-‡0			9	÷	4	ţ	ŝ	Ę	10	10 4
K	37	47	1 <u>4</u> 6	¥	74	-#	' -‡1	-‡1	-40				9	4	4	Ę	7	ą	7	10
K			2,9 +	18 +	Ť.	9		75				74	4	4	4	후	7	ŝ	쿠	10 +
K	41			2 ₄ 6	147	10 14	4	÷	9	7	9	÷	4	3	4	ŧ	7	ŝ	1	Ĵ
K	37			2 ₄ 9	2 <u>2</u>	1 <u>6</u>	14	7	4	3	3	3	4	4	ş	ŧ	7	ŝ	ą	ą
\mathbb{R}	343		33	2 ₄ 9	24 +	1 2 9	1 <u>5</u>	¥	Ŷ.	7	ŧ	ş	ŧ	ţ	7	7	ŝ	ą	7	10
\mathbb{R}	30	3 <u>1</u> +	3 <u>1</u>	2 ₄ 8	25 +	21	17	1 <u>4</u> +	¥	10 4	Ĵ	₽,	\$	ŝ	å	\$	7	7	10	10 +
K	27	2 ₄ 8 +	28 +	27 +	2,5 +	22 +	19 +	1 <u>4</u> 6	14	12	¥	¥	7	7	2	2	¥	ιp	¥	1 <u>4</u>
\mathbb{R}	24	2,6 +	2 ₄ 6	2 ₄ 6	2 <u>4</u>	2 <u>2</u>	240	18	1 <u>6</u>	14 +	13 +	1 <u>2</u>	¥	¥	¥	12	¥	¥	¥	4
\mathbb{P}	22	2,4	2,4	2,4	2,3	22	2,0	1,9	17	1,6	1,4	1,3	1,3	12	12	12	11	11	12	12

						-14	-11	-6 +	9	4	7	7	¥	12	1 <u>3</u>	14	15	1 <u>5</u>	16	146 4
					- 7	-11	-21	-46	-2	-4	4	4	ţ	7	10	12	123	14 +	14	15
					-#	15 -22			-14	72	-4	ę.	3	ŧ	ą	140	¥	12	13	14
			,		16 -1					-40	-6	74	4	4	ŧ	ą	42	¥	12	1 <u>3</u>
			4	3 6-‡	′- ₽⁰	-1	3-14	-13	-11	72	75	72	4	3	ŧ	1	1	10	4	12
\mathbb{R}	35	ą.	29	-	+	-3 +	Ŧ	- 1 6	⊉	-4 +	-3	9	4	4	ŧ	7	2	140	뀿	12
\mathbb{R}	63	35	30 +	2,3 +	15	ĝ.	4	2	4	4	4	2	3	후	ŧ	\$	2	10	¥.	12
\mathbb{R}	32	32	搫	33	2 ₄ 6	华	14	140	4	ŧ	5	\$	ţ	7	7	a t	2	1,0 +	4	12 +
\mathbb{R}	35	38 4		зŧе	31	2,6 +	20	16 +	1 <u>,</u> 3	4	7	2	ą.	2	2	₽	40	¥	¥	12
\mathbb{R}	32	36	37	зe	33 +	249	25 4	21	147 147	45	148	12	4	4	¥	¥	¥	12	12	1,3
\mathbb{P}	30	343	35	35	33	30	27	24	21	1,8 +	16 +	15 +	14 4	143 14	43		143	148 4	13	13
	2,8	31	33 +	33 +	33	31 +	28	2,6	2,3	21	149	17	1,6 +	15	14	14	14	14	14	14
$\left\ \right>$	2_6	2,9	31	32	32	31	2,9	27	25 +	2,3	21	19	18	47	1,6 +	15	15	15	15	15
	25	27	2,9 +	30	30	30	29	27	26	24	22	21	1.9	148	47	47	16	16	16	16

Σχ.7.3.1.25 Στρώση -45, τάση τ_{xy} με κυκλική οπή

	\$				<u>_</u>	28 +	27 +	25 +	24 +	243 4	2 <u>2</u>	21	2 <u>1</u>	2 <u>0</u>	20	240 -	20	20	1 9	埠
K	4				4	2,9 +	3 <u>1</u>	2 - 9	27 47	25 +	24 +	2,3 +	22 4	2 <u>1</u>	2 <u>1</u> +	2 <u>1</u>	2 <u>0</u>	2 <u>0</u>	2 ₁ 0	20
K	4				7	32 32	32 +	30 4	28 +	2 ₁ 6	25 +	24 +	23 +	22 +	22 +	21 +	21 +	21 +	2 ₀	20 +
K	4				32 ₃₂	31	31	30 4	28 +	27	2 ₄ 6	2 <u>5</u>	24 +	2 ₄ 3	2 <u>2</u>	2 <u>2</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	20
K	<u></u>	4		일의 식 28.25	30 + 2	4 24 28 4	9 29	2 ₄ 8	2 ₄ 8	27 4	2,6 +	25 +	24 +	2 ₄ 3	2 <u>2</u>	2 <u>2</u>	2 <u>2</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u> +	2 <u>1</u>
\mathbb{R}	1 <u>5</u>	24	24 +	+ +	2,6	27	246	2_6 +	2_6 +	2,6 +	2,5 +	24 +	24 +	23 +	2,3 +	22 +	22 +	21 +	21 +	21 +
\mathbb{P}	14 +	1_6 +	148	20	2 <u>2</u>	2 ₄ 3	2 ₄ 4	24	24	24 +	24	24	2 ₄ 3	2 <u>1</u> 3	22	2 <u>2</u>	2 <u>2</u>	21	2 <u>1</u>	2 <u>1</u> +
	14 +	14 +	15 +	47	19	2,0	21	22 +	2,3 +	2 ₄ 3	2 ₄ 3	23	23	22 +	22	22 +	2 <u>1</u> +	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>
\mathbb{R}	15 +	1 <u>4</u> +	15 +	146 +	17	148	20	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	22 4	22 +	22 4	22 +	2 <u>2</u>	2 <u>2</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u> +
K	1 <u>4</u> 5	15 +	15 4	15 +	1,6 +	17	1 <u>8</u>	19	20	21	21	21	2 <u>1</u> +	2 <u>1</u>	21	2 <u>1</u>	21	2 <u>1</u>	2 <u>1</u>	2 <u>1</u> Ŧ
\mathbb{R}	1 <u>6</u>	1 <u>5</u>	15 4	15 +	16 +	47	47	148 14	42	20	20	20	2 <u>1</u>	2 <u>1</u> +	2 <u>1</u>	2 <u>1</u> 4	2 <u>1</u> +	$\frac{21}{4}$	2,0	20 4
\mathbb{R}	16 +	16 +	1 ₄ 6 +	1_6 +	1 <u>6</u>	1 <u>6</u>	17	18 +	18 +	19 4	19	20	20	2 <u>0</u>	20	2,0 +	2,0 +	20	2,0 +	20 +
\mathbb{R}	47	1 <u>4</u> 6	146 4	1_6 +	1 ₄ 6	1_6	47	147	18	1 <u>4</u> 8	1,9	19	149	20	20	20	2 <u>0</u>	20	240	20
$ \geq$	17	17	16 +	1_6 +	1,6 +	16	17	17	17	18	18	19	1,9	1,9	19	20	20	20	20	20
5.77	217	26 2.		$\sigma n /$	15 T	άσn	т і	ic in		ion										

Σχ.7.3.1.26 Στρώση -45, τάση τ_{xy}, με inclusion

\mathbb{N}	₽₽	٩₽	80	ep ^{ep}	뫅	75	73	70	ę7	6 <u>4</u>	°₽	е <u>1</u>	ęo	59	58	57	57	57	546 +	5,6
K	₽₽	вp	90 81	81	11 11	76	78	74	74	67 +	65 +	€3	6 <u>1</u>	ęo	59	58	58	57	57	56 +
R	Ψ	вp	ιερ	80	٩.		78	75	74	ęa	ęę	64 +	62 +	\$ <u>1</u>	eo eo	59 +	58 +	58 +	57	57 +
\mathbb{R}	ър	₽₽	박 말	¥۲	78 ₇₈	-f" + 7	74	73	74	é8	еe	6 <u>4</u>	εз	62 4	ęo	εo	5-9	548	5,8	57
\mathbb{R}	82	막		74 65 66	74	(⁴ 74	9 7 <u>0</u>	εp	ęз	€7 ‡	65 +	64 +	εз	62 4	61 +	εo	59	58	58	57
\mathbb{P}	346	54 +	. \$₽7	+ +	र्च <u>ः</u>	τ 65 - -	65 +	65 +	65 +	65 +	64 +	es T	62 4	6 <u>1</u>	ęo	εo	59	58	58 +	57
\mathbb{P}	8 <u>9</u>	4 <u>4</u> +	48 +	5 <u>2</u>	5 <u>-</u> 6	5-9 +	ξÛ	6 <u>1</u>	62	\$ <u>2</u>	62 4	탁	6 <u>1</u>	εo	ęo	5g9	sp.	58	5,8	57
	43 +	43 +	45 +	4 <u>8</u>	5 <u>1</u>	54 +	56	58 +	59	εo	ęo	εo	εo	5g	59	5,9	5ª	58	58	57
	45 +	45	45 +	46 +	48 +	51	5 <u>3</u>	55 +	546	57	58	58 +	58	54	5ª	548	5ª	57	57	57
	47	46	4,6 +	4.6 +	48 +	49 +	5 <u>1</u>	53 +	54 +	55	5_6	57	57	57	57	57	57	57	57	57
	48 +	47	47	47 +	48 +	49 +	sρ	5 <u>1</u>	53	54	55	55 +	56	56	56	5,6	56	5.6 +	56	56 +
	49 +	48	48 +	48	48	49 +	50	51 +	52 +	53 +	54 +	54 +	55	55	56 +	5,6	56	56 +	5,6 +	56 +
	sρ	49	49	48	48	49	49	50	51	52	543	53	54	54	55	55	55	55	5,5	55
	51	so	4.9 +	49	49	49	49	50	51	51	52	53 +	53	54	54	54	55	55	55	55
Σχ.7.	3.1.2	28 Σ	τρώ	ση -	45, 1	ιάση	von	Mis	ses,	με ir	nclus	sion								

Σχ.7.3.1.27 Στρώση -45, τάση von Mises με κυκλική οπή



Για να διαπιστώσουμε την επίδραση της πλήρωσης στο μοντέλο θεωρούμε τέσσερις τομές, Α, Β, Γ και Δ, όπως δείχνει το σχήμα.



Σχ.7.3.1.29 Τομές Α,Β,Γ και Δ

Στα πεπερασμένα στοιχεία των εν λόγω τομών γίνεται σύγκριση των τάσεων πριν και μετά τη χρήση inclusion, ώστε να εξετάσουμε την επίδρασή της επέμβασης στο σύνθετο υλικό. Ενδεικτικά για την περίπτωση του [0/45/90/-45]_s σχεδιάστηκαν διαγράμματα όπου ο ένας άξονας αφορά τη θέση του πεπερασμένου στοιχείου στην τομή και ο δεύτερος την τάση. Οι τιμές τάσεων των πεπερασμένων είναι εκείνες που προέκυψαν από το πρόγραμμα Sofistik.



Σχ.7.3.1.30 Διαγράμμα τάσεων σ_x για τομή Α για 0°

Στην περίπτωση που υπάρχει οπή οι τάσεις σ_x κυμαίνονται από 240-659 MPa. Τοποθετώντας πυρήνα οι τάσεις κυμαίνονται από 134 έως 254 MPa. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη τάση μειώνεται κατά 61%.Παράλληλα οι τάσεις κατά μήκος της τομής γίνονται περισσότερο ομοιόμορφες κατά 71%.

Ακολουθεί το διάγραμμα για την τομή Β. Εδώ οι τάσεις κυμαίνονται από 113-313 MPa στην περίπτωση της κυκλικής οπής και 238-303 MPa με την πλήρωση αυτής. Δηλαδή οι τάσεις γίνονται περισσότερο ομοιόμορφες κατά 67%.



Σχ.7.3.1.30 Διαγράμμα τάσεων σ_x για τομή Β για 0°

Κατά τη διαμήκη τομή, Γ, οι τάσεις κυμαίνονται από 30-254 MPa, με ανοιχτή οπή και από 254-325 MPa με πλήρωση οπής. Αυτό σημαίνει ότι παρατηρείται αύξηση της μέγιστης τάσης 28%, και αποκατάσταση ομοιομορφίας τάσεων στην περιοχή κατά 68%. Η αύξηση των εφελκυστικών τάσεων στην περιοχή αυτή για τη στρώση 0° είναι επιθυμητή ως ανακατανομή, γιατί η στρώση των 0° είναι η περισσότερο ισχυρή για ανάληψη των τάσεων σ_x.



Σχ.7.3.1.30 Διαγράμμα τάσεων σ_x για τομή Γ για 0°

Κατά τη διαμήκη τομή Δ, οι τάσεις που κυμαίνονταν από 248-353MPa πριν, με inclusion είναι 224-256MPa.Δηλαδή επιτυγχάνεται μείωση της μέγιστης τάσης κατά 28% και μεγαλύτερη ομοιομορφία κατά 69%.



Σχ.7.3.1.30 Διαγράμμα τάσεων σ_x για τομή Δ για 0°

7.3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΠΛΗΣΙΟΝ ΟΠΗΣ

Ελέγχονται οι τάσεις σ_x,σ_y, τ_{xy}, και von Mises, στα τρία πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται πλησίον της οπής Α, Β, Γ, και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Συγκρίνονται οι τιμές πριν και μετά την πλήρωση οπής με την αρχική κατάσταση τάσεων του σύνθετου υλικού (πριν τη διάνοιξη οπής).



Σχ.7.3.2: Σημεία Α,Β,Γ ελέγχου τάσεων

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες.

Σημείο Α	Т	άσεις [Ν	; με ο /Pa]	πή	Τάα	μ 2ι3τ []	ε inclu IPa]	ision	Δ	οχικέ [Ν	ς τάσ IPa]	εις
	σ _x	σ_y	Т _{ху}	von Mises	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises
0°	56	-1	-2	57	148	-2	1	149	127	-1	0	128
45°	25	9	-13	31	55	14	-20	60	48	14	-19	54
90°	12	-13	-2	21	30	-34	1	55	26	-27	0	46
-45°	18	3	4	18	57	16	23	64	48	14	19	54

A) [0/45/90/-45]_S

Σημείο Β	Т	άσεις [Ν	; με ο /Pa]	πή	Τά	μ 2ו3כ /\]	ε inclu /Pa]	ision	4	νοχικέ [Ν	ές τάσ IPa]	εις
	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_y	Т _{ху}	von Mises	σ_{x}	σ_{y}	T _{xy}	von Mises
0°	169	-7	-5	172	112	0	2	116	127	-1	0	128
45°	68	17	-33	83	42	12	-13	44	48	14	-19	54
90°	34	-60	-5	82	24	-19	2	37	26	-27	0	46
-45°	51	0	8	53	49	19	23	59	48	14	19	54

Σημείο Γ	Т	άσεις [Ν	; με ο /Pa]	πή	Τάα	τεις μ []	ε inclu /Pa]	ision	Δ	νρχικέ [Ν	ς τάσ IPa]	εις
	σ _x	σ _y	т _{ху}	von Mises	σ_{x}	σ_y	Т _{ху}	von Mises	σ_{x}	σ_y	T _{xy}	von Mises
0°	161	5	1	158	116	-2	0	117	127	-1	0	128
45°	66	30	-28	75	43	10	-16	48	48	14	-19	54
90°	34	-2	1	35	23	-31	0	48	26	-27	0	46
-45°	69	33	32	82	42	10	15	47	48	14	19	54

Πιν. 7.3.2a.: Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0/45/90/-45]_S

Σημείο Α	Т	άσεις [Ν	; με ο /Pa]	πή	Τάα	μ 2ι3τ []	ε inclu IPa]	ision	۵	οχικέ [Μ	ς τάσ IPa]	εις
	σ _x	σ _y	Т _{ху}	von Mises	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_y	T _{xy}	von Mises
0°	38	-1	-2	33	115	-1	0	116	101	-1	0	101
30°	28	5	-12	34	72	12	-25	79	64	11	-23	71
90°	8	-10	-2	16	24	-26	0	43	21	-21	0	36
-30°	19	2	4	20	74	12	27	83	64	11	23	71

B) [0/30/90/-30]_s

Σημείο Β	I	άσεις [Ν	ς με ο ΄ /IPa]	πή	Τάο	μ 2ι3τ //]	ε inclu /Pa]	ision	4	οχικέ [Ν	ς τάσ IPa]	εις
	σx	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ,	Т _{ху}	von Mises	σ_{x}	σ_y	T _{xy}	von Mises
0°	138	-6	-4	141	93	0	2	93	101	-1	0	101
30°	94	13	-39	111	56	10	-18	60	64	11	-23	71
90°	27	-51	-4	69	19	-15	2	30	21	-21	0	36
-30°	74	5	19	70	64	13	25	70	64	11	23	71

Σημείο Γ	Т	άσεις [Ν	; με ο /Pa]	πή	Τάα	ן אַנוזע ∿]	ε inclu IPa]	ision	Δ	οχικέ [Μ	ς τάσ IPa]	εις
	σ _x	σ_y	т _{ху}	von Mises	σ_{x}	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_y	Т _{ху}	von Mises
0°	127	6	1	125	94	-2	0	95	101	-1	0	101
30°	84	22	-29	91	59	9	-21	66	64	11	-23	71
90°	27	5	1	25	19	-24	0	37	21	-21	0	36
-30°	87	23	33	97	59	9	20	65	64	11	23	71

Πιν. 7.3.2b.: Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0/30/90/-30]_S

Σημείο Α	Т	άσεις [Ν	; με ο /Pa]	πή	Τάα	τεις μ []	ε inclu 1Pa]	ision	4	οχικέ [Μ	ς τάσ Pa]	εις
	σ_{x}	σ,	T _{xy}	von Mises	σ _x	σ _y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_y	Т _{ху}	von Mises
0°	68	1	-2	67	171	1	1	171	146	1	0	146
60°	19	8	-8	21	42	7	-7	41	37	9	-8	36
90°	14	-9	-2	20	35	-26	1	53	30	-19	0	43
-60°	15	0	-1	15	43	9	9	42	37	9	8	36

Г) [0/60/90/-60]_S

Σημείο Β	I	άσεις [Ν	ς με ο ΄ /Pa]	πή	Τά	τεις μ []	ε inclu IPa]	ision	Δ	οχικέ [Μ	ς τάσ IPa]	εις
	σx	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ _x	σ,	T _{xy}	von Mises	σx	σy	T _{xy}	von Mises
0°	191	-3	-5	193	134	2	3	131	146	1	0	146
60°	49	8	-16	54	32	5	-2	30	37	9	-8	36
90°	39	-48	-5	76	28	-12	3	36	30	-19	0	43
-60°	39	-17	-8	52	37	18	15	41	37	9	8	36

Σημείο Γ	Т	άσεις [Ν	; με ο /Pa]	πή	Τάα	ן אַנוזע ∿]	ε inclu IPa]	ision	Δ	νρχικέ [Μ	ς τάσ IPa]	εις
	σ _x	σ_y	т _{ху}	von Mises	σ_{x}	σ_y	Т _{ху}	von Mises	σ_{x}	σ_y	Т _{ху}	von Mises
0°	188	8	1	184	130	0	0	130	146	1	0	146
60°	51	29	-15	51	32	5	-6	32	37	9	-8	36
90°	40	5	1	38	27	-21	0	42	30	-19	0	43
-60°	53	33	19	57	32	4	5	31	37	9	8	36

Πιν. 7.3.2c.: Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0/60/90/-60]_S

Δ) [0₈]

Σημείο Α	Τάσεις με οπή [MPa]				Τάα	σεις μ []	ε inclu IPa]	ision	Αρχικές τάσεις [MPa]			
	σ_{x}	σ _y	т _{ху}	von Mises	σ _x	σ_{y}	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_{y}	т _{ху}	von Mises
0°	13	-2	-2	15	67	0	0	68	62	0	0	62

Σημείο Β	Τάσεις με οπή [MPa]				Τάα	μ 2ו3כ /\]	ε inclu /Pa]	ision	Αρχικές τάσεις [MPa]			
	σ _x	σ	T _{xy}	von Mises	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises
0°	93	-5	-4	95	60	0	1	60	62	0	0	62

Σημείο Γ	Т	άσεις [Ν	ς με ο /Pa]	πή	Τάα	τεις μ []	ision	Αρχικές τάσεις [MPa]				
	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_{y}	T _{xy}	von Mises
0°	79	7	1	76	61	0	0	61	62	0	0	62

Πιν. 7.3.2d.: Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion [0₈]

E) [0₂/90₂]_S

Σημείο Α	Τάσεις με οπή [MPa]				Τάα	τεις μ []	ε inclu IPa]	ision	Αρχικές τάσεις [MPa]			
	σ_{x}	σ_y	Т _{ху}	von Mises	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_{y}	Т _{ху}	von Mises
0°	34	1	-3	34	117	3	1	115	103	3	0	102
90°	7	-3	-3	10	25	-6	1	28	22	-3	0	24

Σημείο Β	Τάσεις με οπή [MPa]				Τάα	τεις μ []	ε inclu /Pa]	ision	Αρχικές τάσεις [MPa]			
	σ _x	σ_{y}	T _{xy}	von Mises	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_y	T _{xy}	von Mises
0°	143	0	-6	143	96	3	3	95	103	3	0	102
90°	29	-24	-6	47	20	-2	3	22	22	-3	0	24

Σημείο Γ	Τάσεις με οπή [MPa]				Τάα	τεις μ []	ε inclu /Pa]	ision	Αρχικές τάσεις [MPa]			
	σ _x	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_y	T _{xy}	von Mises	σ_{x}	σ_{y}	Т _{ху}	von Mises
0°	133	9	1	129	96	3	0	95	103	3	0	102
90°	29	18	1	25	20	-3	0	22	22	-3	0	24

Πιν. 7.3.2e.: Τάσεις σε σημεία ελέγχου Α,Β,Γ για αρχικό δοκίμιο και για δοκίμιο με οπή/ inclusion $[0_2/90_2]_s$

7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα, η χρήση των inclusion αποκαθιστά σε μεγάλο βαθμό τις τάσεις πλησίον της οπής. Ενδεικτικά στο δοκίμιο 0°/45°/90°/-45° και εν συγκρίσει με το αρχικό δοκίμιο, η απόκλιση τάσεων στην περίπτωση οπής είναι 52% για την στρώση των 90° και 14% μόνο στην περίπτωση με inclusion. Πινακοποιώντας και για τις υπόλοιπες στρώσεις και τα υπόλοιπα δοκίμια προκύπτει όσον αφορά τις μέσες αποκλίσεις ανά στρώση και δοκίμιο (για περιοχή πλησίον της οπής) :

Απόκλιση (%) από το αρχικό δοκίμιο για τάσεις von Mises												
		[0/45/	90/-45]	s		[0/30/	90/-30]s	[0/60/90/-60] _s			
	0°	45°	90°	-45°	0°	30°	90°	-30°	0°	60°	90°	-60°
oπή°	38	45	52	40	44	46	59	37	37	44	47	54
inclusion	11	14	14	14	10	11	13	19	13	14	14	15

Απόκλισι	Απόκλιση (%) από το αρχικό δοκίμιο για τάσεις von Mises												
	[0 ₈] [0 ₂ /90 ₂] _S												
	0°	0°	90°										
oπή°	51	44	53										
inclusion	5	9	11										

Πιν.7.4 :Απόκλιση % από αρχικό δοκίμιο για τάσεις von Mises

Παρατηρούμε ότι λόγω οπής οι τάσεις von Mises αποκλίνουν από εκείνες του αρχικού δοκιμίου, και μάλιστα σε μεγάλο βαθμό οι κάθετες ως προς τη φόρτιση στρώσεις, οι οποίες είναι και πιο ευάλωτες για τη δεδομένη φόρτιση εφελκυσμού. Οι αποκλίσεις είναι αρκετά μεγάλες και ξεπερνούν και το 50%. Ωστόσο με τα inclusion οι τάσεις αποκαθιστούνται σε μεγάλο βαθμό και οι αποκλίσεις πια να κυμαίνονται μόλις στην περιοχή των 5-15%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

Ελληνική Βιβλιογραφία

- 1. Ραυτογιάννης Ι., "Σύνθετα Υλικά", Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2009,
- Παπανικολάου Γ.-Μουζάκης Δ., "Σύνθετα Υλικά", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2007
- Παντελάκης Σ., "Τεχνολογία Σύνθετων Υλικών", Εκδόσεις Παν/μίου Πατρών 1991
- Παντελής Δ., "Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά", (Πολυμερή-Κεραμικά-Σύνθετα Υλικά-Ξύλο), Εκδόσεις (2^η) Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008
- Ραυτογιάννης Ι, "Κατασκευές από Σύνθετα Υλικά" (Σημειώσεις), Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2007
- John McMurry, Οργ. Χημεία(Εποξυρητίνες και συγκολλητικές ουσίες), Παν/μιακές Εκδόσεις (3ⁿ) Κρήτης, Ηράκλειο 2002
- 7. Τεχνολογία και Επιστήμες (Λεξικό ξενόγλωσσο) Εκδόσεις Σταφυλίδη
- Γνωρίζω την Τεχνολογία, Encyclopaedia, Gruppo Editoriale Fabbri S.p.A.Milano Ιταλία 1988
- 9. Επιστήμη και Τεχνολογία, Εγκυκλοπαίδεια , Εκδόσεις Κουμουνδουρέας
- 10. Librairie Larousse Encyclopaedia Brittanica Inc. Εκδοτικός Οργανισμός Πάπυρος 1987

Αγγλική Βιβλιογραφία

- 1. Sofistik manual Analysis Programs, Version 2012
- 2. Michelis AI., "Plug Repairs of Marine Glass Fiber/Vinyl Ester laminates subjected to Uniaxial Tension"
- William D.Callister, JR., "Materials Science and Engineering, An Introduction, Εκδόσεις (5ⁿ) Tziola, Thessaloniki 2004
- 4. Laszlo P.Kollar George S.Springe, "Mechanics of Composite Structures", Cambridge University Press, New York 2003
- 5. Stephen W.Tsai, "Introduction to composite Materials", Technomic Publ. Co, 1980
- 6. Derek Hull and T.W. Clyne, "An Introductions to Composite Materials" Cambridge University Press, Cambridge 1996
- 7. Ori Ishai, Isaac M Daniel, "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, 2005
- 8. "Handbook of Composites" Lubin G (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 1982
- 9. D.Hull: An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, 1981

- 10. R.M Jones, Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Taylor and Francis, 1999
- 11. K.Kowata, T.Asaka, Composite Materials, Mechanical Properties and Fabrication, Applied Science Publishers, London 1982
- 12. NASA Langley Research Center: Tough Composites Materials: Recent Developments, Noyes, Park Ridge, 1985
- 13. M.M Schartz: Composite Materials Handbook, McGraw-Hill, Mew York 1984.
- 14. Composites Design, Notched Strength, (Σημειώσεις) Εκδόσεις ΕΜΠ
- 15. Structural Intervations with Composite Materials, (Σημειώσεις) Εκδόσεις ΕΜΠ