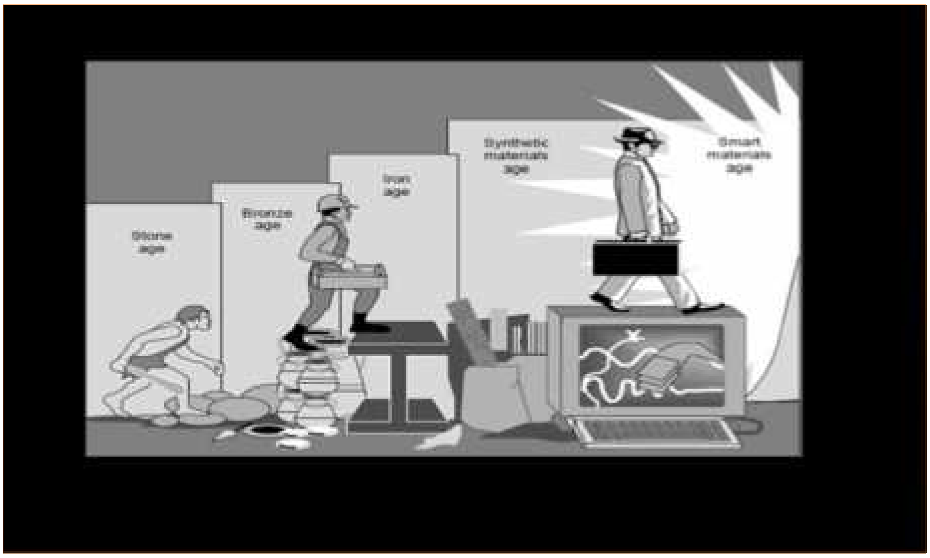
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών»
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Γιαννού

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΕΜΚ ΜΕ 2012/09

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών»
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Γιαννού

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΕΜΚ ΜΕ 2012/09

Περιεχόμενα

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2011/04

Σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών

Γιαννού Μαρία (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης. Ι)

Περίληψη

Ένα από τα σύγχρονα πεδία εφαρμογής της Μηχανικής είναι ως γνωστόν η μελέτη των συνθέτων υλικών τα οποία ευρίσκονται σε συνεχή εξέλιξη την τελευταία τριακονταετία. Σκοπός αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας είναι αρχικά η μελέτη της ιστορίας τους και της δομής τους, των πλεονεκτικών ιδιοτήτων τους σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά καθώς και των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των διαφόρων διαδικασιών παραγωγής τους. Κυρίως όμως, παρουσιάζονται λεπτομερώς επιλεγμένες σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών που ανοίγουν δρόμους για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογές τους στο μέλλον καθώς επίσης και για τη δημιουργία έξυπνων ή ευφυών δομών/υλικών, που θα μπορούν να επιτηρούν τις συνθήκες τους, να ανιχνεύουν επικείμενη αστοχία, να ελέγχουν ή να θεραπεύουν ζημιές, και να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Έτσι, λοιπόν, μέσα από πειραματικές και μαθηματικές διαδικασίες και προσομοιώσεις αποκομίζονται χρήσιμα συμπεράσματα και αναθεωρήσεις των μέχρι τώρα δεδομένων, που θα βοηθήσουν σίγουρα στην καλύτερη κατανόηση, βελτίωση και εφαρμογή των σύνθετων και μεταγενέστερα, έξυπνων υλικών.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2011/04

Modern developments in composite materials technology

Giannou Maria (supervised by Raftogiannis. I)

Abstract

One of the modern application fields in Engineering is, as known, the study of composite materials which are in continuous development over the last thirty years. The purpose of this master thesis is initially the study of their history and their structure, their advantageous properties compared to conventional materials and the advantages and disadvantages of the various production processes. Mostly though, selected modern developments in composite materials technology that open horizons for further research and applications in the future as well as for creating intelligent or smart structures / materials that can monitor their conditions, detect impending failure to control or treat damage and adapt to changing environments are presented in detail. So, through experimental and mathematical procedures and simulations, useful conclusions and reviews of the present data are drawn, which will definitely help in better understanding, improvement and application of complex and subsequently, smart materials.

Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον επιβλέποντα Καθηγητή μου Κο Ραυτογιάννη Ιωάννη για την πολύτιμη βοήθεια, τη συμπαράστασή του και τις χρήσιμες υποδείξεις του.

1. Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

1.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη των σύνθετων υλικών

Οι ταχέως αναπτυσσόμενες εφαρμογές των συνθέτων υλικών στα τελευταία έτη, δημιούργησαν μεγάλη αισιοδοξία για το μέλλον της τεχνολογίας τους. Αν και σύνθετα υλικά κατασκευασμένα από άνθρωπο προυπήρχαν εδώ και χιλιάδες έτη, η υψηλή τεχνολογία τους εξελίχθηκε στην αεροδιαστημική βιομηχανία μόνον τα τελευταία τριάντα έτη. Τα σύνθετα υλικά, τα πλαστικά και τα κεραμικά έχουν αναδειχθεί πολύ και τείνουν να επικρατήσουν σε καθημερινές εφαρμογές από τη δεκαετία του ’80 και μετά. Ο όγκος και ο αριθμός των εφαρμογών των σύνθετων υλικών έχουν σταθερή ανάπτυξη και πρόσφατα έχουν κατακτήσει τις νέες αγορές. Οι περισσότεροι γνωρίζουν τα θαλάσσια σκάφη από fiberglass και τα αθλητικά είδη από ίνες γραφίτη. Οι πιθανές εφαρμογές των σύνθετων υλικών περιορίζονται μόνο από τη φαντασία του ανθρώπινου είδους. Οι δεξαμενές και τα μεγάλα δοχεία τα οποία κατασκευάζονται με τη μέθοδο περιτυλίξεως ινών υάλου υπήρξαν η πρώτη εφαρμογή χρήσεως των μοντέρνων σύνθετων υλικών.

Στη συνέχεια, στη δεκαετία του ’60 ήρθαν οι ίνες βορίου οι οποίες συντέλεσαν στη δημιουργία προγραμμάτων για την προώθηση της κατασκευής αεροσκαφών από σύνθετα υλικά για την αεροπορία των Η.Π.Α. Ο οριζόντιος σταθεροποιητής (stabilizer) των αεροσκαφών F-111 υπήρξε το πρώτο τεμάχιο αεροσκάφους που κατασκευάσθηκε από σύνθετο υλικό.

Η παραγωγή σταθεροποιητών από σύνθετα υλικά για τα αεροσκάφη F-14 στην αρχή της δεκαετίας του ’70 ήταν ένα άλλο σημαντικό βήμα. Ακολούθησε ο σταθεροποιητής των F-15 και το πηδάλιο και ο σταθεροποιητής για τα F-16. Στην αρχή της δεκαετίας του ’80 το νεοκατασκευασθέν Boeing 767 περιείχε σχεδόν δύο τόνους συνθέτου υλικού στις δοκούς δαπέδου και σε όλες τις επιφάνειες ελέγχου. Το γιγαντιαίο Σοβιετικό μεταγωγικό Antonov 124, έχει συνολικά 5500Kg συνθέτου υλικού από τα οποία τα 2500Kg περιέχουν ίνες γραφίτου. Το πτερύγιο των Airbus A310-300 κατασκευασμένο όλο από σύνθετο υλικό, είναι μια εντυπωσιακή κατασκευή παρά την απλότητα του. Σχεδόν όλα τα εμφανιζόμενα αεροσκάφη κάνουν εκτεταμένη χρήση των σύνθετων υλικών. Παραδείγματα είναι το αεροσκάφος Rafale της Dassault-Brequet, το Lavi της Ισραηλινής αεροπορικής βιομηχανίας, το JAS-39 Gripen της Σουηδικής Saah-Scania και το μαχητικό αεροσκάφος (European Fighter Aircraft) της Βρετανίας, Γερμανίας, Ιταλίας και Ισπανίας.

Το 1986, το Voyager, ένα άλλο αεροπλάνο κατασκευασμένο εξ’ολοκλήρου από σύνθετα υλικά δημιούργησε ένα παγκόσμιο ρεκόρ ταξιδεύοντας άνευ στάσεως. Το αεροπλάνο ήταν πολύ ελαφρύ και παρουσίαζε καταπληκτική ελαστικότητα και ανθεκτικότητα έναντι των καταιγίδων που συνάντησε. Σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής από ίνες γραφίτου χρησιμοποιούνται επίσης για την κατασκευή των διπλών πηδαλίων μιας νέας επαναστατικού τύπου θαλαμηγού μήκους 12 μέτρων, η οποία όπως και το Voyager καθιέρωσαν τη χρήση υλικών υψηλής τεχνολογίας σε καθημερινής χρήσεως κατασκευές.

Τα σύνθετα υλικά και η εξέλιξη του τρόπου επεξεργασίας τους αποτέλεσαν έναν από τους βασικούς παράγοντες για την ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας. Ίνες γραφίτου και «aramid» έγιναν εμπορεύσιμες στην αρχή της δεκαετίας του ’70. Οι εποξειδικές ρητίνες διατίθενται για πολλές χρήσεις.

Εκτός της αεροπορικής βιομηχανίας, τα υψηλής τεχνολογίας σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογές και σε άλλους τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας. Ναυτικά σκάφη,κουπιά, ποδήλατα, παντός είδους αθλητικά είδη (ρακέτες τένις, κοντάρια γκόλφ κλπ.) και σχεδόν κάθε εξάρτημα όπου το βάρος, η ακαμψία και η αντοχή παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργικότητα του, είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά. Εκατοντάδες τόνοι σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακος χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτη ύλη, από το 1993, για την κατασκευή ρακετών του τένις με αποτέλεσμα ρακέτες και σύνθετα υλικά να θεωρούνται έννοιες ταυτόσημες. Το 1985 στη διάσκεψη της Εταιρείας Μηχανικών, που έλαβε χώρα στο

Detroit των Η.Π.Α., εκφράστηκε η άποψη ότι η χρήση των σύνθετων υλικών στην βιομηχανία αυτοκινήτων θα είναι τόσο μεγάλη όσο και των ηλεκτρονικών συστημάτων. Για όλα αυτά είναι χρήσιμο να κάνουμε μια ιστορική αναδρομή και να παρακολουθήσουμε τη σταδιακή εξέλιξη των υλικών αυτών δια μέσου των αιώνων, η οποία παρουσίασε μια αλματώδη πρόοδο κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών.

Η έννοια του σύνθετου υλικού κατ'αρχήν μπορεί να δοθεί διαισθητικώς ως εξής: «Ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως σύνθετο, εξεταζόμενο μακροσκοπικώς, όταν σχηματίζεται από το συνδυασμό δυο ή περισσοτέρων υλικών και έχει ιδιότητες διάφορες των αρχικών υλικών που το δημιούργησαν». Συνήθως τα υλικά αυτά παρουσιάζουν βελτίωση των ιδιοτήτων των επί μέρους υλικών που το αποτελούν ή και εντελώς διάφορες ιδιότητες από αυτά.

Με τη βοήθεια αυτού του ορισμού θα αναφέρουμε τη σταδιακή εξέλιξη των υλικών αυτών και τη χρήση τους από τον άνθρωπο δια μέσου των αιώνων.

Από τη Βίβλο φαίνεται ότι οι Εβραίοι χρησιμοποίησαν άχυρο για να δώσουν μεγαλύτερη αντοχή στα λασπότουβλα. Οι Αιγύπτιοι χρησιμοποίησαν ένα είδος «κόντρα πλακέ» όταν κατάλαβαν ότι στρώματα ξύλου έχουν τη δυνατότητα να συνδυαστούν καταλλήλως ώστε να παρουσιάσουν ικανοποιητική αντοχή σε διάφορες κατευθύνσεις και να είναι ανθεκτικά στη διόγκωση και στη στρέβλωση, οι οποίες προκαλούνται από την υγρασία. Επίσης, στην Αίγυπτο και στη Μεσοποταμία εμφανίστηκαν σχεδίες από καλάμι παπύρου «δεμένο» με άσφαλτο. Οι Ασσύριοι κατασκεύασαν πλωτές γέφυρες με σανίδες εμποτισμένες με αδιάβροχη άσφαλτο. Το Μεσαίωνα κατασκευάστηκαν σπαθιά, ασπίδες και θώρακες από συνδυασμούς στρωμάτων διαφόρων μετάλλων και πρόσφατα ινώδη σύνθετα υλικά τα οποία έχουν μεγάλους λόγους αντοχής/βάρος και ακαμψία/βάρος χρησιμοποιήθηκαν σε κατασκευές όπου το μικρό βάρος αποτελεί σημαντικό παράγοντα όπως π.χ. αεροσκάφη.

Αυτό είναι, εν ολίγοις φυσικά, το ιστορικό των σύνθετων υλικών. Είναι εμφανές με όσα αναφέραμε παραπάνω ότι ο άνθρωπος από τα πρώτα χρόνια της υπάρξεως του στη Γη είχε ενστικτωδώς αντιληφθεί την έννοια του σύνθετου υλικού, δηλαδή είχε "διαισθανθεί" ότι ο συνδυασμός δυο ή περισσοτέρων υλικών, από μακροσκοπική άποψη έδινε τη δυνατότητα κατασκευής ενός τρίτου, σύνθετου, το οποίο ικανοποιούσε ορισμένες "ποιοτικές απαιτήσεις" της κατασκευής στην οποία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί.

Η ταχύτητα με την οποία εξελίσσονται τα σύνθετα υλικά δεν παρουσιάζεται η ίδια δια μέσου της ιστορίας τους. Μέχρι και τον 19ο αιώνα η εξέλιξη αυτή είναι πολύ μικρή και τα σύνθετα υλικά του 19ου αιώνα δεν απέχουν και πάρα πολύ από αυτά των αρχαίων Αιγυπτίων, Ελλήνων κλπ. , ούτε από άποψη ποιότητας ούτε από μεθόδους κατασκευής. Η πραγματική εκρηκτική εξέλιξη των σύνθετων υλικών σημειώνεται τον 20ο αιώνα και μάλιστα τα τελευταία 30-35 έτη, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Αυτό είναι συνέπεια μιας άλλης εκρηκτικής εξελίξεως της επιστήμης των γιγαντιαίων μορίων, των πολυμερών.

1.2 Η εξέλιξη των πολυμερών

Το μόριο ενός πολυμερούς είναι ένα μόριο μεγάλου μεγέθους (μακρομόριο) το οποίο αποτελείται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες. Αυτές είναι απλά χημικά παράγωγα τα οποία προέρχονται από τα αντίστοιχα μονομερή ή αρχικά υλικά με άνοιγμα διπλού δεσμού.

Τα γιγαντιαία μόρια ή πολυμερή συνθέτουν το υλικό όλων των ζωντανών οργανισμών. Τα κύτταρα τόσο των ζωικών όσο και των φυτικών ιστών με το πρωτόπλασμα και τον πυρήνα τους αποτελούνται από τέτοια μόρια. Ωστόσο η μοριακή δομή των πολυμερών και η επίδραση της δομής αυτής επί των ιδιοτήτων των υλικών ήταν άγνωστες ως πριν από λίγες δεκαετίες.

Μόλις αποκαλύφθηκε ότι τα πολυμερή είναι μακριές και με τάξη οργανωμένες αλυσίδες μικρότερων μορίων, ο άνθρωπος κατόρθωσε να δημιουργήσει κατά βούληση, μέσα στα εργαστήρια, όχι μόνο πολυμερή πανομοιότυπα με τα ήδη γνωστά των ζώντων οργανισμών, κάτι που άλλοτε ήταν εντελώς αδύνατο, αλλά επιπλέον και πρωτότυπα πολυμερή τα οποία δεν συναντιούνται στην φύση. Τα τελευταία είναι και τα πλέον ενδιαφέροντα από την πλευρά των συνθέτων υλικών. Το αποτέλεσμα των επιτευγμάτων αυτών ήταν η δημιουργία πλήθους νέων βιομηχανιών, μεγάλης σπουδαιότητας σήμερα, οι οποίες παράγουν μια τρομακτική ποικιλία από πλαστικές ύλες, σύνθετες υφαντικές ύλες και συνθετικό ελαστικό.

Είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι ένα πολυμερές ικανοποιεί τον ορισμό του συνθέτου υλικού ο οποίος δόθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, σε μικροσκοπική όμως κλίμακα, στην κλίμακα του μορίου, διότι αποτελείται από δομικές μονάδες προερχόμενες από αντίστοιχα μονομερή ή αρχικά υλικά τα οποία συνήθως έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες από τις δικές τους. Ακόμη, με την πρόσφατη πρόοδο υπάρχει η δυνατότητα να προσχεδιάζεται ένα πολυμερές ούτως ώστε να ικανοποιεί συγκεκριμένες ποιοτικές απαιτήσεις, «απαιτήσεις σχεδιάσεως», όπως ακριβώς και ένα μακροσκοπικά σύνθετο υλικό. Έτσι, σήμερα ο χημικός των πολυμερών είναι στην πραγματικότητα ένας μοριακός αρχιτέκτονας ο οποίος χρησιμοποιεί τις χημικές γνώσεις του για να παράγει «μόρια κατά παραγγελία». Με μια σειρά από βασικά μόρια ως πρώτη ύλη είναι δυνατόν να παράγει ουσίες οι οποίες είναι εύκαμπτες ή άκαμπτες, πυρίμαχες ή επιδεκτικές τήξεως, ελαστικές ή κολλώδεις κ.ο.κ. , για να πετύχει δε, τις επιθυμητές ιδιότητες υπολογίζει σχεδόν πάντοτε τρεις βασικούς παράγοντες :

α. Τη χημική σύνθεση των δομικών μονάδων (μονομερών).

β. Τις δυνατές μορφές των αλυσίδων των μορίων των πολυμερών οι οποίες μπορεί να σχηματιστούν.

γ. Τον βαθμό ευθυγραμμίσεως των αλυσίδων αυτών μέσα στο τελικό προιόν.

Ένα από τα καλύτερα παραδείγματα είναι το νάυλον το οποίο δημιουργείται από το συμπολυμερισμό του αδιπικού οξέος και της εξαμεθυλενοδιαμίνης. Το μόριο του νάυλον το έχει επινοήσει και κατασκευάσει ο άνθρωπος για να καλύψει ειδικές ανάγκες του. Έχει ιδιότητες τις οποίες δε διαθέτει κανένα άλλο μόριο στη φύση. Είναι το πρώτο πλήρες συνθετικό νήμα, μπορεί να ελκυστεί και να επιμηκυνθεί μέχρι 700%, με καλή επανάκτηση, είναι ισχυρότερο από τη φυσική ή τεχνιτή μέταξα (ραιγιόν) και η κλωστή του μπορεί να κατασκευαστεί πολύ λεπτότερη από τις ίνες φυσικής μετάξας.

1.3 Βασικές έννοιες

Ο όρος σύνθετα υλικά σημαίνει συνδυασμός δύο ή περισσοτέρων υλικών υπό διακριτή μορφή τα οποία συνεργάζονται και δημιουργούν ένα νέο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες. Π.χ. τα σκύρα ενώνονται με το τσιμέντο για να δημιουργηθεί το σκυρόδεμα, το οποίο έχει μεγάλη αντοχή, αλλά παράλληλα μπορεί να διαμορφωθεί σχηματικά αρκετά εύκολα με κατάλληλα καλούπια. Ενώ οι αυξημένες ιδιότητες του σκυροδέματος είναι η αντοχή και η ευκολία της κατασκευής, οι περισσότερες από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες μπορούν να βελτιστοποιηθούν με κατάλληλους συνδυασμούς υλικών. Τα πλέον συνήθη σύνθετα υλικά είναι αυτά που γίνονται με ισχυρές ίνες που συγκρατούνται με ένα συνδετικό υλικό. Μόρια ή νιφάδες (*particles ή flakes*) χρησιμοποιούνται επίσης ως ενισχύσεις, αλλά δεν είναι τόσο αποτελεσματικές όσο οι ίνες.

Τα παλαιότερα σύνθετα υλικά είναι φυσικά: το ξύλο περιέχει ίνες κυτταρίνης (*cellulose*) σε ένα συνδετικό υλικό από ξύλο (*lignin*). Οι ανθρώπινες κατασκευές σύνθετων υλικών πάνε πίσω χρονικά στη χρήση αργίλου ενισχυμένης με άχυρο για τούβλο καθώς και κεραμικά είδη. Στα σύγχρονα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται μέταλλα, κεραμικά ή πολυμερή συνδετικά υλικά, οπλισμένα με διάφορες ίνες ή σωματίδια. Π.χ. 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.

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

1. Ενισχύσεις

-Συνεχείς επιμήκεις ίνες

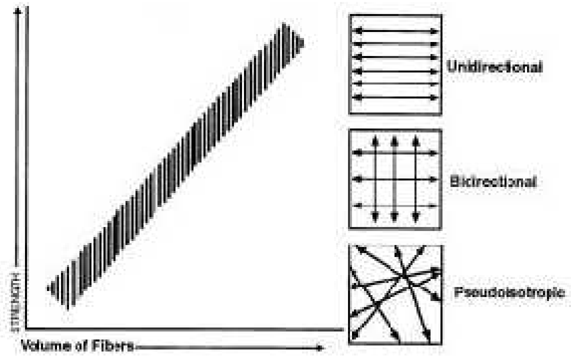
- Ίνες ενιαίου προσανατολισμού
- Ίνες διπλού προσανατολισμού (π.χ. πλεκτές (*woven*), *stitched mat* κ.α.)
- Τυχαίου προσανατολισμού (συνεχείς δέσμες ινών *continuous strand mat-*CSM)

-Ασυνεχείς ίνες

- τυχαίου προσανατολισμού (π.χ. κοντές δέσμες ινών (*chopped strand mat*))
- συγκεκριμένου προσανατολισμού (π.χ. *oriented strand mat*)

-Κοντές ίνες και σωματίδια

- τυχαίου προσανατολισμού
- συγκεκριμένου προσανατολισμού



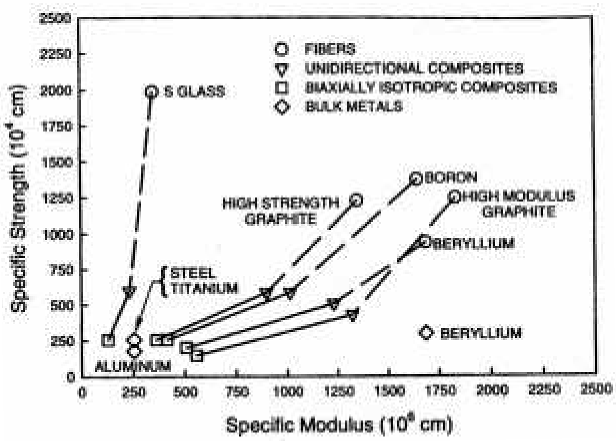
Σχ. 1.1: Σχέση αντοχής και προσανατολισμού των ινών

2. Διαμόρφωση διαστρωμάτωσης

- Ενιαίου προσανατολισμού, συμπεριλαμβανομένων πολλών στρώσεων, με το ίδιο υλικό και προσανατολισμό σε όλες τις στρώσεις
- Συνήθης διαστρωμάτωση, όπου τουλάχιστον κάποιες στρώσεις έχουν διαφορετικό προσανατολισμό ή υλικό

3. Υβριδική κατασκευή

-Διαφορετικά υλικά σε διάφορες στρώσεις (π.χ. διμεταλλικά)
-Διαφορετική ενίσχυση στη στρώση (π.χ. αναμιγμένες ίνες βορίου και άνθρακα (*intermingled borion και carbon*)



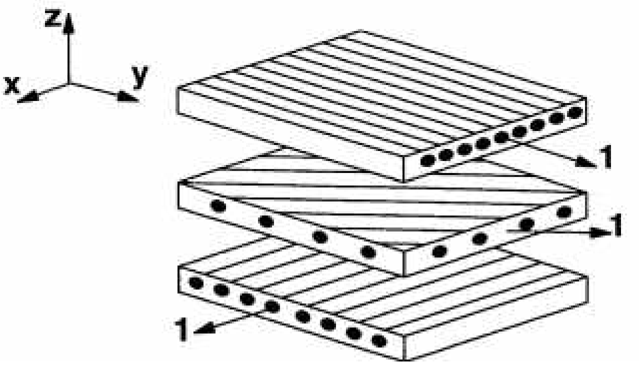
Σχ. 1.2: Σύγκριση αντοχών και δυσκαμψιών σύνθετων υλικών και μετάλλων

Οι ίνες προτιμώνται ως οπλισμός επειδή τα περισσότερα υλικά είναι περισσότερο ανθεκτικά υπό μορφή ινών παρά στη συμπαγή μορφή τους. Στην περίπτωση του γυαλιού, αυτό αποδίδεται στην οξύτατη μείωση του αριθμού των ελαττωμάτων κατά τη διαμόρφωση των ινών σε σύγκριση με αυτά στον συμπαγή όγκο γυαλιού. Οι βασικοί λόγοι που οδηγούν στη χρήση των σύνθετων υλικών είναι η μείωση του βάρους, η αυξημένη αντοχή, η βελτιωμένη αντοχή σε διάβρωση, κλπ. Άλλα πλεονεκτήματα που δίνουν κίνητρα για ορισμένες εφαρμογές είναι: ηλεκτρομαγνητική διαφάνεια, αντοχή σε φθορές, αυξημένη αντοχή έναντι κόπωσης, θερμική-ακουστική μόνωση, χαμηλή θερμική διαστολή, χαμηλή ή υψηλή μετάδοση της θερμότητας ανά περίπτωση.

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.

Πάντως, 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. Επίσης, το συνδετικό υλικό προστατεύει τις ίνες από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Το συνδετικό υλικό είναι κρίσιμα καθοριστικό για την αντοχή σε διάβρωση του σύνθετου υλικού. Εξαιτίας 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 (*infrastructure construction*) και κυρίως στις επισκευές και τις ενισχύσεις οφείλεται στην αυξημένη αντοχή τους έναντι περιβαλλοντικής αποδιοργάνωσης (*environmental degradation*).

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. 1.3: Επαλληλία τριών στρώσεων για τη δημιουργία διαστρωμάτωσης

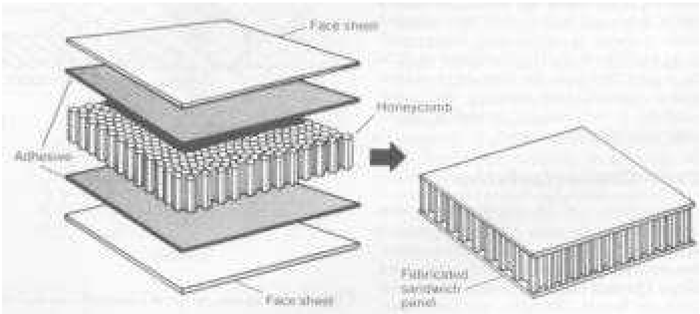
Εφόσον οι ίνες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνες τους και η αντοχή και δυσκαμψία του πολυμερούς είναι ασήμαντες εν συγκρίσει με αυτές των ινών, οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι κάπως χαμηλότερες από αυτές των ινών. Ακόμη τα σύνθετα υλικά είναι περισσότερο δύσκαμπτα και ισχυρά από τα περισσότερα από τα συμβατικά υλικά όταν συγκρίνονται ανά μονάδα βάρους, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2, σύμφωνα με τα δεδομένα των σύνθετων υλικών ενιαίου προσανατολισμού. Η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων με βάση αναφοράς τις ίνες προς το τελικό προϊόν (το σύνθετο υλικό) 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 (Σχ.1.3). 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 χρησιμοποιούνται 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 (*filler*) 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. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελούν στρώσεις ενισχυμένες με βόριο ανάμεσα σε άλλες στρώσεις ενισχυμένες με ίνες άνθρακα (*sandwich*). Οι ίνες βορίου παρέχουν υψηλή αντοχή σε θλίψη, αλλά είναι πολύ ακριβές και δύσκολες στο χειρισμό. Παρόλα αυτά, οι επιφάνειες με ενισχύσεις άνθρακα παρέχουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και απλοποίηση της κατασκευής ενώ μειώνουν το ολικό κόστος. Τελικά, το πιο κοινό *υβριδικό σύνθετο υλικό* είναι η κατασκευή *sandwich (Σχ.1.4)*. 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 τη 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: Κατασκευή διαστρωμάτωσης με πυρήνα

1.4 Διαδικασία σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες αποφάσεις για την κατασκευή, το χειρισμό, τη συντήρηση και τη 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 θα πρέπει να ικανοποιεί αυτά τα κριτήρια έτσι 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. Η διαδικασία φαίνεται στο Σχ.1.6.

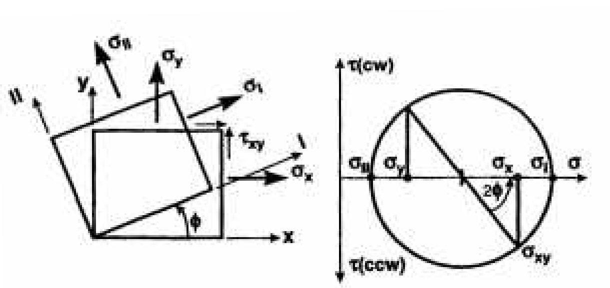
1.5 Σχεδιασμός με κύριες τάσεις

Ο σχεδιασμός με κύριες τάσεις βασίζεται στο μετασχηματισμό μιας εντατικής κατάστασης εκφρασμένης σε ένα σύστημα x-y ($\sigma_x,\sigma_y,\tau_{xy}$) στο κύριο σύστημα I-II (σ_I, σ_{II}), οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν από τον κύκλο του Mohr

$$\sigma_I = (\sigma_x+\sigma_y)/2 + \sqrt{[(\sigma_x-\sigma_y)^2/4 + \tau^2_{xy}]}$$

$$\sigma_{II} = (\sigma_x+\sigma_y)/2 - \sqrt{[(\sigma_x-\sigma_y)^2/4 + \tau^2_{xy}]}$$

$$\varphi = 1/2 * \tan^{-1} [2\tau_{xy}/ (\sigma_x-\sigma_y)],$$



Σχ. 1.5: Κύκλος του Mohr

όπου φ η γωνία που φαίνεται στο Σχ. 1.5 . Οι κύριοι άξονες (Ι,ΙΙ) έχουν προσανατολισμό παράλληλο των κυρίων τάσεων. Το πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι η διατμητική τάση είναι μηδέν στους κύριους άξονες. Μετά η μεγαλύτερη των κυρίων τάσεων σ_{I}, σ_{II} συγκρίνεται με την αντοχή του υλικού. Ο σχεδιασμός με κύριες τάσεις είναι πολύ διαδεδομένος στις μεταλλικές κατασκευές γιατί η αντοχή των ισότροπων υλικών δεν εξαρτάται από τη διεύθυνση. Αντίθετα, ο σχεδιασμός με κύριες τάσεις βρίσκει μικρή εφαρμογή στο σχεδιασμό των σύνθετων υλικών.

1.6 Περίληψη μεθόδων σχεδιασμού σύνθετων υλικών

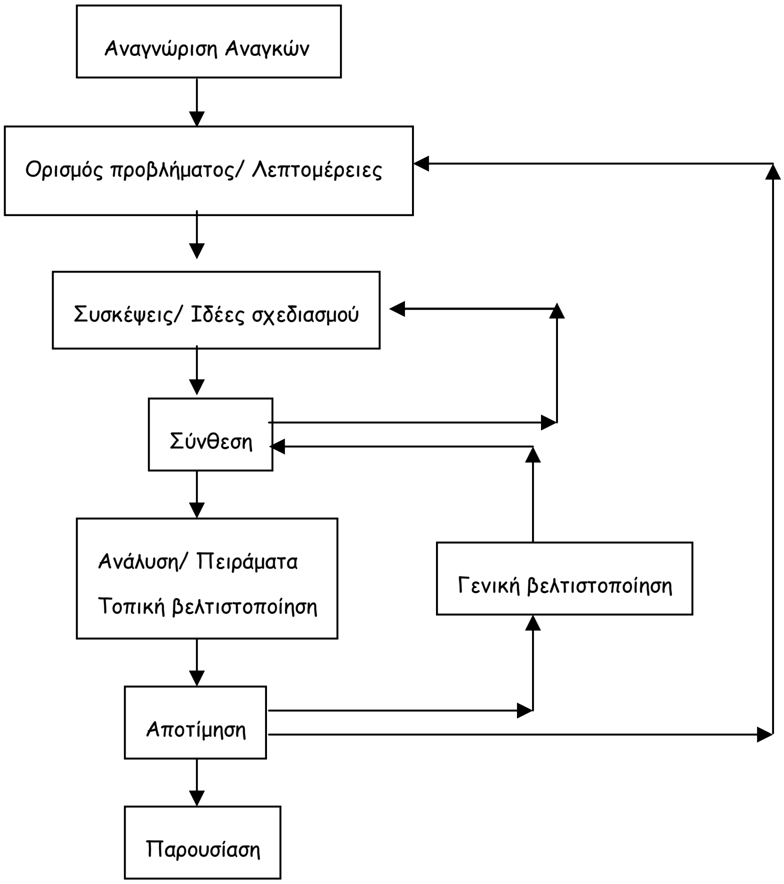
Τα σύνθετα υλικά σχηματίζονται από το συνδυασμό δύο ή περισσοτέρων επιμέρους υλικών με σκοπό το τελικό προϊόν να διαθέτει βελτιωμένες ιδιότητες (φυσικές, χημικές κλπ.) από αυτές των επιμέρους υλικών. Τα κύρια συστατικά των σύνθετων υλικών είναι οι ίνες και το συνδετικό υλικό. Οι ίνες παρέχουν την δυσκαμψία και αντοχή, ενώ το συνδετικό υλικό δεσμεύει τις ίνες και τις αναγκάζει να συνεργάζονται εξασφαλίζοντας τη μεταφορά φορτίων εντός του σύνθετου υλικού.

Ο σχεδιασμός ενός δομικού στοιχείου από σύνθετα υλικά περιλαμβάνει ταυτόχρονα το σχεδιασμό του υλικού και της κατασκευής. Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά (π.χ. χάλυβας), οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού μπορούν να σχεδιαστούν ταυτόχρονα με τις φάσεις κατασκευής. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών (π.χ. δυσκαμψία, θερμική διαστολή, κλπ.) μπορούν να ποικίλουν μέσα σε ένα ευρύ φάσμα τιμών κατά την κρίση του σχεδιαστή.

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 ενός υλικού, δεν είναι τόσο ακριβής στη πρόβλεψη της αντοχής. Παρόλα αυτά, πειραματικά δεδομένα για την αντοχή είναι πολύ σημαντικά στο σχεδιασμό. Για το λόγο αυτό, κατασκευαστές και εγχειρίδια στο χώρο των σύνθετων υλικών φροντίζουν να παραθέτουν τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών, τόσο από πλευράς των ινών όσο των συνδετικών υλικών. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι οι δεδομένες, γνωστές ιδιότητες ανταποκρίνονται σε αναρίθμητες διαφορετικές ενισχύσεις και ολοένα νεώτερες τεχνικές, οι οποίες κάνουν τη σύγκριση μεταξύ των προϊόντων πολύ δύσκολη. Τυπικές ιδιότητες σύνθετων υλικών με ίνες ενιαίου προσανατολισμού φαίνονται στον Πιν.1.1 βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας και των εγχειριδίων διαφόρων κατασκευαστών.

Ο σχεδιασμός των σύνθετων υλικών μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ιδιότητες όπως αυτές που δίνονται στον Πιν. 1.1, υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα για τους περισσότερους τύπους των ινών-συνδετικών υλικών, και συνδυασμούς που χρησιμοποιούνται σε μια διαστρωμάτωση. Εάν χρησιμοποιούνται ιδιότητες από πειραματικά αποτελέσματα για τα σύνθετα υλικά δεν απαιτείται η καταφυγή σε μοντέλα μικρομηχανικής. Επίσης, 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 συνδετικό υλικό. Συνήθως δεν είναι διαθέσιμες επαρκείς πειραματικές ιδιότητες των υλικών και του συνδυασμού ινών και συνδετικού υλικού που εξετάζονται. Στη συνέχεια η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μικρομηχανικής μπορεί να αξιολογηθεί κάνοντας μερικά επιλεγμένα πειράματα. Ο αριθμός των πειραμάτων καθορίζεται από το μέγεθος του έργου και τη διαθεσιμότητα των πηγών οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να παραταθούν μέχρι την τελική φάση.

Εφόσον οι ιδιότητες μίας μεμονωμένης στρώσης είναι γνωστές, οι ιδιότητες μιας διαστρωμάτωσης μπορεί να υπολογιστούν από το συνδυασμό των ιδιοτήτων 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. Σημειώνεται πάντως, ότι η επιρροή της αλλαγής του συνδετικού υλικού ή της κατασκευαστικής πορείας είναι άγνωστη και κάθε τέτοια αλλαγή απαιτεί επανάληψη εξ’ αρχής του πειραματικού προγράμματος. Το κόστος των πειραμάτων πιθανόν να περιορίζει τον αριθμό των διαστρωματώσεων για τις οποίες είναι διαθέσιμα διάφορα πληροφοριακά δεδομένα. Όταν οι ιδιότητες των διαστρωματώσεων δεν είναι διαθέσιμες από πειράματα, μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας τη μικρομηχανική και τη μακρομηχανική θεώρηση.



Σχ. 1.6: Διάγραμμα της διαδικασίας σχεδιασμού.

Πιν. 1.1 : Τυπικές ιδιότητες σύνθετων υλικών με ίνες ενιαίου προσανατολισμού.

Ιδιότητες	**E-glass/ Epoxy**	**S-glass/ Epoxy**	**E-glass/ Isophthalic Polyester**	**Kevlar 49/ Epoxy**	**Carbon/ Epoxy AS4/3501-6**	**Carbon/ Epoxy T800/3900-2**	**Carbon/ Epoxy IM7/8551-7**	**Carbon/ PEEK AS4/APC2**	**Carbon/ Polyamide AS4/Avimid K-III**
Πυκνότητα [g/cm^2]	2.076	1.993	1.85	1.380	1.58	-	-	1.6	-
Διάμηκες Μέτρο Ελαστικότητας E_1 [GPa]	45	55	37.9	75.8	142	155.8	151	138	110
Εγκάρσιο Μέτρο Ελαστικότητας E_2 [GPa]	12	16	11.3	5.5	10.3	8.89	9.0	10.2	8.3
Μέτρο Διάτμησης G_{12} [GPa]	5.5	7.6	3.3	2.07	7.2	5.14	5.6	5.7	-
Λόγος Poisson ν_{12}	0.19	0.28	0.3	0.34	0.27	0.3	0.3	0.3	-
Διαμήκης Εφελκυστική Αντοχή F_{1t} [MPa]	1020	1620	903	1380.0	1830	2698	-	2070	-
Εγκάρσια Εφελκυστική Αντοχή F_{2t} [MPa]	40	40	40	34.5	57	-	-	86	37
Διατμητική Αντοχή F_6 [MPa]	60	60	40	44.1	71	-	-	186	63
Διαμήκης Θλιπτική Αντοχή F_{1c} [MPa]	620	690	357	586.0	1096	1691	-	1360	1000
Εγκάρσια Θλιπτική Αντοχή F_{2c} [MPa]	140	140	68	138.0	228	-	-	-	-
Εγκάρσια Διατμητική Αντοχή (F_4 ή F_5) [MPa]	60	80	76	48.69	-	-	-	150	-
Διαμήκης Εφελκυστική Παραμόρφωση ε_{1t} [%]	2.3	2.9	2.4	1.8	1.29	1.68	1.64	1.45	-
Διαμήκης θερμ. CTE α_1 [10^{-6}/^{o}C]	3.7	3.5	6.5	-2.0	-0.9	-	-	0.5	-
Εγκάρσια θερμ. CTE α_2 [10^{-6}/^{o}C]	30	32	22	60	27	-	-	30	-
Διαμήκης υγρασιακή σταθερά β_1	0	0	0	0.01	0	0.0095	-	-	-
Εγκάρσια υγρασιακή σταθερά β_2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.321	-	-	-
Λόγος όγκου ινών V_f [%]	60	60	50	60	60	-	57.3	61	-
Λόγος όγκου κενών V_v [%]	-	-	2.0	-	-	-	0.1	-	0.5
Απόκλιση ευθυγραμμίας ινών Ω [deg]	-	-	3.53	-	-	-	-	-	-

Πιν. 1.2 : Ιδιότητες διαστρωματώσεων από πολυεστερικές ρητίνες ενισχυμένες με συνεχείς ίνες E-glass.

Ονομασία	**Ιδιότητα**	**Προσανατολισμός 0°**			**Προσανατολισμός 45°**				
		Αντοχή F_x [MPa]	**Μέτρο Ελαστικότητας E_x [MPa]**	**Αντοχή/ Πυκνότητα [Nm/g]**	**Αντοχή F_{45} [Mpa]**	**Μέτρο Ελαστικότητας E_{45} [MPa]**	**V_f [%]**	**Πάχος Διαστρωμάτωσης [mm]**	**Πυκνότητα g/cm^2**
M1500	Εφελκυσμός	128		89.995	128	6752			
[CSM]	Θλίψη	179	7303	125.852	179	7303			
	Κάμψη	212	6960	149.054	212	6960			
	Διάτμηση	24.8		17.437	24.8		17.1	1.041	1.4223
CM1808	Εφελκυσμός	201	13780	130.030					
[CSM/0/90]	Θλίψη	187	11713	120.973					
	Κάμψη	310	13091	200.453					
	Διάτμηση	20.3		13.132			26.6	1.219	1.5458
TVM 3408	Εφελκυσμός	229	15502	139.244	214	14469			
[CSM/±45/0]	Θλίψη	262	17914	159.309	250	17914			
	Κάμψη	386	16536	234.708	351	15158			
	Διάτμηση	24.1		14.654	22.7		34.2	1.727	1.6446
XM 2408	Εφελκυσμός	98	10680	58.299	236	15158			
[CSM/±45]	Θλίψη	228	15158	135.634	262	22392			
	Κάμψη	222	10335	132.064	400	16536			
	Διάτμηση	24.4		14.515	28.8		37.0	1.422	1.6810
UM 1608	Εφελκυσμός	214	12746	134.701					
[CSM/0]	Θλίψη	228	13091	143.514					
	Κάμψη	310	13091	195.128					
	Διάτμηση	25.5		16.051			29.9	1.143	1.5887

2. Επιμέρους υλικά

2.1 Ίνες

Οι ίνες χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά γιατί έχουν μικρό βάρος, είναι πιο δύσκαμπτες και έχουν μεγάλη αντοχή. Οι ίνες είναι πιο ισχυρές από το συμπαγές ακατέργαστο υλικό απ'το οποίο αποτελούνται. Αυτό οφείλεται στην προνομιακή κατεύθυνση των μορίων κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών και λόγω του μειωμένου πλήθους ατελειών που παρουσιάζονται σε μια ίνα, πράγμα αντίθετο με αυτό που συμβαίνει στο ακατέργαστο υλικό. Ενώ η εφελκυστική αντοχή του ακατέργαστου E-glass είναι σχετικά μικρή (1,5-5,8 GPa), το ίδιο υλικό φθάνει ως και τα 72,3 GPa υπό μορφή ίνας, κυρίως γιατί υπάρχει μείωση στον αριθμό, το μέγεθος και την επιφάνεια των ατελειών.

Οι ίνες χρησιμοποιούνται ως οπλισμός στα σύνθετα υλικά με ενιαίο προσανατολισμό, όπου ένας μεγάλος αριθμός ινών ευθυγραμμίζονται μέσα στο μικρό πάχος ενός μικρού κελύφους ή πλάκας που ονομάζεται στρώση ή φύλλο. Μια 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. Μια 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.

Οι ιδιότητες ερπυσμού των σύνθετων υλικών οφείλονται κυρίως στο συνδετικό υλικό. Τα σύνθετα υλικά που ενισχύονται με κοντές ίνες (*chopped fibers, whiskers*) ή σωματίδια μπορούν να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις ακόμα και σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας. Αυτός είναι ο κύριος λόγος της χρήσης των συνεχών ινών στις εφαρμογές των κατασκευών. Επιλέγοντας ίνες (από άνθρακα ή γυαλί), με πολύ μικρές παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού, τα σύνθετα υλικά με πολυμερή συνδετικά (PMC) μπορούν να καταστούν αρκετά ανθεκτικά έναντι ερπυσμού.

2.1.1 Τύποι ινών

Οι πλέον συνήθεις ίνες που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά είναι από γυαλί, άνθρακα, οργανικές (*Kevlar*), βόριο, Silicon Carbide (SiC), αλουμίνιο και άλλα υλικά σε πλέον εξειδικευμένες εφαρμογές. Η επιλογή του τύπου της ίνας που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τις επιθυμητές μηχανικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες καθώς και το κόστος αυτής.

ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ: οι ίνες γυαλιού παρουσιάζουν 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 (*E=electrical=Ηλεκτρικές*) χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις για υψηλή εφελκυστική τάση και καλή χημική αντοχή. Οι ίνες E-glass είναι το είδος ενίσχυσης που προτιμάται επειδή συνδυάζει μηχανική απόδοση, αντοχή στη διάβρωση και μικρό κόστος (περίπου $16/Kg). Οι ίνες S-glass και S-2-glass (*S=strength=Αντοχή*) έχουν υψηλότερη αντοχή, αλλά είναι περιορισμένης εφαρμογής επειδή κοστίζουν 3 έως 4 φορές περισσότερο από τις ίνες E-glass. Για το λόγο αυτό, ορισμένες ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα) χαμηλού κόστους θεωρούνται εναλλακτική λύση στις ίνες S-glass και S-2-glass. Οι ίνες C-glass (*C=corrosion=Διάβρωση*) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με ιδιαίτερες απαιτήσεις για αντοχή σε διάβρωση. Οι ίνες D-glass (*D=dielectric=Διηλεκτρικό*) χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές εφαρμογές, όπως για ενισχύσεις καλωδίων σε υψηλής τάσης μονωτικά και κεραμικά. Οι ίνες A-glass και AR-glass (*Alkaline Resistant=Αλκαλική αντοχή*) χρησιμοποιούνται σε επιφάνειες μεμβρανών ή συνδετικών υλικών με μικρό βάρος και οι ίνες R-glass χρησιμοποιούνται μερικές φορές στις διαδικασίες περιέλιξης (*filament winding*) και *sheet molding compounds* .

Η μέγιστη αντοχή που έχει μετρηθεί σε δοκιμές μίας ίνας (κατά ASTM D3379) μπορεί να φθάσει έως 3,5 GPa για ίνες E-glass και 4,8 GPa για ίνες S-glass, αλλά οι τιμές αυτές δεν μπορούν να επιτευχθούν σε ένα σύνθετο υλικό. Οι φθορές που επέρχονται κατά την πορεία των διαφόρων φάσεων παραγωγής μειώνει τη αντοχή της ίνας περίπου στα 1,75 GPa για ίνες E-glass και 2,1 GPa για ίνες S-glass (σχεδόν 50% μείωση, η οποία οφείλεται κυρίως στις συνθήκες και το είδος των φορτίων). Η μείωση της αντοχής των ινών στο σύνθετο υλικό οφείλεται μεταξύ άλλων και σε παραμένουσες τάσεις καθώς και σε δευτερογενή φορτία (διατμητικά και εγκάρσια στην διεύθυνση των ινών). Η τυπική μείωση της αντοχής της ίνας κατά τη διαδικασία περιέλιξης φαίνεται στον Πιν. 2.2.

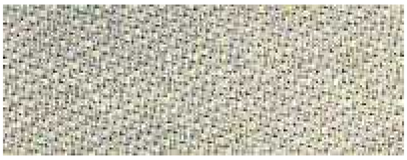
Η αντοχή των ινών σε διάβρωση εξαρτάται από τη σύνθεση της ίνας, το διαβρωτικό διάλυμα και το χρόνο έκθεσης. Η εφελκυστική αντοχή των ινών γυαλιού, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για ένα εύρος τιμών θερμοκρασιών όπου τα πολυμερή συνδετικά υλικά μπορούν να εκτεθούν (έως 275^{o}C ανάλογα με το είδος του συνδετικού υλικού). Η εφελκυστική αντοχή μειώνεται επίσης με τη δράση δυναμικών φορτίων. Το αποτέλεσμα αυτό ονομάζεται στατική κόπωση ή τάση αποδυνάμωσης (*static fatigue ή stress corrosion*). Στο σχεδιασμό σύνθετων υλικών με ενισχύσεις από γυαλί χρησιμοποιείται ένας λόγος τάσεων (παρόμοιος με τον συντελεστή ασφαλείας) με τιμή περίπου 3,5 σε συσκευή πίεσης υπό σταθερό φορτίο. Οι διάμετροι των ινών γυαλιού κυμαίνονται μεταξύ 9,5 – 24,77 microns και διακρίνονται με ένα κωδικό γράμμα.

(a) Μικροσωματίδια γυαλιού

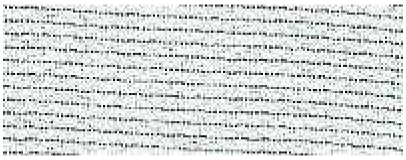
(b) Κοντές ίνες γυαλιού 1/4''

(c) Κοντές ίνες γυαλιού 1/32''

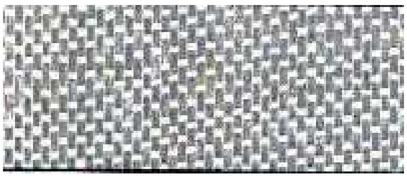
(d) Κοντές ίνες γυαλιού 1/16''



(e) E-Glass τύπος 7781



(f) E-Glass τύπος 120



(g) Ίνες E-Glass ενιαίου προσανατολισμού πλέξης

(h) Ίνες E-Glass σταυροειδούς

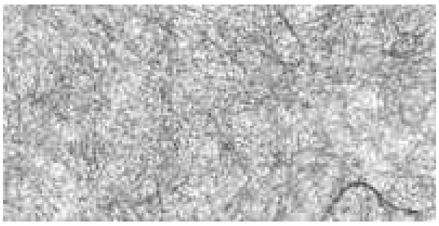
ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ: οι ίνες άνθρακα (επίσης ονομαζόμενες ανθρακονήματα ή ίνες γραφίτη) έχουν μικρό βάρος και είναι ισχυρές, με εξαιρετική χημική αντοχή. Επικρατούν στο χώρο της αεροδιαστημικής. Σε αντίθεση με τις ίνες γυαλιού, οι ίνες άνθρακα είναι διαθέσιμες σε ένα μεγάλο εύρος τιμών δυσκαμψίας (Πιν 2.1). Οι ιδιότητές τους εξαρτώνται από το ακατέργαστο υλικό και την πορεία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους. Δύο βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι τα polyacrylonitrile (PAN) και pitch (*πίσσα*). Οι ίνες πίσσας είναι λιγότερο ακριβές αλλά έχουν μικρότερη αντοχή από τις ίνες PAN. Οι ίνες PAN επικρατούν, με υψηλή απόδοση, στις αεροδιαστημικές εφαρμογές γιατί μπορούν να κατασκευάζονται με ποικίλες τιμές δυσκαμψίας και αντοχής, όπως φαίνεται στον Πιν. 2.1.

Η ταξινόμηση των ινών άνθρακα γίνεται συνήθως βάσει της δυσκαμψίας και της αντοχής τους, αλλά κατασκευαστικά είναι δυνατόν να δημιουργηθεί οποιοδήποτε συνδυασμός δυσκαμψίας και αντοχής. Σύμφωνα με τον Πιν. 2.1, οι ίνες T300, AS2 και AS4D θεωρούνται υψηλής δυσκαμψίας (*HS=High Stiffness*) ίνες, οι IM6 είναι μεσαίου μέτρου ελαστικότητας (*IM=Intermediate Modulus*), οι HMS4 είναι υψηλού μέτρου ελαστικότητας (*HM=High Modulus*) και οι M50 είναι πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας (*UHM=Ultra High Modulus*), παρόλο που οι αντίστοιχες ίνες με βάση την πίσσα P100 έχουν ακόμα υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας. Ένα πλεονέκτημα για την χρήση των ινών HM είναι η κατασκευή σύνθετων υλικών που μοιάζουν με χάλυβα ή αλουμίνιο, έτσι ώστε ένα μεταλλικό τμήμα μιας κατασκευής να μπορεί να αντικατασταθεί από ένα τμήμα σύνθετου υλικού με μικρότερο βάρος. Π.χ. ένα σύνθετο υλικό M50 με λόγο όγκου ινών 50% θα έχει περίπου την ίδια δυσκαμψία με τον χάλυβα αλλά το 1/4 του βάρους. Πάντως, αντικατάσταση από σύνθετα υλικά μιας κατασκευής η οποία είχε αρχικά σχεδιαστεί μεταλλική οδηγεί σχεδόν πάντα σε ανεπαρκή σχεδιασμό του τμήματος του σύνθετου υλικού. Ένα πιο αποτελεσματικό κίνητρο για τη χρήση HM ινών είναι να αυξηθεί ο λόγος ακαμψίας προς το βάρος κατασκευής όπως στα τηλεσκόπια του διαστήματος, όπου τόσο το βάρος όσο και οι παραμορφώσεις είναι κρίσιμα στο σχεδιασμό.

Η μεγαλύτερη θερμοκρασία χειρισμού των ινών άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 315-537°C, αλλά μπορεί να περιοριστεί περαιτέρω από τη θερμοκρασία χειρισμού του συνδετικού υλικού, όπως στη περίπτωση των PMC. Οι ίνες άνθρακα όντας πιο άκαμπτες από τις ίνες γυαλιού, παρέχουν καλύτερα χαρακτηριστικά κόπωσης στο σύνθετο υλικό μειώνοντας την παραμόρφωση στο πολυμερές συνδετικό υλικό για δεδομένο φορτίο. Επίσης, το φαινόμενο της στατικής κόπωσης παρατηρείται σπανιότερα στις ίνες άνθρακα. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τη χρήση μικρότερου λόγου τάσεων από ότι στο γυαλί (2,25 έναντι 3,5) στο σχεδιασμό των δοκιμίων που υφίστανται πίεση υπό μόνιμη φόρτιση. Οι ίνες αυτές είναι καλοί αγωγοί ρεύματος, γι' αυτό και προκαλείται διάβρωση (τύπου γαλβανισμού) εάν σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα έρθουν σε επαφή με μέταλλα. Για το λόγο αυτό, πρέπει να τεθεί ένα μονωτικό υλικό (*insulating barrier*) μεταξύ των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα και των μεταλλικών τμημάτων όταν αυτά βρίσκονται στην ίδια κατασκευή. Αυτό συνήθως κατορθώνεται προσθέτοντας μία στρώση (πάχους περίπου 0,5mm) από συνδετικό υλικό με ίνες γυαλιού.

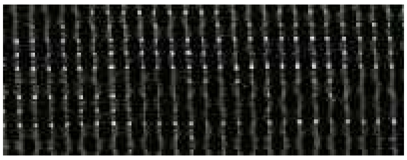
Ο σημαντικότερος περιορισμός στη χρήση των ινών άνθρακα είναι το κόστος. Γενικά, το κόστος των ινών άνθρακα HS (πάνω από $20/Kg) μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς η οικονομία σε βάρος προσφέρει μεγάλη απόδοση, όπως στις εφαρμογές της αεροδιαστημικής, ή όταν απαιτείται υψηλή θερμοκρασιακή μόνωση, αντοχή σε διάβρωση και βελτιωμένο όριο διαρροής ή εάν μεγάλο χρονικό διάστημα διατήρησης της αντοχής είναι καθοριστικό για την προκείμενη εφαρμογή. Οι ίνες άνθρακα είναι ελαφρύτερες και πιο άκαμπτες από τις ίνες γυαλιού, αλλά δεν έχουν το οικονομικό πλεονέκτημα όταν τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για να υποκαταστήσουν ένα συμβατικό υλικό όπως ο χάλυβας στις κατασκευές όπου το βάρος δεν είναι κρίσιμο. Περαιτέρω μείωση του κόστους επιτυγχάνεται με ένωση τμημάτων και μείωση συναρμογών, αλλά αυτά είναι συνήθως ανεξάρτητα από τον τύπο των ινών. Το υψηλό κόστος των ινών άνθρακα δικαιολογείται καλύτερα από το ότι το υλικό χρησιμοποιείται σαν ενισχυτικό υλικό παρά σαν υποκατάστατο υλικό. Το ενισχυτικό υλικό επιτρέπει στην κατασκευή να επιτευχθεί η αποστολή που δεν είναι δυνατή με άλλα υλικά. Πάντως στο σύνολο των εφαρμογών είναι πιο πιθανό να χρησιμοποιηθεί ως εφαρμογή υποκατάστασης, όπου ο σχεδιαστής προτείνει να χρησιμοποιήσει σύνθετα υλικά για να πετύχει βασικά την ίδια αποστολή, η οποία στην παρούσα φάση επιτυγχάνεται με συμβατικά υλικά. Στην τελευταία περίπτωση, το τελικό κόστος του προϊόντος γίνεται υψίστης σημασίας

.

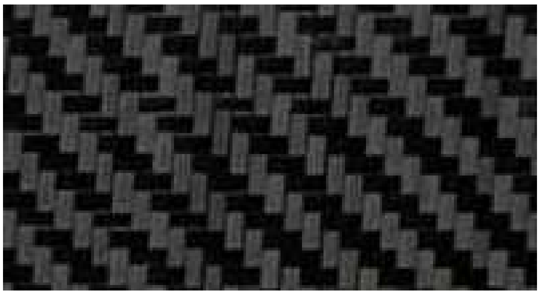


(a) Graphite veil

(b) Weave Graphite Fabric (6K, 5HS)



(c) Plain Weave Graphite Fabric (3K)



(d) Twill Weave Graphite Fabric (3K, 2x2)

(e) Ταινίες γραφίτη

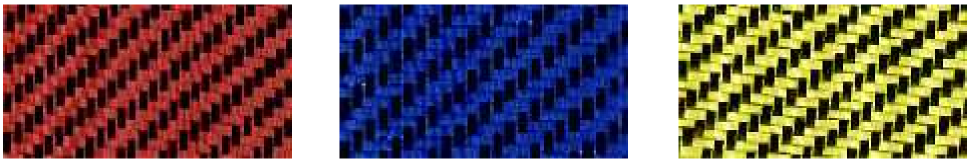
(f) Ίνες γραφίτη

<u>ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΙΝΕΣ:</u> οι πιο γνωστές απ’ τις οργανικές είναι οι ίνες αραμιδίου (*aramid*), που παράγονται από τις DuPont, Teijin, Akzo Nobel υπό τις εμπορικές ονομασίες Kevlar, Technora και Twaron. Οι ίνες αραμιδίου (*aramid*) έχουν υψηλή απορροφητικότητα ενέργειας κατά την αστοχία, το οποίο τις κάνει ιδανικές για την προστασία έναντι πρόσκρουσης και βαλλιστικών ενεργειών. Λόγω της μικρής πυκνότητάς τους, δίνουν υψηλό λόγο εφελκυστικής αντοχής ως προς το βάρος και υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας ως προς το βάρος, τα οποία τις κάνουν πολύ ελκυστικές για χρήση σε αεροσκάφη και θωρακίσεις των σκελετών τους. Επειδή οι ίνες αραμιδίου (*aramid*) είναι φτιαγμένες από πολυμερές υλικό, έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα πολυμερή συνδετικά υλικά. Έχουν μικρή θλιπτική αντοχή, υφίστανται ερπυσμό, απορροφούν υγρασία και είναι ευαίσθητες στην ηλιακή ακτινοβολία (UV). Επίσης, οι μηχανικές ιδιότητες ποικίλουν με τη θερμοκρασία, με την εφελκυστική αντοχή σε θερμοκρασία 177^oC να μειώνεται στο 75-80% της τιμής αυτής σε κανονικές συνθήκες. Διάφοροι τύποι τέτοιων ινών έχουν και διαφορετικές ιδιότητες, με το Kevlar 49 να είναι το πιο σύνηθες.

Οι ίνες πολυεθυλενίου (*polyethylene*) έχουν μικρότερη απορροφητικότητα σε υγρασία και μικρότερη πυκνότητα από το Kevlar49 αλλά και μικρότερη μέγιστη θερμοκρασίας χειρισμού (120_oC). Είναι πλέον ελκυστικές στην κατασκευή πλαστικών επικαλυμμάτων ραντάρ αεροσκαφών διότι είναι πολύ διαπερατές σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τυχόν λανθασμένη εφαρμογή σε τμήματα κατασκευών είναι περιορισμένη λόγω της χαμηλής τιμής μέγιστης θερμοκρασίας χειρισμού τους.

(a) Kevlar veil **(b)** Kevlar pulp **(c)** Kevlar fabric

(d) Kevlar Tapes **(e)** Kevlar/Carbon Hybrid Tapes



(f) Kevlar/Carbon Hybrid Tapes (red, blue, yellow)

<u>ΛΟΙΠΕΣ ΙΝΕΣ:</u> η υψηλή ακαμψία, η υψηλή αντοχή και η μικρή πυκνότητα χαρακτηρίζουν τις ίνες βορίου (*boron*). Είναι αξιοσημείωτη η χρήση τους ως ενισχύσεις στην αεροδιαστημική και σε αθλητικά είδη. Λόγω του μικρού ρυθμού παραγωγής οι ίνες βορίου είναι ανάμεσα στις πλέον ασύμφορες οικονομικά ίνες που φτιάχνονται σήμερα (κοστίζουν περίπου $2.000/Kg ανάλογα τον τύπο, την ποσότητα των ινών και άλλους παράγοντες).

Οι ίνες από Silicon Carbide (SiC) παράγονται όπως οι ίνες βορίου σε αντικατάσταση του άνθρακα. Οι ίνες SiC έχουν καλύτερη εφαρμογή ως ενισχύσεις μεταλλικών συνδετικών υλικών όπως το τιτάνιο, αλλά χρησιμοποιούνται επίσης σε συνδυασμό με ρητίνες πολυμερών. Όπως οι ίνες βορίου, οι ίνες SiC χαρακτηρίζονται από υψηλή ακαμψία και αντοχή αλλά παρουσιάζουν υψηλότερη θερμοκρασιακή μόνωση. Λόγω της περιορισμένης χρήσης και των μικρών ποσοτήτων παραγωγής, το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό.

Οι κεραμικές ίνες βασίζονται σε οξείδια μετάλλων, όπως του αλουμινίου (Al_2O_3), *alumina silicate* και *alumina silica* . Οι ίνες αλουμινίου έχουν υψηλό όγκο διαθεσιμότητας και σχετικά μικρό κόστος ($200/Kg έως $1.100/Kg ανάλογα με τον τύπο των ινών, το μέγεθος της κοντής ίνας (*tow*) και την ποσότητα). Οι κεραμικές ίνες συνεισφέρουν στο να κρατηθεί η αντοχή των μεταλλικών συνδετικών υλικών στα σύνθετα υλικά σε υψηλά επίπεδα για υψηλές θερμοκρασίες, όπου προκύπτουν αλλοιώσεις στις ιδιότητες των μετάλλων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν στην ενίσχυση εμβόλων πετρελαίου.

Thixotropic Silica

Διαρκώς προκύπτουν ή βελτιώνονται διάφορες νέες ποικιλίες ινών. Η διάδοση των νέων προϊόντων ινών στην αγορά των κατασκευαστικών εφαρμογών είναι αργή λόγω του μεγάλου αριθμού των δοκιμών χαρακτηρισμού που απαιτούνται για τη εξασφάλιση της ασφάλειας και τις επιδράσεις της εφαρμογής υπό διάφορες συνθήκες. Ενώ οι υψηλοί λόγοι τάσης προς βάρος και ακαμψίας προς βάρος, είναι πλεονεκτήματα για εφαρμογές αεροδιαστημικής, άλλα χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών που μπορούν να παραχθούν μ' αυτές τις ίνες είναι πιθανόν να περιορίζουν την εφαρμογή τους. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, υψηλή θερμοκρασία χειρισμού και η εγκάρσια και διατμητική αντοχή, είναι κάποιοι από τους περιοριστικούς παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν για κάθε νέο υλικό ινών.

ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΙΝΩΝ – ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ: οι περισσότερες ίνες καλύπτονται με ένα υλικό που ονομάζεται *sizing*. Οι ίνες υφίστανται αξιοσημείωτη ζημιά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής (τριβή μεταξύ τους και με τον εξοπλισμό). Το *sizing* βοηθά στην προστασία της ίνας λειτουργώντας ως λιπαντικό - αντιστατικό μέσο και βοηθά ένα σύνολο (*bundle*) από ίνες να ενωθούν ως μία μονάδα. Επιπλέον, το *sizing* συνεργάζεται με ένα μέσο σύνδεσης (*coupling agent*) που το αποτρέπει να ενωθεί με το συνδετικό υλικό. Παρόλα αυτά, η ίδια ίνα μπορεί να απαιτεί διαφορετικό sizing, που εξαρτάται από τον τύπο του πολυμερούς που χρησιμοποιείται ως συνδετικό μέσο. Η ενδοστρωματική αντοχή του σύνθετου υλικού παρέχει μια ένδειξη της ποιότητας της συνάφειας της ίνας με το συνδετικό υλικό. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία οι δοκιμές ενδοστρωματικής διατμητικής αντοχής κατά ASTM D2344, D2344, D4475 και D3914 για την αποτίμηση της συμβατότητας μεταξύ των ινών και του συνδετικού υλικού, που εξαρτάται περισσότερο από το sizing της ίνας. Το sizing επίσης επιτρέπει την προστασία της ίνας από την προσβολή υγρασίας κατά τη διάρκεια ζωής (*service life*) του σύνθετου υλικού. Όταν η υγρασία έρθει σε επαφή με την επιφάνεια των ινών γυαλιού μπορεί να διηθηθεί σε μερικά από τα χημικά συστατικά του γυαλιού, αφήνοντας μία επιφάνεια με πόρους. Οι πόροι στη συνέχεια αποτελούν αίτιο δραστικής μείωσης της αντοχής των ινών.

2.1.2 Μορφές ινών

Οι περισσότερες ίνες μπορούν να διατεθούν υπό μορφή προκατασκευασμένης ταινίας *prepreg*, όπου οι ίνες συγκρατούνται μαζί από εποξειδική ρητίνη και fiberglass backing. Επειδή η δημιουργία της ταινίας *prepreg* συνιστά πρόσθετο κόπο, το κόστος της είναι συνήθως 75-100% υψηλότερο από το κόστος της ίνας. Στο επόμενο κεφάλαιο, οι κατασκευαστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν ταινία *prepreg* είναι αργές και απαιτούν λεπτεπίλεπτη εργασία. Παρόλα αυτά, οι περισσότερες νέες εφαρμογές των σύνθετων υλικών χρησιμοποιούν ίνες στις πλέον απλές αλλά δυσεύρετες μορφές τους. Π.χ. η διαδικασία περιέλιξης και η διαδικασία παραγωγής με έλξη, χρησιμοποιούν δέσμες ινών (roving, tow) και ρητίνες για την παραγωγή του τελικού προϊόντος χωρίς ενδιάμεσους χειρισμούς. Τα *Woven stitched fabrics* διευκολύνουν την κατασκευή των διαστρωματώσεων με *Resin Transfer Molding* (RTM) και άλλες διαδικασίες, ενώ αυξάνουν το κόστος της ενίσχυσης μόνο κατά 20-40%.

ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΚΑΙ ΑΣΥΝΕΧΕΙΣ ΙΝΕΣ: τα σύνθετα υλικά είναι οπλισμένα είτε με συνεχείς ή με ασυνεχείς ίνες ή σωματίδια. Οι συνεχείς είναι επιμήκεις ίνες, οι οποίες συνήθως επιτυχάνουν υψηλές τιμές των ιδιοτήτων όπως της αντοχής και της ακαμψίας λόγω της ελεγχόμενης ανισοτροπίας και του μικρού αριθμού - μεγέθους της επιφάνειας των ατελειών. Στα σύνθετα υλικά με ενισχύσεις από συνεχείς ίνες, το φορτίο θεωρείται ότι παραλαμβάνεται κυρίως από τις ίνες των οποίων η διεύθυνση είναι παράλληλη με αυτή του φορτίου. Οι συνεχείς ίνες έρχονται συσκευασμένες σε διάφορες μορφές που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Οι ασυνεχείς ίνες είναι κοντές, και προκύπτουν από συνεχείς ίνες με κοπή ή κατασκευάζονται απ' ευθείας κοντές με σκοπό τη μείωση του κόστους. Στις λοιπές μορφές κοντών ινών συμπεριλαμβάνονται τα *whiskers* και οι ίνες *milled*. Τα *whiskers* είναι επιμήκης μονοί κρύσταλλοι με πολύ μεγάλη αντοχή. Ο λόγος διαστάσεών τους (*aspect ratio*) μήκος προς διάμετρο L/D επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Ο προσανατολισμός των κοντών ινών δεν μπορεί να διαχειριστεί εύκολα και βασικά υποτίθεται ότι είναι τυχαίος, εκτός αν έχουν γίνει ειδικές προβλέψεις για το χειρισμό του προσανατολισμού της ίνας. Τα σύνθετα υλικά με κοντές ίνες τυχαίου προσανατολισμού έχουν περίπου ισότροπες ιδιότητες στο επίπεδο της διαστρωμάτωσης. Τα κύρια μειονεκτήματα σε κατασκευαστικές εφαρμογές είναι ότι τα σύνθετα υλικά με κοντές ίνες δεν ελαττώνουν την παραμόρφωση των πολυμερών συνδετικών υλικών τόσο αποτελεσματικά όσο οι συνεχείς ίνες. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά με κοντές ίνες έχουν συνήθως μικρότερη αντοχή από αυτά με τις συνεχείς.

<u>ΔΕΣΜΕΣ ΙΝΩΝ (Strand, tow, end, yarn και roving):</u> μία δέσμη ινών όπως *strand, tow, end,* είναι ένα σύνολο μη πλεγμένων / περιτυλιγμένων συνεχών ινών (*untwisted bundle of continuous filaments)* που θεωρείται ως ενιαίο. Όλες οι ίνες στη δέσμη παράγονται ταυτόχρονα, από ένα μόνο κλίβανο (furnace) και κλώθονται μαζί. Το *yarn* είναι μία δέσμη πλεγμένων ινών. Το *roving* είναι μία δέσμη από παράλληλες συνεχείς δέσμες. Τα *rovings* παράγονται με την περιέλιξη ενός αριθμού μεμονωμένων δεσμών ινών απαιτούνται για να επιτευχθεί το επιθυμητό *yield*. Το *yield* είναι το μήκος της δέσμης ινών αναφορικά με μία μονάδα βάρους συσκευασίας. Η πιο συνήθης μονάδα μέτρησης του *yield* είναι γιάρδες ανά λίμπρα (yd/lb). Η μονάδα μέτρησης ονομάζεται TEX και δίνεται σε g/Km. Το TEX είναι το βάρος σε γραμμάρια ανά 1000 μέτρα δέσμης. Για το λόγο αυτό το TEX είναι αντιστρόφως ανάλογο του yield δηλ.

$$\mathbf{TEX}\,[g/Km] = \mathbf{496{,}238/\ YIELD}[yd/lb] \qquad (2.1)$$

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή TEX μίας δέσμης *roving* τόσο μεγαλύτερη είναι η διατομή (*cross-sectional area*) που καλύπτουν οι ίνες. Αυτό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{A}\,[cm^2] = \mathbf{10^{-5} * TEX}\,[g/Km]\ \mathbf{/}\ \boldsymbol{\rho_f}\,[g/cm^3] \qquad (2.2)$$

όπου $\boldsymbol{\rho_f}$ είναι η πυκνότητα των ινών. Το εμβαδόν της επιφάνειας της δέσμης *roving* είναι χρήσιμο για τον υπολογισμό του κλάσματος όγκου ινών των σύνθετων υλικών.

Μια *direct-draw roving* περιτυλίγεται γύρω από ένα καρούλι (*spool*) απευθείας από την κάμινο με τον επιθυμητό αριθμό *strands* ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός *yield*. Μια *indirect-draw roving* αποκτά μορφή με έναν δευτερογενή χειρισμό για την αύξηση του *yield* περιτυλίγοντας αρκετές *direct-draw rovings* σε μία. Σε κάθε *roving* οι ίνες που είναι περιτυλιγμένες στο εξωτερικό ενός καρουλιού είναι πιο μακριές από αυτές στο εσωτερικό. Όταν η *roving* ξετυλίγεται για την κατασκευή του σύνθετου υλικού, δεν έχουν όλες οι ίνες το ίδιο μήκος. Οι *rovings* χρησιμοποιούνται απευθείας στις διαδικασίες περιέλιξης και παραγωγής με έλξη χωρίς ενδιάμεσους χειρισμούς, επιπλέον μειώνουν το κόστος του τελικού τμήματος. Οι κοινές *fiberglass rovings* έχουν τιμές *yields* μεταξύ 56 και 250 yd/lb (*TEX* μεταξύ 8861 και 1985 g/km). Οι ίνες άνθρακα συνήθως συσκευάζονται σε δέσμες των 3K έως 36K (*TEX* 198 έως 2290).

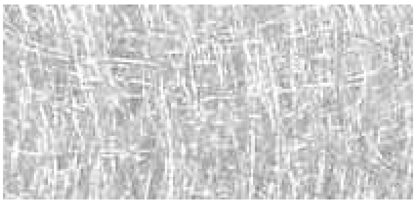
<u>ΔΕΣΜΕΣ ΙΝΩΝ (mat, fabric και veil):</u> Το *mat* σχηματίζεται από τυχαίου προσανατολισμού κοντές ίνες (*chopped strand mat*), ή *swirled filaments* (*continuous strand mat, CSM*) χαλαρά συγκρατημένες με ένα μικρό ποσό συγκολλητικού (*binder*). Το *veil* είναι λεπτό *mat* που χρησιμοποιείται σαν μία επιφανειακή στρώση για τη βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση του σύνθετου υλικού. Τα *veils* και *mats* έχουν τυχαία προσανατολισμένες ίνες σε κάθε διεύθυνση, που οδηγεί σε ισότροπες ιδιότητες στο σύνθετο υλικό.

Ενώ τα *rovings* και *tows* παρέχουν ενίσχυση σε μία διεύθυνση, το ύφασμα (*fabric)* παρέχει ενίσχυση σε δύο διευθύνσεις. Τα πλεκτά υφάσματα (*woven fabric)* φτιάχνονται με παρέμβαση (*interloping/ knitting*) αλλά κυρίως με συνύφανση *(interlacing weaving*) των *yarns*. Οι ίνες στα μη πλεκτά υφάσματα (*nonwoven fabrics*) φτιάχνονται απευθείας από δέσμες ινών *strands* χωρίς την ενδιάμεση μετατροπή τους σε *yarns*. Για το λόγο αυτό τίθεται ένα θέμα εάν τα πλεκτά υφάσματα (*woven fabrics)* υφίστανται μεγαλύτερη ζημιά στις ίνες λόγω της μεγαλύτερης επεξεργασίας αυτών. Τα μη πλεκτά υφάσματα (*nonwoven fabrics*) πρέπει να ενώνονται με ένα συγκολλητικό (*binder*) ή να κολλιούνται σε ένα *mat* ως υποστήριξη (*backing*) ή μεταξύ τους χωρίς υποστήριξη (*backing*). Κοντές ίνες (*chopped strand mats*) λιγότερο ακριβών ινών χρησιμοποιούνται συνήθως ως υλικά υποστήριξης (π.χ. ίνες άνθρακα κολλιούνται σε κοντές ίνες *fiberglass*) αλλά κάθε συνδυασμός *backing* και μη πλεκτά υφάσματα (*nonwoven fabrics*), που παρέχει τον επιθυμητό συμβιβασμό μεταξύ κόστους και απόδοσης είναι πιθανός. *Stitched* *nonwoven fabrics* μπορούν να μετατραπούν σε πολύ βαριά υφάσματα (*fabrics)*, επιπλέον μειώνουν το χρόνο και το κόστος της διαδικασίας των σύνθετων υλικών και μπορούν επαρκώς να εμποτιστούν με ρητίνη. Υφάσματα με ισορροπία (*balanced*) μεταξύ των στρώσεων με διάφορο προσανατολισμό κατά μήκος «*off-axis*» (π.χ. ±θ, δηλ. δέσμες με ίσες ποσότητες +θ και -θ), είναι οι πλέον συνήθεις περιπτώσεις. Έτσι παράγονται ιδιαίτερα ορθότροπα σύνθετα υλικά που έχουν πολλά πλεονεκτήματα στην κατασκευή, το σχεδιασμό και την απόδοσή τους. Τα *mat*, *fabric* και *veil* περιγράφονται από το βάρος τους ανά μονάδα επιφάνειας σε [gr/m^2] και την διάταξη των ινών τους. Η διάταξη των ινών καθορίζει στον σχεδιαστή τον προσανατολισμό και το βάρος κάθε συνιστώσας του υφάσματος, όπως φαίνεται στον Πιν. 2.3.

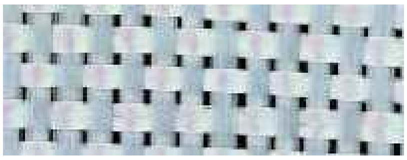
(a) Continuous Strand Veil Surfacing

(b) Chopped Strand Mat (3/4 ounce)

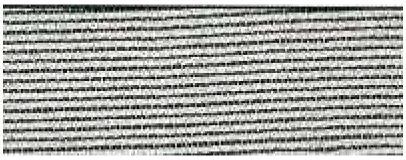
(c) Chopped Strand Mat (1 1/2 ounce)



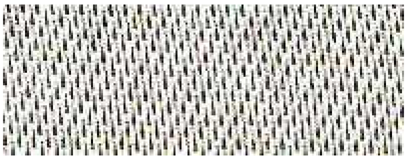
(d) Continuous Strand Mat



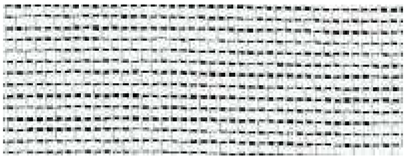
(e) Woven Roving



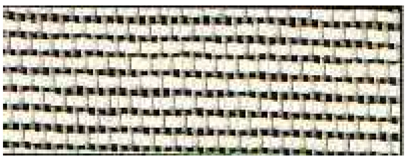
(f) 2 Oz. Fabric



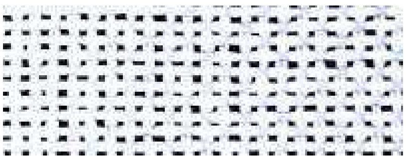
(g) 4 Oz. Fabric: 50 inch wide



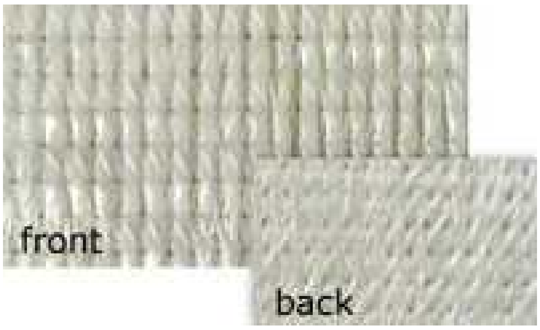
(h) 6 Oz. Fabric: 38 inch wide



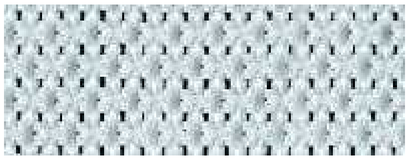
(i) 7 ½ Oz. Fabric



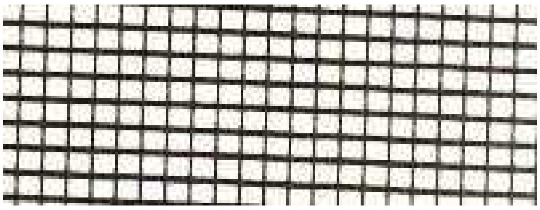
(g) 10 Oz. Fabric



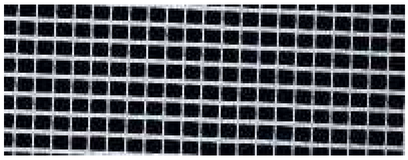
(k) Knit Bi-axial Style 1815 (0/90)



(l) 10 Oz. Fabric



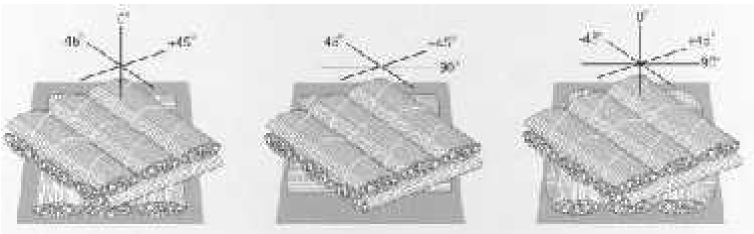
(m) Scrim Fabric, Black



(n) Scrim Fabric, White

(o) Woven Fiberglass Tapes

(p) Gun Roving



(q) Diagram of Stitched Triaxial and Quadraxial Fabrics

2.2 Συνδετικά υλικά

Το συνδετικό υλικό συγκρατεί τις ίνες μαζί και επιπλέον μεταφέρει το φορτίο μεταξύ των ινών, του συνδετικού υλικού και των στηρίξεων. Επίσης προστατεύει τις ίνες από το περιβάλλον και τις μηχανικές τριβές και παραλαμβάνει μέρος του φορτίου, κυρίως τις εγκάρσιες τάσεις και την ενδοστρωματική (εντός του επιπέδου) διατμητική τάση. Μερικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως η εγκάρσια ακαμψία και η αντοχή εξαρτώνται κυρίως από το συνδετικό υλικό. Αυτές επηρεάζουν την επιλογή του συνδετικού υλικού περισσότερο από ότι οι ίνες. Περαιτέρω βασική παράμετρος εκλογής του συνδετικού υλικού είναι και η θερμοκρασία χειρισμού.

Τα συνδετικά υλικά μπορούν να είναι πολυμερή, μεταλλικά ή κεραμικά. Τα πολυμερή συνδετικά υλικά είναι τα πλέον συνήθη επειδή προσδίδουν ένα βασικό πλεονέκτημα στα σύνθετα υλικά, το οποίο είναι η ευκολία της κατασκευής πολύπλοκων τμημάτων με μικρό κόστος σε εργαλεία (*tooling cost*) και μικρή επένδυση κεφαλαίου. Στην πραγματικότητα, τα σύνθετα υλικά που παράγονται από τον άνθρωπο έχουν τις ρίζες τους στα ινοπλισμένα πλαστικά. Μη ενισχυμένα πλαστικά παρέχουν οικονομία στο κόστος εργαλείων (*tooling cost*) και ενοποίηση τμημάτων (*part integration*), καθώς και απεριόριστη ελευθερία αισθητικού σχεδιασμού, αλλά πάσχουν από προβλήματα ερπυσμού. Ενισχύοντας τα πλαστικά με ίνες εξαλείφεται το πρόβλημα του ερπυσμού και ανοίγει μία άλλη διάσταση στα υλικά, παράλληλα με το σχεδιασμό και την κατασκευή, που είναι η απεριόριστη ποικιλία των μηχανικών ιδιοτήτων υπό τον έλεγχο του σχεδιαστή. Τα σύνθετα υλικά με πολυμερές συνδετικό υλικό (PMC's) είναι ο πλέον συνήθης χρησιμοποιούμενος τύπος. Εδώ γίνεται περιληπτική αναφορά σε όλους τους τύπους σύνθετων υλικών.

Το συνδετικό υλικό στα PMC's είναι πολυμερές και είναι είτε θερμικής διαμόρφωσης (*thermoset*) ή θερμοπλαστικό (*thermoplastic*). Πολλοί όροι που αναφέρονται στα PMC's παρουσιάζονται στην αγορά. Βελτιωμένα σύνθετα υλικά (ACM's) συνήθως αναφέρονται ως πιο ακριβά και υψηλής απόδοσης σύνθετα υλικά με εφαρμογές στην αεροναυπηγική, και είναι κυρίως συστήματα *carbon-epoxy και carbon – thermoplastic*. Τα FRP's συνήθως αναφέρονται ως λιγότερο ακριβά υλικά, στοχεύουν τα καταναλωτικά αγαθά και τις μαζικές αγορές, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων *fiberglass-polyester*. Πάντως η διάκριση αυτή δεν είναι πλήρως οριοθετημένη καθώς πολλά νέα υλικά έχουν βγει στην αγορά σαν συστήματα FRP, τα οποία έχουν υψηλή απόδοση και συγκεκριμένα ο λόγος απόδοσης προς κόστος υπερβαίνει εκείνον των λεγόμενων ACM's. Διάφορες ενδείξεις τείνουν να διαφοροποιήσουν του τύπους των ινών που χρησιμοποιούνται. Π.χ. τα GRP και τα GFRP αναφέρονται σαν πλαστικά με ενισχύσεις ινών γυαλιού και το CFRP σε πλαστικά με ενισχύσεις άνθρακα. Μερικές φορές ο όρος RP (ενισχυμένο πλαστικό) χρησιμοποιείται όταν ο όρος σύνθετο υλικό μας μπερδεύει. Αυτή η περίπτωση, στην περιοχή δράσης των πολιτικών μηχανικών, όπου κατασκευή από σύνθετα υλικά σημαίνει και κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα (σύμμικτες), κυρίως σε κατασκευές γεφυρών. Ο όρος *σύνθετο υλικό* που χρησιμοποιείται εδώ, αναφέρεται σε όλους τους τύπους των υλικών που είναι ενισχυμένα με ίνες.

Τα πρώτα βήματα στην πορεία σχεδιασμού των σύνθετων υλικών είναι η επιλογή μερικών συνδετικών υλικών και μερικών μεθόδων παραγωγής. Η επιλογή του συνδετικού υλικού γίνεται με βάση τις μηχανικές ιδιότητες, την αντοχή σε διάβρωση και την πυραντοχή του πολυμερούς συνδετικού υλικού μέσα στο σύνθετο υλικό. Η αντοχή σε διάβρωση του τελικού προϊόντος εξαρτάται κυρίως από το συνδετικό υλικό. Παρόλο που οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς, αν αλλοιωθεί το συνδετικό υλικό, η ακεραιότητα του σύνθετου υλικού τίθεται σε αμφιβολία. Πάντως, η κατάλληλη επιλογή ρητίνης, πρέπει να γίνει στην αρχή της πορείας σχεδιασμού. Ορισμένες ιδιότητες όπως η εγκάρσια ακαμψία και αντοχή επηρεάζονται βασικά από το συνδετικό υλικό, με τις ίνες να έχουν πολύ μικρή επιρροή. Για το λόγο αυτό, οποιαδήποτε ρητίνη δεν μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε ίνα.

Η επιλογή της μεθόδου παραγωγής πρέπει να γίνει στην αρχή της πορείας σχεδιασμού για διάφορους λόγους. Πρώτον, οι μέθοδοι παραγωγής επιβάλουν εμπόδια στην πορεία σχεδιασμού με περιοριστικές παραμέτρους όπως ο λόγος όγκου ινών και η διεύθυνση αυτών. Δεύτερον, η μέθοδος παραγωγής και το κόστος ελέγχονται με δοκιμές στην πορεία παραγωγής του τελικού προϊόντος. Τρίτον, κάθε μέθοδος παραγωγής επιβάλει ένα όριο στο μέγεθος του τμήματος και την πολυπλοκότητά του σχήματος, που ακολούθως έχει σχέση με το σύστημα των ρητινών που χρησιμοποιούνται: όσο χαμηλότερο είναι το ιξώδες (*viscosity*) της ρητίνης, τόσο μεγαλύτερο και πιο πυκνό μπορεί να είναι ένα τμήμα.

Συμπερασματικά, ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέξει μερικά συστήματα ρητινών, που θα συνακολουθούν τις απαιτήσεις της διαδικασίας, τις μηχανικές απαιτήσεις διάβρωσης και της πυραντοχής με το μικρότερο πιθανό κόστος.

2.2.1 Συνδετικά υλικά θερμικής διαμόρφωσης (*thermoset*)

Το συνδετικό υλικό θερμικής διαμόρφωσης (*thermoset*) δημιουργείται από ένα μη αναστρέψιμο χημικό μετασχηματισμό του συστήματος ρητίνης σε ένα άμορφο πολυμερές συνδετικό υλικό. Γενικά, το πολυμερές ονομάζεται *σύστημα ρητίνης (resin system)* κατά τη διαδικασία και *συνδετικό υλικό (matrix)* αφού το πολυμερές έχει στερεοποιηθεί. Οι θερμικής διαμόρφωσης ρητίνες (*thermoset*) έχουν χαμηλό ιξώδες, το οποίο επιτρέπει τον εμποτισμό (*impregnation*) των ινών με μεγάλες ταχύτητες κατά τη διαδικασία. Τα *thermoset* είναι τα πιο κοινά συστήματα ρητινών που χρησιμοποιούνται λόγω της εύκολης χρήσης και του χαμηλού κόστους. *Shelf life* του προϊόντος ονομάζεται ο χρόνος που μπορεί η ακατέργαστη ρητίνη να αποθηκευτεί χωρίς να αποδιοργανωθεί (*degradation*). Συνήθως συνιστάται η αποθήκευση εν ψύξη ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη της ονομαστικής *Shelf life* του προϊόντος. *Pot life* ή *gel time* είναι ο χρόνος όπου η αναμειγνυόμενη ρητίνη μπορεί να χειριστεί μέχρι το ιξώδες φθάσει σε σημείο που η επεξεργασία δεν είναι πλέον δυνατή. Ο χρόνος *gel time* καθορίζεται κατά το ASTM D2471 για τις ρητίνες και το ASTM D3532 για τα *carbon-epoxy prepreg*.

Οι κύκλοι στερεοποίησης (*cure*) μπορούν να κυμαίνονται από μερικά λεπτά έως ώρες, και μπορούν να γίνουν σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας ή σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό εξαρτάται από την επιλογή του καταλύτη και τη δυνατότητα άμεσης αντίδρασης της ρητίνης, Οι αντιδράσεις είναι εξωθερμικές και η διαδικασία πήξης/ζελατινοποίηση (*gelation*) είναι αστραπιαία. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα όταν το ιξώδες της ρητίνης έχει αυξηθεί τόσο ώστε να είναι σχεδόν ακίνητη όταν σκαλιστεί (*probed*) με αιχμηρό αντικείμενο (ASTM D2471). Τα συστήματα στερεοποίησης (*cure*) δεν επηρεάζουν σημαντικά τις τελικές ιδιότητες των ρητινών αλλά επηρεάζουν τη διάρκεια αποθήκευσης (*storage life*) και τις συνθήκες της διαδικασίας. Εφόσον αρχίσει η διαδικασία, το μίγμα πήζει, εκλύεται θερμότητα, στερεοποιείται και συρρικνώνεται. Η ογκομετρική συρρίκνωση μετά την στερεοποίηση κυμαίνεται μεταξύ 4% για *epoxy* έως 8% για πολυεστέρες. Εφόσον οι ίνες ενίσχυσης δεν συρρικνώνονται, η προκαλούμενη εσωτερική τάση προκαλεί ρηγμάτωση, μη ευθυγράμμιση των ινών, καθώς και απόκλιση τελικών διαστάσεων και επιφανειακή τραχύτητα. Μερικές φορές προστίθεται ένα είδος βαφής (*pigments*) ως χρώμα με σκοπό την απορρόφηση των ακτινοβολιών UV.

Οι πιο συνήθεις από τις θερμικής διαμόρφωσης ρητίνες (*thermoset*) είναι: *polyesters, vinylester, epoxy* και *phenolics*. Όλες οι ρητίνες παρέχουν υψηλότερη θερμική μόνωση από τα συνήθη υλικά των κατασκευών. Οι *vinylesters* έχουν μεγάλη αντοχή ενώ οι πολυεστερικές (*polyesters*) μέτρια. Οι εποξικές ρητίνες (*epoxy*) θεωρούνται υψηλής απόδοσης με την έννοια ότι η αντοχή τους είναι υψηλότερη των άλλων θερμικά διαμορφούμενων ρητινών (*thermoset*).

<u>ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ (POLYESTER RESINS):</u> οι ρητίνες αυτές έχουν μικρό ιξώδες, είναι διαυγή υγρά με βάση ακόρεστους (*unsaturated*) πολυεστέρες, τα οποία διαλύονται σε ένα ενεργό μονομερές (*reactive monomers*), όπως το (*styrene*) στυρένιο. Η θερμότητα και η προσθήκη ελευθέρων ριζών (*free radical initiator*), όπως οργανικό υπεροξείδιο, καταλήγει σε μία αντίδραση *cross- linking* μεταξύ των ακόρεστων πολυμερών και των ακόρεστων μονομερών, μετατρέποντας το διάλυμα με χαμηλό ιξώδες σε ένα τρισδιάστατο (*three-dimensional*) θερμικά διαμορφούμενο (*thermoset*) πλαστικό. Ο λόγος των κορεσμένων προς τα ακόρεστα συστατικά ελέγχει το βαθμό της αντίδρασης και επιπλέον καθορίζει την ακαμψία του τελικού προϊόντος. Η αντίδραση μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασία δωματίου με τη χρήση υπεροξειδίων και κατάλληλων ενεργοποιητών (*activators*). Ο τύπος του μονομερούς παίζει σημαντικό ρόλο στην θερμική απόδοση της πολυεστερικής ρητίνης (*polyester*). Μία πολυεστερική ρητίνη (*polyester*) σε vinyl toluene, έχει μεγαλύτερη θερμική απόδοση συγκρινόμενη με την ίδια ρητίνη σε (*styrene*) στυρένιο.

Ρητίνη Polyester Molding

Οι πολυεστερικές ρητίνες (*polyester*) μπορούν να μορφωθούν έτσι ώστε να έχουν καλή αντοχή στις ακτινοβολίες UV και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εξωτερικές εφαρμογές. Αντέχουν στην έκθεση των στοιχείων σε περιόδους που υπερβαίνουν τα τριάντα (30) χρόνια, παρόλο που μπορεί να προκύψει κάποια δυσχρωμία ή μικρή απώλεια αντοχής. Η αρχή της επιφανειακής αλλοίωσης σηματοδοτείται από ένα κίτρινο αποχρωματισμό που γίνεται προοδευτικά πιο σκούρος καθώς προχωρεί η διάβρωση. Σε ημιδιαφανή συστήματα, η ηλιακή ακτινοβολία UV προκαλεί κιτρίνισμα στο σύνολο του σύνθετου υλικού, παρόλο που το χρώμα είναι συνήθως πιο έντονο στην επιφάνεια. Υψηλότερη αντοχή, διατήρηση του χρώματος και αυξημένη αντοχή στη διάβρωση των ινών, μπορεί να επιτευχθεί όταν το (*styrene*) στυρένιο συμπληρωθεί με *methyl methacrylate* (MMA) αυξημένης αντοχής. Η διατήρηση της απόχρωσης του μονομερούς μίγματος *Styrene-MMA* είναι καλύτερη από αυτή του κάθε μονομερούς μεμονωμένου. Ο διαθλαστικός δείκτης (*refractive index*) του MMA είναι χαμηλότερος από του στυρενίου, επιτρέποντας την μορφοποίηση ρητινών *polyester* με διαθλαστικό δείκτη που ταιριάζει με αυτόν των ινών γυαλιού. Αυτό, συνδυαζόμενο με τη βελτίωση της αντοχής στις ακτινοβολίες UV, καταλήγει στη χρήση των *MMA polyesters* για τη δημιουργία ενισχυμένων με γυαλί, διάφανων δομικών πανέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκήπια, υψηλά κτίρια και άλλες εφαρμογές.

Σε πολλές εφαρμογές, οι ρητίνες *polyester* απαιτείται να έχουν πυραντοχή, πράγμα το οποίο μπορεί να κατορθωθεί χρησιμοποιώντας είτε κάποιο υλικό πληρώσεως (*filler*) ή μια ειδικής μορφής, επιβραδυντική στη φωτιά πολυεστερική ρητίνη (*polyester*), που εξαρτάται από τον απαιτούμενο βαθμό πυραντοχής. Έχει βρεθεί ότι ένας δραστικός τρόπος για τη βελτίωσης της πυραντοχής είναι η ενσωμάτωση αλογόνων (*halogens*) στις ρητίνες *polyester*.

Οι ρητίνες *polyester* χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή σε χημική διάβρωση. Πολυάριθμες εφαρμογές με δεξαμενές που αντέχουν στη διάβρωση, σωλήνες, αγωγοί και αεροσκάφη, μπορούν να βρεθούν στη χημική βιομηχανία και τις βιομηχανίες χάρτου. Διαφορετική ταξινόμηση των ρητινών *polyester* χρησιμοποιείται στις εφαρμογές με αντοχή σε διάβρωση που εξαρτώνται από το χημικό περιβάλλον. Οι ρητίνες με βάση το χλώριο (*chlorendic*) συνιστώνται σε πολύ όξινο περιβάλλον, ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ το αέριο *bisphenol-A (BPA) fumarate* είναι καλύτερο σε δυνατό βασικό διάλυμα. Η χρήση των ινών από γυαλί δεν βελτιώνει αλλά αντίθετα μπορεί να μειώσει την αντοχή σε διάβρωση των ρητινών *polyester*. Αυτό ισχύει σε οξύ *hydrofluoric* ή σε δυνατό καυστικό περιβάλλον, γιατί αυτά τα χημικά μπορούν να προσβάλλουν και να διαλύσουν τις ίνες γυαλιού.

Αντιπροσωπευτικά δεδομένα των μηχανικών ιδιοτήτων των ρητινών δίνονται στον Πιν. 2.4. Αυτές οι ιδιότητες ανταποκρίνονται σε μη ενισχυμένα δείγματα καλουπιών ρητινών, που επίσης ονομάζονται "*clear castings ή neat resin samples*''. Οι ισοφθαλικές (*isophthalic*) ρητίνες έχουν μεγαλύτερες εφελκυστικές και καμπτικές ιδιότητες από τις ορθοφθαλικές (*orthophthalic*). Το *BPA fumarate* και η ρητίνη με βάση το χλώριο (*chlorendic*) είναι περισσότερο άκαμπτες και αυτό συνιστά γενικώς ασταθή συμπεριφορά. Η εφαρμογή οποιασδήποτε ενίσχυσης με ίνες βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες όλων των ρητινών.

Οι ισοφθαλικές (*isophthalic*) ρητίνες έχουν μέτρια αντοχή σε διάβρωση σε θερμοκρασίες μικρότερες των 82^{o}C. Είναι ευλύγιστες ή άκαμπτες, οι άκαμπτες έχουν μεγαλύτερη χημική αντοχή λόγω του υψηλού μοριακού τους βάρους. Έχουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση στο νερό και καλή αντοχή σε βενζίνη, λάδια, ασθενή οξέα, αλκάλιο και χαμηλή αντοχή σε υπεροξείδια και υποχλωρίδια (*peroxides και hypochlorites*). Επιφάνειες πλούσιες σε ίνες μπορούν να παρέχουν σημαντική επιβράδυνση της φωτιάς. Συνθέσεις των ισοφθαλικών ρητινών (*isophthalic*) με βρώμιο (*brominated versions*) είναι διαθέσιμες για την επιβράδυνση της φωτιάς. Τυπικές ιδιότητες για τις ρητίνες αυτές δίνονται στον Πιν. 2.4. Οι ορθοφθαλικές ρητίνες (*orthophthalic*), ονομάζονται πολυεστέρες (*polyesters*) γενικής χρήσης και δεν χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές εφαρμογές επειδή έχουν χαμηλή αντοχή σε διάβρωση και μικρή μηχανική αντοχή.

Οι ρητίνες με βάση το χλώριο (*chlorentic*) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες έως 176^{o}C. Έχουν υψηλή αντοχή στα οξέα, σε υπεροξείδια και υποχλωρίδια (*peroxides και hypochlorites*). Έχουν καλή αντοχή σε διαλυτικά μέσα αλλά χαμηλή σε αλκαλικό περιβάλλον. Η αντοχή τους είναι μέτρια και η πυραντοχή τους είναι μεγάλη, έως τη τάξη I για ειδικές μορφές.

Τα BPA fumarate είναι καλύτερα των ισοφθαλικών (*isophthalic*) σε δυνατά οξέα και αλκαλικό περιβάλλον έως τους $121^{o}C$. Έχουν χαμηλή αντοχή σε φωτιά και μέτρια αντοχή σε διαλυτικά μέσα, σε υπεροξείδια και υποχλωρίδια (*peroxides και hypochlorites*).

Οι πολυεστερικές (*polyesters*) ρητίνες θεωρούνται χαμηλού κόστους. Κύριες ποικιλίες όπως οι γενικών χρήσεων ρητίνες, μπορούν να είναι έως 1,43 $/Kg φθηνές. Άλλες, όπως αυτές για εφαρμογές πυροπροστασίας είναι ελαφρώς πιο ακριβές (2,22 $/Kg).

ΡΗΤΙΝΕΣ VINYLESTER: Οι ρητίνες *vinylester* έχουν υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις πολυεστερικές (*polyesters*) και κοστίζουν όσο οι υψηλής απόδοσης εποξικές (*epoxy*) ρητίνες. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τους που διατίθεται για εφαρμογές σε θερμοκρασίες έως $121^{o}C$. Έχουν μεγάλη αντοχή σε οξέα, βάσεις, διαλυτικά μέσα, σε υπεροξείδια και υποχλωρίδια (*peroxides και hypochlorites*). Αυτές με το βρώμιο (*brominated versions*) έχουν μεγαλύτερη πυραντοχή. Τυπικές ιδιότητες δίνονται στον Πιν. 2.4. Το κόστος τους είναι μεταξύ αυτών των πολυστερικών (*polyesters*) και εποξικών (*epoxy*), μικρότερο από 4,0 $/Kg.

Ρητίνη Vinyl-Ester γενικής χρήσης

ΕΠΟΞΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ (EPOXY): 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^{o} και $150^{o}C$.

Ένα από τα σημαντικότερα πεδία 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.

Σύστημα ρητίνης 2000 Epoxy

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*.

Οι τυπικές μηχανικές ιδιότητες κάποιων εποξικών ρητινών (μη ενισχυμένων) δίνονται στον Πιν. 2.4. Το σύστημα EPON 9310/9360 χρησιμοποιείται στη διαδικασία παραγωγής με έλξη. Το σύστημα ρητινών EPON 9310 έχει προκύψει με 33 phr (*phr= parts per hundred in weight=τμήματα επί τοις εκατό ανά βάρος*) του βοηθητικού μέσου 9360. Σημειώνεται εδώ η επιβλαβής επιρροή της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή, το οποίο συμβαίνει στα πολυμερή γενικά. Το σύστημα EPON 9420/9470 χρησιμοποιείται στις διαδικασίες *Resin Transfer Molding* (*RTM=καλούπι ρητινενέσεως*), περιέλιξης (*filament winding*), παραγωγής με έλξη (*pultrusion*) και με προκατασκευασμένες στρώσεις (*prepregs*). Το σύστημα ρητινών 9420 προκύπτει από (A) 24,4 phr και (B) 32,4 phr του βοηθητικού μέσου 9470. Σημειώνεται στον Πιν. 2.4. ότι η υψηλότερη θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού T_g (*glass transition temperature*) από παραμορφώσιμο στερεό σε υλικό τύπου «μαστίχα» οδηγεί σε ένα πιο ψαθυρό συνδετικό υλικό με μικρότερες επιμηκύνσεις και μηχανικές ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πάντα μία σχέση ανταλλαγής μεταξύ των υψηλών θερμοκρασιών εφαρμογής και των μηχανικών ιδιοτήτων όταν διαμορφώνεται εξ ανάγκης ένα σύστημα ρητινών. Η απορρόφηση υγρασίας είναι άλλη μια παράμετρος που απαιτείται να εξεταστεί λόγω των επιδράσεων που δημιουργεί στις μηχανικές ιδιότητες του συνδετικού και του σύνθετου υλικού.

Εποξικά συνδετικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες λειτουργίας (*service*) μεταξύ 125^oC και 175^oC. 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^oC) και χαμηλές για σκληρυμένα εποξικά (*toughened epoxies*) (μεταξύ 76 και 185^oC).

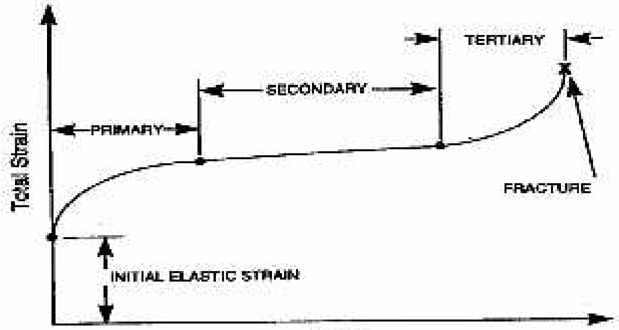
<u>ΡΗΤΙΝΕΣ ΦΑΙΝΟΛΗΣ (PHENOLIC):</u> οι ρητίνες αυτές έχουν μικρή πυραντοχή και μικρή παραγωγή καπνού, σε σύγκριση με άλλες ρητίνες μικρού κόστους. Επίσης, έχουν καλή σταθερότητα των διαστάσεων για αυξομείωση της θερμοκρασίας και αρκετά καλές συγκολλητικές ιδιότητες. Οι φαινόλες χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη, σε οχήματα μαζικής μεταφοράς και σε εσωτερικές κατασκευές όπου η έκλυση αερίων κατά τη διάρκεια φωτιάς πρέπει να είναι πολύ μικρή. Χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες *Sheet Molded Compound* (*SMC*), περιέλιξης (*filament winding*) και παραγωγής με έλξη (*pultrusion*). Η διαδικασία εφαρμογής των ρητινών φαινόλης (*phenolic*) διαφέρει αρκετά από τις άλλες θερμικής διαμόρφωσης (thermoset), κυρίως τις πολυεστερικές (polyester) ρητίνες, αλλά πετυχημένες παραγωγές έχουν επιτευχθεί με καλές μηχανικές ιδιότητες. Το κόστος αυτών είναι ανταγωνιστικό των πολυεστερικών (polyester) περίπου $1,32/Kg. Άλλες ρητίνες παρουσιάζουν χαμηλή πυραντοχή και τοξικότητα (*toxicity*) όπως οι *bismaleimide* και *polystyrylpyridine*. Δεδομένα για τις θερμοκρασίες της ρητίνης *bismaleimide*, του μίγματος 70/30 από *compimide* 796 και TM-123 της Shell Chemical Co. φαίνονται στον Πιν. 2.4.

2.2.2 Θερμοπλαστικά συνδετικά υλικά (*thermoplastic*)

Ένα θερμοπλαστικό (*thermoplastic*) πολυμερές δεν παθαίνει καμία χημική μεταμόρφωση κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Αντίθετα, το πολυμερές μαλακώνει από τη στερεή φάση που είναι, και επιστρέφει ξανά ως στερεό αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία. Τα θερμοπλαστικά (*thermoplastic*) έχουν υψηλή πυκνότητα για τις θερμοκρασίες επεξεργασίας, η οποία τα καθιστά δύσκολα στην επεξεργασία. Απαιτούνται υψηλές διατμητικές τάσεις ώστε να κάνουν τα θερμοπλαστικά (*thermoplastic*) να ρέουν διότι καταστροφή στις ίνες συνεπάγεται μείωση του μήκους των ινών από 10 έως και 100 φορές. Για το λόγο αυτό, ένας από τους βασικούς στόχους στην παραγωγή των θερμοπλαστικών (*thermoplastic*) και των επεξεργασιών αυτών είναι να μειωθούν οι κολλώδεις δράσεις (*viscous effects*) στην υγρή φάση. Καθώς ο εμποτισμός (*impregnation*) δυσκολεύει με την υψηλή πυκνότητα, πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα ώστε να εξασφαλιστεί η επαφή μεταξύ ινών και πολυμερούς. Π.χ ανακατεμένες (*intermingled*) ίνες και *polymer strand* χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν μία δέσμη *tow*, και κατόπιν ολοκληρώνεται η επεξεργασία με το λιώσιμο του πολυμερούς με θερμότητα. Αυτοί οι ενδιάμεσοι χειρισμοί και πιο αργές πορείες επεξεργασίας προσθέτουν κόστος στο τελικό προϊόν. Τα θερμοπλαστικά (*thermoplastic*) δεν απαιτούν αποθήκευση υπό ψύξη και έχουν εικονικά απεριόριστη διάρκεια αποθήκευσης. Επίσης τα θερμοπλαστικά (*thermoplastic*) σύνθετα υλικά μπορούν να επισκευαστούν διότι η μετάπτωση στο μαλακό στάδιο (*softened stage*) μπορεί να πραγματοποιηθεί πολλές φορές με την εφαρμογή θερμότητας.

Το *Poly-ether ether-ketone (PEEK)* είναι το πιο σύνηθες θερμοπλαστικό (*thermoplastic*) συνδετικό υλικό για εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Έχει πολύ μεγάλη αντοχή θραύσης, το οποίο είναι σημαντικό για την ανοχή φθορών στα σύνθετα υλικά. Το *PEEK* είναι ημικρυσταλλικό θερμοπλαστικό (*thermoplastic*) με πολύ μικρή απορροφητικότητα σε νερό (περίπου 0,5% του βάρους) σε θερμοκρασία δωματίου, πολύ μικρότερη από τα περισσότερα εποξικά (*epoxies*).

Το *polyphenylene sulfide (PPS)* είναι ημικρυσταλλικό θερμοπλαστικό (*thermoplastic*) με εξαιρετική χημική αντοχή. Το *polysulfone* (*PSUL)* είναι ένα άμορφο θερμοπλαστικό με πολύ μεγάλη επιμήκυνση θραύσης και εξαιρετική σταθερότητα υπό θερμές και υγρές συνθήκες. Τα *polyetherimide (PEI) polyamide-imide (PAI)* είναι άμορφα θερμοπλαστικά με υψηλή θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού T_g. Τα δύο άλλα θερμοπλαστικά του Πιν.2.5, τα *K-III και LARC-TPI*, είναι προ-πολυμερή (*prepolymers)* σε διαλυτικό μέσο/διάλυμα (*solvent solution*) που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη των ινών. Οι επικαλύψεις (*coatings*) στερεοποιούνται στους 300^{o}C και μετατρέπονται σε άμορφα πολυμερή με υψηλή θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού. Μετά την στερεοποίηση το πολυμερές μπορεί να θερμανθεί και να ανασχηματιστεί σαν ένα κανονικό θερμοπλαστικό (*thermoplastic*) με καλή υψηλή θερμοκρασία απόδοσης.



Σχ. 2.1: Τυπικά αποτελέσματα ενός πειράματος ερπυσμού

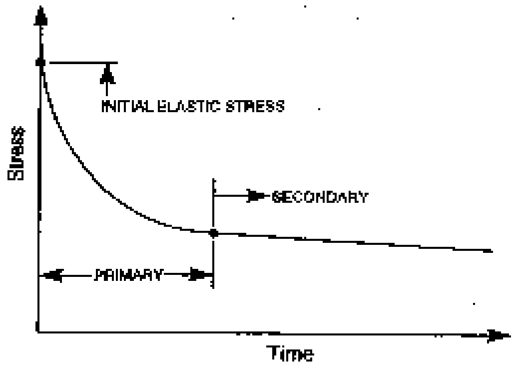
2.2.3 Ερπυσμός, θερμοκρασία και υγρασία

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, τα πολυμερή υφίστανται ερπυσμό σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας. Επίσης, οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών εξαρτώνται σημαντικά από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Ο ερπυσμός μπορεί να οριστεί ως η προοδευτική παραμόρφωση με το χρόνο υπό σταθερό φορτίο και είναι η εκδήλωση της βισκοελαστικής (*viscoelastic*) συμπεριφοράς των πολυμερών.

Ένα απλό πείραμα ερπυσμού αποτελείται από τη φόρτιση ενός δοκιμίου υπό σταθερό εφελκυστικό φορτίο (σ=σταθερή) όπου καταγράφεται η επιμήκυνση ως προς το χρόνο (σχ. 2.1).

Αρχικά εμφανίζεται μια στιγμιαία ελαστική παραμόρφωση, που ακολουθείται από μία κύρια περιοχή ερπυσμού όπου η παραμόρφωση προοδεύει γρήγορα. Η κύρια περιοχή ερπυσμού χαρακτηρίζεται από μικρή χρονική περίοδο. Για το λόγο αυτό, είναι ενδιαφέρουσα η επεξεργασία και η συναρμολόγηση. Η δευτερεύουσα περιοχή ερπυσμού χαρακτηρίζεται από μία σταθερή κλίση, που ονομάζεται ρυθμός ερπυσμού (*creep rate*), και εκτείνεται σε μία μεγάλη περίοδο χρόνου. Αυτή είναι η περιοχή ενδιαφέροντος στο σχεδιασμό γιατί περιγράφει το εύρος του χρόνου για το οποίο η κατασκευή θα είναι σε χρήση. Αν ο ρυθμός ερπυσμού, δεν είναι στο λειτουργικό επίπεδο τάσης (*stress level*), το υλικό ονομάζεται ιξωδοελαστικό (*viscoelastic*) αλλιώς είναι ιξωδοπλαστικό (*viscoplastic*). Η τριτογενής περιοχή ερπυσμού προκύπτει συνήθως από υψηλές τιμές τάσεων και μεγάλους χρόνους. Χαρακτηρίζεται από στιγμιαία συσσώρευση παραμόρφωσης λόγω ερπυσμού (*creep strain*) και αστοχιών στο υλικό. Η τριτογενής περιοχή μπορεί να μην προκύψει καθόλου σε συγκεκριμένα υλικά ή κάτω από συγκεκριμένα επίπεδα τάσεων.

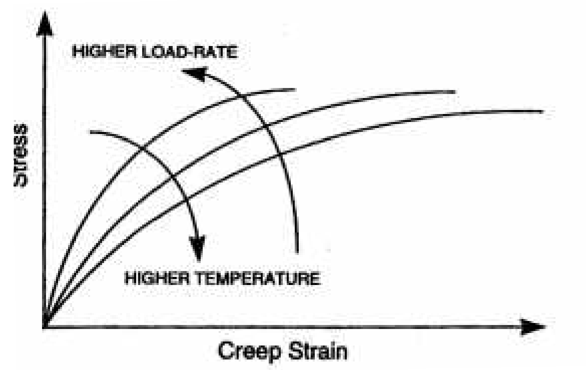
Ένα απλό τεστ χαλάρωσης περιλαμβάνει την εφαρμογή σταθερής εφελκυστικής παραμόρφωσης (ΔL=σταθερό) και καταγραφή της τάσης ως προς το χρόνο (σχ.2.2). Το τελικό φορτίο είναι το απαραίτητο ελαστικό φορτίο που προκαλεί την αρχική ακαριαία παραμόρφωση. Στη συνέχεια, το δοκίμιο χαλαρώνει και το φορτίο μειώνεται.



Σχ. 2.2: Τυπικά αποτελέσματα ενός πειράματος χαλάρωσης

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών είναι επίσης απόδειξη της επίδρασης του ρυθμού φόρτισης (*load rate*). Αν το φορτίο δεν εφαρμοστεί ξαφνικά αλλά σε συγκεκριμένο χρόνο, το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (σχ.2.3) αλλάζει ως αποτέλεσμα του ρυθμού φόρτισης. Όσο πιο αργή είναι η εφαρμογή του φορτίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μεγαλύτεροι χρόνοι εφαρμογής επιτρέπουν στο υλικό να συσσωρεύσει μεγαλύτερη παραμόρφωση λόγω ερπυσμού. Το τελικό τμήμα του διαγράμματος είναι γραμμικό, ενώ η συμπεριφορά είναι ιξωδοελαστική (*viscoelastic*). Το διάγραμμα γίνεται μη γραμμικό σε επίπεδα υψηλών τάσεων, επιδεικνύοντας ιξωδοπλαστική (*viscosplactic*) συμπεριφορά. Ένας από τους κύριους λόγους χρήσης των ενισχύσεων με ίνες είναι ο περιορισμός των παραμορφώσεων των πολυμερών συνδετικών υλικών έτσι ώστε οι κατασκευές να δέχονται φορτία για μεγάλες χρονικές περιόδους. Η ιξωδοελαστική (*viscoelastic*) συμπεριφορά των σύνθετων υλικών μπορεί να προβλεφθεί από τη συμπεριφορά κατά την παραμόρφωση του συνδετικού υλικού και των ενισχύσεων χρησιμοποιώντας την μικρομηχανική θεώρηση.

Η θερμοκρασία έχει αξιοσημείωτη επίδραση στη συμπεριφορά των πολυμερών. Τα θερμικής διαμόρφωσης πολυμερή έχουν άμορφη εσωτερική δομή και χαρακτηρίζονται μια θερμοκρασία μετάβασης T_g (*glass transition temperature*) στην οποία το υλικό πηγαίνει από την υαλοειδή (άκαμπτη) συμπεριφορά σε μία μαστιχοειδή (λαστιχένια) συμπεριφορά. Κατασκευές από PMCs λειτουργούν πάντα σε θερμοκρασίες μικρότερες της T_g. Απ’ την άλλη μεριά, τα θερμοπλαστικά μπορεί να είναι άμορφα ή ημικρυσταλλικά, εκδηλώνοντας θερμοκρασία τήξης T_m της κρυσταλλικής φάσης σε σύγκριση με τη θερμοκρασία μετάβασης T_g της άμορφης φάσης. Τα πολυμερή παρουσιάζουν μια σημαντική μείωση του μέτρου ελαστικότητας E_m με τη θερμοκρασία σε σχέση με την T_g.



Σχ. 2.3: Τυπικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές ρυθμού φόρτισης και θερμοκρασίας

Οι επιδράσεις του χρόνου και της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά των πολυμερών είναι παρόμοια, με την έννοια του ότι η ίδια παραμόρφωση λόγω ερπυσμού μπορεί να συσσωρευτεί μέσα σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα με χαμηλή θερμοκρασία ή σε μικρό χρονικό διάστημα με υψηλή θερμοκρασία. Ο χρόνος και η θερμοκρασία σχετίζονται μέσω της χρήσης της αρχής της επαλληλίας των παραμέτρων χρόνου-θερμοκρασίας.

Αν το πολυμερές εκτεθεί σε υγρό περιβάλλον, θα απορροφήσει υγρασία μέσω μιας διαδικασίας διάχυσης. Η υγρασία μειώνει το μέτρο ελαστικότητας, την αντοχή του και την θερμοκρασία μετάβασης T_g του πολυμερούς. Η επίδραση της υγρασίας μπορεί να τυποποιηθεί με την αρχή της επαλληλίας. Βάσει των παραπάνω καθίσταται φανερό ότι είναι σημαντικό να ορίζεται η πορεία φόρτισης, η θερμοκρασία και η υγρασία μαζί με τα αποτελέσματα κάθε πειράματος που αφορά τα PMCs. Είναι επίσης σημαντικό να αξιολογούνται οι επιδράσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας και της υγρασίας στις ιδιότητες των σύνθετων υλικών κατά το σχεδιασμό.

Η θερμοκρασία μετάβασης T_g των πολυμερών, μειώνεται σαν αποτέλεσμα της απορρόφησης υγρασίας. Η ακόλουθη εμπειρική εξίσωση διαμορφώνει τα δεδομένα κάποιων εποξικών ρητινών

$$T_{gw} = (1 - 0{,}1m + 0{,}005m^2)\, T_{gd} \qquad (2.4.)$$

όπου *m* είναι το περιεχόμενο υγρασίας στο βάρος, και T_{gw}, T_{gd} είναι οι θερμοκρασίες μετάβασης T_g για ξηρά (*d=dry*) και υγρά (*w=wet*) πολυμερή συνδετικά υλικά.

Γενικά όλες οι ιδιότητες των πολυμερών, συμπεριλαμβανομένων της αντοχής και της δυσκαμψίας, μειώνονται με τη θερμοκρασία και την περιεχόμενη υγρασία. Ο λόγος *retention ratio (g)* μιας δεδομένης ιδιότητας ορίζεται ως το πηλίκο της ιδιότητας σε μία δεδομένη θερμοκρασία (T) και την περιεχόμενη υγρασία m προς την τιμή αναφοράς της θερμοκρασίας (To) και τις συνθήκες ξηρασίας. Ο λόγος *retention ratio* κάποιων εποξικών ρητινών μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικούς τύπους όπως

$$g = [\, (T_{gw}-To)/(T_{gd}-To)]^{\,0{,}5} \qquad (2.5)$$

Η θερμοκρασία μετάβασης T_g μπορεί να μετρηθεί μέσω των DTA=*Differential Thermal Analysis και* DSC=*Differential Scanning Calorimetry*, σύμφωνα με τα ASTM D3418 και E1356. Άλλη μέτρηση των χαρακτηριστικών των πολυμερών και των PMCs είναι η θερμοκρασία διόγκωσης (HDT= *Heat Deflection Temperature*), που επίσης ονομάζεται και θερμοκρασία στρέβλωσης (*Heat Distortion Temperature*) που μπορεί να μετρηθεί με το ASTM D648. Ένα αμφιέρειστο δοκίμιο φορτίζεται με ένα συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον (*three point bending*) υπό σταθερή εφελκυστική τάση είτε 1,82 MPa ή 0,455 MPa που εξαρτάται από το υλικό. Η θερμοκρασία αυξάνεται με ρυθμό 2^oC/min μέχρι το βέλος (*deflection*) να φθάσει τα 0,25mm. Η θερμοκρασία σ' αυτό το σημείο καταγράφεται ως HDT. Παρόλο που ο εξοπλισμός DSC είναι πολύ συνηθισμένος σήμερα στα εργαστήρια και η T_g παρέχει καλύτερο χαρακτηρισμό του πολυμερούς (*polymer*), η HDT χρησιμοποιείται ευρέως και καταγράφεται και στη βιβλιογραφία.

2.2.4 Αντοχή σε διάβρωση

Η χημική αποδιοργάνωση (*degradation*) ενός PMC μπορεί να προκύψει σαν αποτέλεσμα της αποδιοργάνωσης συνδετικού υλικού, των ινών ή αποδιοργάνωσης των σημείων επαφής ινών-συνδετικού υλικού. Το πολυμερές μπορεί επίσης να αποδιοργανωθεί λόγω απορρόφησης διαλυτικών μέσων (συμπεριλαμβανομένου του νερού), οξείδωσης, ακτινοβολίας UV και θερμικής αποσάθρωσης. Αλκαλικό περιβάλλον, φθόριο, ζεστό νερό και υδροχλωρικό οξύ μπορούν να «επιτεθούν» στις ίνες γυαλιού, αν αυτά απορροφηθούν από το συνδετικό υλικό. Η απορρόφηση θα επιταχυνθεί αν το συνδετικό υλικό περιέχει ρωγμές ή σπασίματα. Παρόλα αυτά η χημική αντίσταση ενός PMC εξαρτάται από την αντοχή του συνδετικού υλικού (δηλ. να αντέχει το συνδετικό υλικό στις φθορές) και τα φορτία που εφαρμόζονται στο υλικό. Το επίπεδο των τάσεων επιταχύνει την από αλκάλια προκαλούμενη αποδιοργάνωση των ενισχυμένων με ίνες γυαλιού σύνθετων υλικών διότι οι ρωγμές του συνδετικού υλικού τείνουν να ανοίξουν διευκολύνοντας τα αλκάλια να φθάσουν και να επιτεθούν στις ίνες γυαλιού. Τα σημεία επαφής των ινών-συνδετικού υλικού μπορούν επίσης να προσβληθούν, σαν αποτέλεσμα χαμηλότερης αντοχής της διαστρωμάτωσης και της χαμηλής ενδοστρωματικής αντοχής.

Η χημική προσβολή ορίζεται από τέσσερις μεταβλητές: την έκταση της αποδιοργάνωσης, το χρόνο, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση των χημικών που επιτίθενται. Η χημική αποδιοργάνωση επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Για μια συγκεκριμένη ζώνη επιρροής, η επαλληλία χρόνου-θερμοκρασίας μπορεί να εφαρμοστεί για μακράς διαρκείας προβλέψεις ή για συμπεριφορές σε υψηλές θερμοκρασίες. Αλλά, πέρα από ένα όριο θερμοκρασίας, οι μηχανισμοί της χημικής αποδιοργάνωσης ή ο τρόπος εισόδου αυτών των υλικών μπορεί να αλλάξει και η αποδιοργάνωση να προχωρήσει με υψηλότερους ρυθμούς. Για το λόγο αυτό, οι προτεινόμενες μέγιστες θερμοκρασίες εφαρμογής που δίδονται σε πίνακες συνδετικών υλικών, δεν πρέπει να υπερβαίνονται χωρίς εκτεταμένες πειραματικές δοκιμές υλικών.

Μη ολοκληρωμένη στερεοποίηση των θερμικά διαμορφούμενων πολυμερών είναι εξαιρετικά επιβλαβής στην αντοχή σε διάβρωση του συνδετικού υλικού. Γι’ αυτό η μέθοδος επεξεργασίας παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή σε διάβρωση. Υψηλότερος βαθμός στερεοποίησης μπορεί να κατορθωθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες ή επιτρέποντας περισσότερο χρόνο για να ολοκληρωθεί η αντίδραση, αλλά η υψηλότερη θερμοκρασία και η μακρύτερη χρονικά επεξεργασία αυξάνει το κόστος επεξεργασίας. Η αντοχή σε διάβρωση διαφόρων θερμικά διαμορφούμενων υλικών πρέπει να συγκριθεί σε παρόμοιο επίπεδο στερεοποίησης (ή συνθηκών επεξεργασίας). Δεδομένα από διαφορετικές παρασκευαστικές επεξεργασίες (π.χ. στερεοποίηση με κλίβανο έναντι στερεοποίησης σε θερμοκρασία δωματίου) δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες.

Ο βαθμός στερεοποίησης που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας μπορεί να παρακολουθείται μέσω οθόνης απευθείας με τη διαδικασία χρησιμοποιώντας διηλεκτρικά εξαρτήματα (*dielectric probes*) ή να ελέγχεται αργότερα. Η απλούστερη δοκιμή, παρόλο που δεν είναι απαραίτητα ακριβής, είναι η σκληρότητα Barcol (ASTM D2583). Αυτή η δοκιμή πρέπει να συμπληρωθεί μετά με μια δοκιμή ακετόνης (*acetone*) για τον έλεγχο των επιφανειών. Η επιφάνεια τρίβεται με ακετόνη (*acetone*), και αν παρουσιάζει μαλακιά ή ελαφρά κολλώδη υφή η στερεοποίηση δεν έχει ολοκληρωθεί. Και οι δύο αυτές δοκιμές είναι ποιοτικές. Μια καλύτερη δοκιμή είναι η DSC=*Differential Scanning Calorimetry*, σε μερικά δείγματα των στερεοποιημένων τμημάτων. Η δοκιμή DSC είναι βασικά ενόργανη δοκιμή μετά την στερεοποίηση του δοκιμίου. Ο εξοπλισμός της DSC πραγματοποιεί μία σάρωση (*sweep*) των θερμοκρασιών του δοκιμίου και καταγράφει κάθε θερμότητα αντίδρασης που μπορεί να προέρχεται από το δοκίμιο. Αν η τελική στερεοποίηση έχει ολοκληρωθεί δε θα υπάρχει θερμότητα αντίδρασης. Αλλιώς η περιοχή κάτω από την καμπύλη DSC παρουσιάζει την παραμένουσα θερμότητα αντίδρασης H_R (*heat of reaction*) που εκλύεται από το δοκίμιο, επιδεικνύοντας την ανάγκη για μετά-στερεοποίηση (*post-cure*). Μία DSC ενός δοκιμίου καθαρής ρητίνης δίνει την ολική θερμότητα αντίδρασης H_τ (*total heat of reaction*) (ASTM D3418 και D5028). Μετά είναι δυνατόν να μετρηθεί ο βαθμός στερεοποίησης α ($0<\alpha<1$) του δείγματος του σύνθετου υλικού, από τον τύπο $\alpha=1- H_R/H_T$.

Οι πίνακες επιλογής ρητινών από κατασκευαστές ρητινών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή των υλικών κατά τη διάρκεια του προκαταρκτικού σχεδιασμού. Σ' αυτό το στάδιο μπορούν επίσης να γίνουν υποθέσεις για το κόστος και εναλλακτικές κατασκευαστικές διαμορφώσεις. Αφού ο αριθμός των επιλεγμένων ρητινών έχει περιοριστεί σε μερικές, πρέπει να γίνουν δοκιμές σε δοκίμια για να ποσοτικοποιήσουν την χημική αντοχή τους. Στις δοκιμές χημικής αντοχής (ASTM C581) χρησιμοποιούνται τυποποιημένες κατασκευές που εξομοιώνουν τους χημικούς περιορισμούς/εμπόδια (*barrier*) που χρησιμοποιούνται σε δεξαμενές και άλλα συστατικά FRP σε συνδυασμό με επιθετικά χημικά συστατικά. Αφού η χημική αντοχή μπορεί να διαφοροποιηθεί με την κατασκευή διαστρωμάτωσης, πρέπει να παραχθούν δοκίμια από την επιλεγμένη διαδικασία παραγωγής, και η διαμόρφωση της διαστρωμάτωσης θα πρέπει να είναι παρόμοια με την πραγματική παραγωγή.

2.2.5 Πυραντοχή

Όλα τα οργανικά υλικά, συμπεριλαμβανομένων και των πολυμερών (*polymers*) καίγονται με την παρουσία φλόγας. Όταν τα πολυμερή σύνθετα υλικά θερμαίνονται, το πολυμερές ξεκινά να διασπάται χημικά. Η θερμοκρασία στην οποία προκύπτει αυτή η διάσπαση και ο τύπος των αερίων που παράγονται εξαρτώνται από τη σύνθεση του πολυμερούς. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των PMCs σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το ASTM E84 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατηγοριοποίηση των υλικών για χαρακτηριστικά καψίματός τους. Το υλικό τοποθετείται σε έναν αγωγό πεπιεσμένου αέρα (*forced air tunnel*), και μία ελεγχόμενη φλόγα χρησιμοποιείται για να ανάψει φωτιά στη επιφάνεια του δείγματος. Ο χρόνος της ανάφλεξης και η απόσταση που η προκαλούμενη φλόγα προωθείται προς την διεύθυνση του ρεύματος αέρα, χρησιμοποιούνται για να αποκτηθεί κατηγορία διάδοσης της φλόγας (FSC=*Flame Spread Classification*), είναι ένας αριθμός μεταξύ 0 και 100. Βασιζόμενοι στον αριθμό FSC, τα υλικά κατατάσσονται: Κατηγορία I για υλικά με FSC$\leq$ 25, Κατηγορία II για 25<FSC$\leq$75, Κατηγορία III για FSC>75.

Ο δείκτης οξυγόνου (ASTM D2863) είναι η μικρότερη συγκέντρωση οξυγόνου που απλά θα υποστηρίζει την πυρανάφλεξη. Το ASTM E906 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και ορατού καπνού όταν το υλικό εκτεθεί σε πηγή θερμότητας (*radiant heat*). Ένα άλλο μέτρο της πυραντοχής μιας επιφάνειας υπό την πηγή θερμότητας παρέχεται από το ASTM E162. Επιπροσθέτως, η οπτική πυκνότητα του καπνού που γεννιέται μπορεί να μετρηθεί με το ASTM E662. Άλλες δοκιμές και διευκρινήσεις χρησιμοποιούνται επίσης για την αποτίμηση διάφορων περιπτώσεων πυραντοχής.

Διαφορετικές ρητίνες και τα σύνθετα υλικά τους θα αρχίζουν να διασπώνται σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι ισοφθαλικές (*isophthalic)* ρητίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως τους 98^{o}C, μερικοί εστέρες βινυλίου (*vinylesters*) έως 135^{o}C, οι *BPA fumarate* και οι ρητίνες με βάση το χλώριο (*chlorendic)* έως τους 140^{o}C. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των ινοπλισμένων σύνθετων υλικών (*fiber reinforced composites*) μπορεί να είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από αυτή των ρητινών. Ίνες με υψηλή θερμική αγωγιμότητα βοηθούν στη διάδοση και διάχυση της θερμότητας μακριά από τη πηγή θερμότητας, επιπλέον βελτιώνουν τις θερμοκρασίες του υλικού. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα κάποιων ινών είναι καταστροφική γιατί υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να έχουμε κοντά στη πηγή θερμότητας.

Είναι πολύ σημαντικό να λαμβάνεται υπ' όψιν ότι όλες οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών αλλάζουν με τις θερμοκρασίες και ακόμα περισσότερο όταν είναι χαμηλότερες από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Επίσης, τα πολυμερή και τα PMCs έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Αυτό μπορεί να είναι πλεονεκτικό γιατί η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες για μικρές χρονικές περιόδους δε θα αυξήσει τη θερμοκρασία στον πυρήνα μιας παχιάς διαστρωμάτωσης. Απ' την άλλη μεριά, μικρή διάχυση της θερμότητας σημαίνει ότι παρατεινόμενη έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία δεν μπορεί να υποφερθεί.

Πιν. 2.1. Τυπικές Ιδιότητες Ινών γυαλιού, άνθρακα, οργανικών, βορίου, πυριτίου και κεραμικών.

Fiber	**Modulus [GPa]**	**Tensile Strength [GPa]**	**Compression Strength [GPa]**	**Elongation [%]**	**Density [gr/cc]**	**Longitudinal Thermal Expansion [10^{-6}/°C]**	**Transverse Thermal Expansion [10^{-6}/°C]**	**Poisson Ratio**	**Thermal Conduct [W/m/°C]**	**Maximum Operating Temperature [°C]**	**Resistivity [micro ohm-m]**
Ίνες	**Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]**	**Εφελκυστική Αντοχή [GPa]**	**Θλιπτική Αντοχή [GPa]**	**Επιμήκυνση [%]**	**Πυκνότητα [gr/cc]**	**Διαμήκης Θερμική Διαστολή [10^{-6}/°C]**	**Εγκάρσια Θερμική Διαστολή [10^{-6}/°C]**	**Λόγος Poisson**	**Θερμική Διάδοση [W/m/°C]**	**Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας [°C]**	**Ηλεκτρική Αντίσταση [micro ohm-m]**
E-Glass	72.345	3.45	-	4.4	2.5-2.59	5.04-5.4	-	0.22	1.05	550	-
S-Glass	85	4.8	-	5.3	2.46-2.49	1.6-2.9	-	0.22	1.05	650	-
C-Glass	69	3.31	-	4.8	2.56	6.3	-	-	1.05	600	-
D-Glass	55	2.5	-	4.7	2.14	3.06	-	-	-	477	-
Carbn											
T300	230	3.53	-	1.5	1.75	-0.6	7-12	0.2	3.06	-	18
M50	490	2.45	-	0.5	1.91	-	-	-	54.43	-	8
AS2	227	2.756	-	1.3	1.8	-	-	-	8.1-9.3	-	15-18
AS4-D	241	4.134	-	1.6	1.77	-0.9	-	-	8.1-9.3	-	15-18
IM6	275.6	5.133	-	1.73	1.74	-	-	-	8.1-9.3	-	15-18
HMS4	317	2.343	-	0.8	1.8	-	-	-	64-70	-	9-10
UHM	441	3.445	-	0.8	1.85	-	-	-	6.5	-	120
P55	379	1.9	-	0.5	2	-1.3	-	-	120	-	8.5
P100	758	2.41	-	0.32	2.16	-1.45	-	-	520	-	2.5
Kevlar 29	62	3.792	-	-	1.44	-	-	-	-	-	-
Kevlar 49	131	3.62	0.72	2.8	1.45	-2	59	0.35	0.04	160	-
Kevlar 149	179	3.62	0.69	1.9	1.47	-	-	-	-	-	-
TechnoraH	70	3	0.6	4.4	1.39	-6	59	0.35	-	160	-
Boron	400	2.7-3.7	6.9	0.79	2.57	4.5	0.2	0.2	38	315	-
SCS-6	427	2.4-4	-	0.6	3	4-4.8	-	0.2	10	-	-
Nextel	260	2.1	-	-	3.4	6	-	-	-	1200	-

Πιν. 2.2 : Υπολογισμός απομείωσης της αντοχής των ινών.

Fiber/ Ίνες	**Strength reduction / Μείωση Αντοχής (%)**
E-glass	25-50
S-2 glass	24
Kevlar 49	31
Kevlar 149	14
Carbon ASW-4	17
Carbon T-700	22
Carbon IM-6	21
Carbon T-40	21

Πιν. 2.3 : Διάταξη των ινών σε διάφορα πλεκτά (stitched fabrics).

Denomination / Ονοματολογία	**Chopped Strand Mat g/m^2**	**0/90 (balanced) g/m^2**	**±45 (balanced) g/m^2**	**0 (warp) g/m^2**	**90 (weft) g/m^2**
M1500	450	-	-	-	-
C24	-	800	-	-	-
CM1808	225	600	-	-	-
CM1810	300	600	-	-	-
Q30	-	-	440	405	170
QM5620	600	1100	800	-	-
TH27	-	-	450	-	450
TVM3408	225	-	609	541	-
UM1810	300	-	-	600	-
UM1608	240	-	-	533	-
XM2408	225	-	800	-	-

Πιν. 2.4 : Μηχανικές Ιδιότητες των Θερμικής Διαμόρφωσης Συνδετικών Υλικών -“thermoset”.

Thermosets	**Tensile Modulus [GPa]**	**Tensile Strength [MPa]**	**Compression Strength [MPa]**	**Shear Strength [MPa]**	**Tensile Elongation [%]**	**Flexural Modulus [GPa]**	**Flexural Strength [GPa]**	**Thermal Expansion [10^{-6}/^{o}C]**	**Heat Deflection Temperature [^{o}C]**	**Poisson Ratio**	**T_g [^{o}C]**	**Density [gr/cc]**
Θερμικής Διαμόρφωση	**Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]**	**Εφελκύστηκε Αντοχή [MPa]**	**Θλιπτική Αντοχή [MPa]**	**Διατμητική Τάση [MPa]**	**Επιμήκυνση Εφελκυσμού [%]**	**Μέτρο Ακαμψίας σε κάμψη [GPa]**	**Αντοχή σε κάμψη [GPa]**	**Θερμική Διαστολή [10^{-6}/^{o}C]**	**Θερμοκρασία Διόγκωσης H.D.T. [^{o}C]**	**Λόγος Poisson**	**T_g [^{o}C]**	**Πυκνότητα [gr/cc]**
POLYESTER												
Orthophthalic	3.4	55.2	-	-	2.1	6.9	220.7	-	79.4	0.38	-	-
Isophthalic	3.4	75.9	117.2	75.9	3.3	7.6	241.4	30	90.6	0.38	-	-
BPA Fumarate	2.8	41.4	103.5	-	1.4	9	158.6	-	129.4	0.38	-	-
Chlorendic	3.4	20.7	103.5	-	-	9.7	193.1	-	140.6	0.38	-	
VINYL ESTER												
Derakane 411-45	3.4	82.7	117.1	82.7	5-6	3.1	124	-	104	0.38	-	-
EPOXY												
9310/9360@23_oC	3.12	75.8	-	-	4	-	-	54	-	0.38	185	1.2
9310/9360@149_oC	1.4	26.2	-	-	5.2	-	-	-	-	-	185	1.2
9420/9470(A)@23_oC	2.66	57.2	-	-	3.1	-	-	-	-	-	195	1.162
9420/9470(B)@23_oC	2.83	77.2	-	-	5.2	-	-	-	-	-	155	1.158
HPT1072/1062-M@23_oC	3.383	-	-	-	-	3.383	131	-	-	-	239	-
BISMALEIMIDE												
796/TM-123@24_oC	3.582	-	-	-	-	3.582	132	-	-	-	260	-
796/TM-123@249_oC	-	-	-	-	-	2.48	90	-	-	-	260	-

Πιν. 2.5 : Τυπικές Ιδιότητες των Θερμοπλαστικών Συνδετικών Υλικών- “thermoplastic”.

Thermoplastics	**Tensile Modulus [GPa}**	**Tensile Strength [MPa]**	**Tensile Elongation [%]**	**Poisson Ratio**	**Thermal Expansion [10^{-6}/^oC]**	**T_g [^oC]**	**T_m [^oC]**	**Process Temperature [^oC]**	**Heat Deflection Temperature [^oC]**	**Fracture Toughness G_{IC} [KJ/m^2]**	**Density [gr/cc]**
Θερμοπλαστικά	**Μέτρο Ελαστικό-τητας [GPa}**	**Εφελκυστική Αντοχή [MPa]**	**Επιμήκυνση κατά τον Εφελκυσμό [%]**	**Λόγος Poisson**	**Θερμική Διαστολή [10^{-6}/^oC]**	**T_g [^oC]**	**T_m [^oC]**	**Θερμοκρασία κατά τη Διαδικασία [^oC]**	**H.D.T. [^oC]**	**Σκληρότητα κατά τη θραύση G_{IC} [KJ/m^2]**	**Πυκνότητα [gr/cc]**
PEEK	3.24	100	50	0.4	47	143	343	400	160	4.03	1.32
PPS	3.3	82.7	5	0.37	49	90	290	343	135	-	1.36
PSUL	2.48	70.3	75	0.37	56	190	-	300	174	2.45	1.24
PEI	3	105	60	0.37	56	217	-	343	200	2.8	1.27
PAI	2.756	89.57	30	0.37	36	243	-	300	274	3.5	1.4
K-III	3.76	102	14	0.365	-	250	-	-	-	1.9	1.31
LARC-TPI	3.72	119.2	5	0.36	35	264	325	343	-	1	1.37

3. Διαδικασίες παραγωγής

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 τη στερεοποίηση του συνδετικού υλικού και 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 στο δομικό σχεδιασμό. Για το λόγο αυτό ο σχεδιαστής απαιτείται να γνωρίζει τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς, το κόστος, την πορεία σχεδιασμού, τον όγκο και τις τυπικές χρήσεις διαφόρων παραγωγικών διαδικασιών. Κατά το σχεδιασμό ενός δομικού στοιχείου από σύνθετα υλικά, το υλικό σχεδιάζεται παράλληλα με την δόμηση. Λόγω αυτής της παραμέτρου, μπορούν να σχεδιαστούν κατασκευές υψηλών απαιτήσεων οι οποίες και επιβάλλουν στον σχεδιαστή τον τρόπο παραγωγής του υλικού. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών παραγωγής σύνθετων 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 κατωτέρω αναλυτικά.

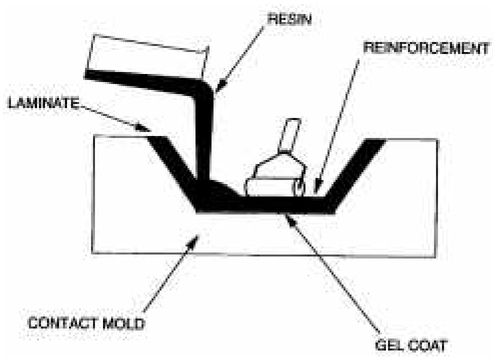
Η επεξεργασία των πολυμερών συνδετικών υλικών περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:

1. Τοποθέτηση των ινών στο εκμαγείο κατά τον επιθυμητό προσανατολισμό
2. Εμποτισμό (*impregnation*) των ινών με ρητίνες
3. Στερεοποίηση (*consolidation*) των εμποτισμένων ινών και απομάκρυνση του περιττού όγκου ρητινών, του αέρα και λοιπών πτητικών ουσιών (*volatiles*)
4. Στερεοποίηση του πολυμερούς
5. Εξαγωγή από το εκμαγείο
6. Τελικές επεξεργασίες, όπως φινίρισμα κλπ.

Πολλές διαδικασίες παραγωγής διαφέρουν όσον αφορά στον τρόπο που γίνονται οι παραπάνω εργασίες, πλην όμως εκτελούνται όλες. Μερικές από τις εργασίες μπορούν να συνδυαστούν σε ένα απλούστερο βήμα για οικονομία χρόνου, π.χ. στη διαδικασία της περιέλιξης, η τοποθέτηση ινών, ο εμποτισμός και η στερεοποίηση γίνονται ταυτόχρονα. Μερικές από τις εργασίες μπορούν να προηγηθούν άλλων, όπως π.χ. ο εμποτισμός (*impregnation*) των προκατασκευασμένων στρώσεων (*prepreg*) που χρησιμοποιούνται διαδοχικά στην χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης της διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*). Οι πολυάριθμοι τρόποι επεξεργασίας του υλικού έχουν σημαντική επίδραση στο κόστος, στην πορεία παραγωγής, την ποιότητα και την απόδοση του τελικού προϊόντος. Κάθε μέθοδος επεξεργασίας έχει εγγενή πλεονεκτήματα και περιορισμούς που επηρεάζουν την κατασκευή και τον σχεδιασμό του τελικού προϊόντος.

3.1 Χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης-«hand lay-up»

Η τεχνική της χειρωνακτικής διαδικασίας μόρφωσης μιας διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*), ονομάζεται και *wet hand lay-up*, είναι η πιο απλή και διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής. Βασικά περιλαμβάνει τη 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. 3.1: Χειρωνακτική διαδικασία διαστρωμάτωσης

Η προετοιμασία του εκμαγείου (καλουπιού) είναι από τα πιο κρίσιμα βήματα της διαδικασίας. Το καλούπι μπορεί να είναι από ξύλο, πηλό, πλαστικό, σύνθετο υλικό ή μεταλλικό και εξαρτάται από τον αριθμό των τμημάτων, τη θερμοκρασία στερεοποίησης, την πίεση κλπ. Πολλές φορές, χρησιμοποιούνται μόνιμα καλούπια τα οποία συνήθως είναι από μέταλλο. Τα καλούπια που είναι φτιαγμένα από σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή μικρού όγκου προϊόντων επειδή δεν αποδίδουν καλά σε επαναλαμβανόμενη χρήση. Το καλούπι μπορεί να είναι αρσενικού ή θηλυκού τύπου, ανάλογα με την πλευρά που απαιτείται να είναι λεία. Στο καλούπι απλώνεται επίσης μία επικάλυψη από απελευθερωτικό μέσο (*release agent*) για να διευκολύνει την απομάκρυνση του τελικού τμήματος. Αυτό το μέσο είναι κερί κοινής χρήσης (*wax*), αλκοόλη πολυβινυλίου (*poly-vinyl alcohol*), σιλικόνη (*silicones*) ή απελευθερωτικά χαρτιά (*release papers*). Η επιλογή του απελευθερωτικού μέσου εξαρτάται από τον τύπο του υλικού που θα μπει στο καλούπι και τον επιθυμητό βαθμό λείας επιφάνειας και λάμψης του τελικού προϊόντος.

Μετά την προετοιμασία του καλουπιού εφαρμόζεται μια επικάλυψη ζελέ για να επιτευχθεί μία καλή επιφάνεια στο τμήμα που καλουπώνεται. Η επικάλυψη είναι συνήθως πολυεστερική, πληρωμένη με ανόργανη ύλη (*mineral-filled*) και χρωματισμένη (*pigmented*) σε μη ενισχυμένη στρώση. Αυτή η στρώση ρητίνης εφαρμόζεται στο καλούπι πριν τις ενισχύσεις. Για το λόγο αυτό, η επιφάνεια του ζελέ καθίσταται η εξωτερική επιφάνεια της στρώσης όταν το καλούπωμα έχει ολοκληρωθεί. Αυτή η επιφάνεια σχηματίζει ένα προστατευτικό στρώμα μέσα στο οποίο δεν εισχωρούν οι ενισχυτικές ίνες και το προϊόν μπορεί να μην απαιτεί καμία επακόλουθη τελική επεξεργασία.

Τα τελικά βήματα περιλαμβάνουν την προετοιμασία του υλικού, την τοποθέτηση των ινών και τη στερεοποίηση. Οι ίνες εφαρμόζονται σε μορφή κοντών ινών (*chopped strand mat*), υφάσματος (*cloth*), ή πλεκτής δέσμης ινών (*woven roving*). Προμετρημένες ρητίνες και καταλύτες αναμιγνύονται επιμελώς. Κατόπιν το μείγμα των ρητινών εφαρμόζεται στις ίνες. Για τη συμπίεση του υλικού στο καλούπι και για την εξασφάλιση της απομάκρυνσης των θυλάκων αέρα χρησιμοποιούνται χειροκίνητα οδοντωτά ρολά. Η στερεοποίηση συνήθως επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία δωματίου και το τελικό καλουπωμένο τμήμα αφαιρείται τραβώντας το από το καλούπι. Μερικά από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου φαίνονται στον Πιν. 3.1 και οι πλέον τυπικές εφαρμογές φαίνονται στον Πιν. 3.2.

Ο ρυθμός παραγωγής και το κόστος της διαδικασίας της χειρωνακτικής μόρφωσης διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*) ποικίλει και εξαρτάται από τις ίνες και το συνδετικό υλικό που χρησιμοποιούνται, το μέγεθος των τμημάτων που κατασκευάζονται καθώς και την επεξεργασία που χρησιμοποιείται. Το κόστος των εργαλείων (*tooling*) εξαρτάται από τον αριθμό των τμημάτων που κατασκευάζονται διότι για μεγαλύτερες απαιτήσεις (*runs*) απαιτούνται υψηλότερης ποιότητας καλούπια. Ένα νέο καλούπι κατασκευάζεται για κάθε νέο αντικείμενο. Το κόστος του εξοπλισμού εξαρτάται από την πορεία παραγωγής εξαιτίας της ανάγκης να στηθούν αρκετές σειρές που θα δουλεύουν με υψηλές ταχύτητες για υψηλό ρυθμό παραγωγής. Το κόστος ανά τμήμα ελαχιστοποιείται επιλέγοντας την κατάλληλη κατασκευή του καλουπιού και ρυθμίζοντας τους ρυθμούς παραγωγής με το κατάλληλο εξοπλισμό. Τελικά, το κόστος ανά τμήμα επηρεάζεται από την επιθυμητή ποιότητα λόγω της ανάγκης είτε ανειδίκευτων ή ειδικευμένων εργατών. Το κόστος ανά μονάδας βάρους μπορεί να είναι έως $20/ Kg για υψηλής ποιότητας τμήματα αεροσκαφών που χρησιμοποιούν ίνες γυαλιού.

Σχ. 3.2: Πιστόλι ψεκασμού

Τμηματική αυτοματοποίηση της διαδικασίας της χειρωνακτικής μόρφωσης διαστρωμάτωσης πραγματοποιείται στη διαδικασία ψεκασμού (*spray up*), η οποία διαφέρει από τη χειρωνακτική μέθοδο στον τρόπο εφαρμογής της ρητίνης και της ενίσχυσης. Η συνεχής ίνα κόπτεται σε κοντά τμήματα (*chopped*) και ψεκάζεται στο καλούπι ακαριαία με τη ρητίνη χρησιμοποιώντας *chopper gun*. Ο ψεκασμός (*spray up*) είναι μια παλιά μέθοδος, που κυρίως χρησιμοποιείτο για την παραγωγή τμημάτων συνεχούς πάχους: τμήματα σκελετού φορτηγών (*truck body parts*), μικρές βάρκες (*small boats*), μονάδες λουτρού (*shower units*) και διάφορα τμήματα αυτοκινήτων (*automotive parts*). Εφόσον ο χειριστής ελέγχει εξ' ολοκλήρου την απόθεση του υλικού στο καλούπι, η ποιότητα του προϊόντος εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από τις ικανότητες του χειριστή. Οι φυσικές ιδιότητες του προϊόντος που επιτυγχάνονται είναι κατώτερες και όχι ομοιόμορφες από τμήμα σε τμήμα. Το κόστος των *chopper gun* και άλλων ειδικών εργαλείων επιβαρύνουν το συνολικό κόστος. Έχει δοκιμαστεί ολοκληρωτική αυτοματοποίηση της μεθόδου αυτής, βρέθηκε όμως πολύ ακριβή και αναποτελεσματική σε σχέση με το κόστος του εξοπλισμού και των εκτελούμενων εργασιών.

Πιν. 3.1 : Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της διαδικασίας Χειρωνακτικής Διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*).

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
• Μπορούν να παραχθούν μεγάλα τμήματα με πολύπλοκη γεωμετρία • Ελάχιστη επένδυση σε εξοπλισμό • Ελάχιστο κόστος των εκτελούμενων εργασιών • Περιεχόμενο κενών κάτω του 1% • Είναι πιθανή η κατασκευή «sandwich» • Μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν πρόσθετα και κατασκευαστικές ενισχύσεις • Μπορούν να κατασκευαστούν τμήματα που απαιτούν εξαίρετα τελειώματα • Δεν είναι απαραίτητοι κλίβανοι στερεοποίησης	• Μόνο μία επιφάνεια του καλουπιασμένου τμήματος είναι λεία • Η τελική ποιότητα εξαρτάται από την ικανότητα των εργατών • Απαιτείται κόπος ανά εργασία • Χαμηλός ρυθμός παραγωγής • Υψηλή έκλυση πτητικών ουσιών • Είναι δύσκολο να διατηρηθεί η ομοιομορφία του προϊόντος • Απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι στερεοποίησης σε θερμοκρασίες δωματίου.

Πιν. 3.2 : Εφαρμογές της διαδικασίας Χειρωνακτικής Διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*).

Εφαρμογές	**Προϊόντα**
Ναυπηγική	Βάρκες, κελύφη σκαφών (*boat hulls*), αγωγοί (*ducts*), πισίνες, δεξαμενές, έπιπλα κλπ.
Αεροσκάφη	Μηχανοκίνητα ακροφύσια πυραύλων (*rocket motor nozzles*) και λοιπά τμήματα αεροσκαφών
Διάφορες κατασκευές	Φίλτρα κλιβάνων, στηρίγματα κατασκευών, επίπεδα και κυματοειδή φύλλα, αντιδιαβρωτική προστασία αγωγών (*corrosion duct work*), προστατευτικά καλύμματα (*housings*), σωληνώσεις.
Καταναλωτικά αγαθά	Τμήματα ποδηλάτων, τμήματα φορτηγών

3.2 Διαστρωμάτωση με προκατασκευασμένες στρώσεις-«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 net-resin*) 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.

Τα *prepregs* συνήθως παρέχονται σε μορφή ρολών με πλάτη 30 έως 60cm. Συνήθως κόβονται ώστε να ταιριάζουν στο καλούπι και να απλώνονται στρώση-στρώση μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Εφόσον η ρητίνη έχει μερικώς στερεοποιηθεί, τα *prepregs* έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής (*shelf life*) η οποία μπορεί να επεκταθεί με την αποθήκευσή τους σε ψυγεία. Ένας κλίβανος ή αναρρόφηση (*autoclave or vacuum*) συνήθως απαιτείται για να υποβοηθήσει στη στερεοποίηση τμημάτων που έχουν διαμορφωθεί με προκατασκευασμένες στρώσεις (*prepregs*). Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου παρουσιάζονται στον Πιν.3.3.

Τα *prepregs* που χρησιμοποιούν θερμοπλαστικά (*thermoplastics*) συνδετικά υλικά είναι διαθέσιμα με τις περισσότερες μορφές ινών. Χρειάζεται να θερμανθούν για να παραχθούν οπές (*tack*) και να σκεπαστούν (*drape*) αφού συνήθως είναι σκληρά σε θερμοκρασία δωματίου. Η επεξεργασία των θερμοπλαστικών (*thermoplastics*) διαφέρει από την επεξεργασία των θερμικά διαμορφούμενων ρητινών (*thermosets*). Οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι υψηλότερες στα θερμοπλαστικά (*thermoplastics*) διότι η πυκνότητα τους πρέπει να μειωθεί με θέρμανση κατά την επεξεργασία. Στη συνέχεια η στερεοποίηση αντικαθίσταται απλώς χαμηλώνοντας τη θερμοκρασία.

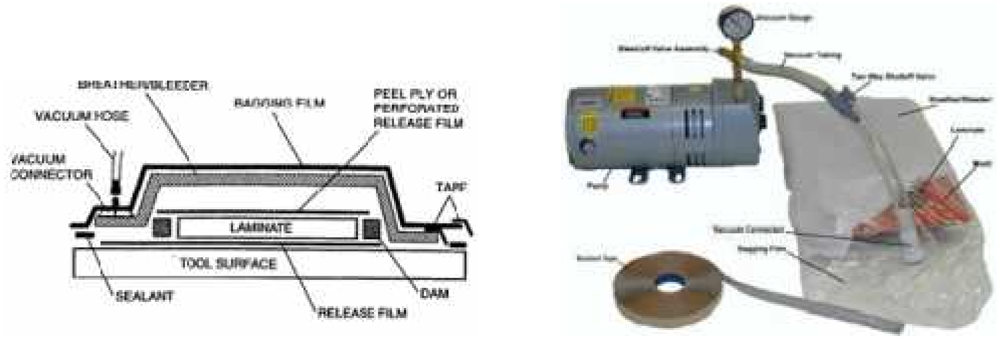
Πιν. 3.3 : Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της διαδικασίας Διαμόρφωσης με Προκατασκευασμένες Στρώσεις (*prepreg lay-up*).

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
• Υψηλοί λόγοι όγκου ινών • Ομοιόμορφη κατανομή ινών • Απλοποιημένη κατασκευή	• Απαιτείται κόπος ανά εργασία και είναι αργή διαδικασία • Πιο ακριβός εξοπλισμός στερεοποίησης • Αύξηση του κόστους για την κατασκευή των προκατασκευασμένων (*prepreg*)

3.3 Μόρφωση σύνθετου υλικού μέσω περιβλήματος – «bag molding»

Στη διαστρωμάτωση, και πριν αυτή στερεοποιηθεί, εφαρμόζεται μία ομοιόμορφη πίεση βελτιώνοντας τη 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 στη 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. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι στην εφαρμογή της πίεσης στη διαστρωμάτωση: α) *pressure bag* β) *vaccum bag* και γ) διαδικασία με κλίβανο (*autoclave processing*), με τις δύο τελευταίες να είναι οι πιο δημοφιλείς.

Τα περιβλήματα για τη μόρφωση *vaccum bags* επιτρέπουν την παραγωγή μεγάλων, υψηλής πυκνότητας και χαμηλού κόστους τμημάτων σύνθετων υλικών. Τα κύρια πλεονεκτήματα της *vacuum bagging* είναι ότι ο εξοπλισμός αναρρόφησης (*vacuuming)* και στερεοποίησης (*curing*) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία τμημάτων. Το μέγεθος του τμήματος που μπορεί να φτιαχτεί με μόρφωση μέσω περιβλήματος (*bag molding*) περιορίζεται μόνο από τον εξοπλισμό στερεοποίησης, συμπεριλαμβάνεται το μέγεθος του φούρνου στερεοποίησης ή του κλιβάνου. Πάντως η ποιότητα του τμήματος εξαρτάται από τις ικανότητες του εργάτη.



Σχ. 3.2: Διαδικασία μέσω περιβλήματος (τεχνική και εξοπλισμός)

Οι διαδικασίες *bagging* για τα θερμοπλαστικά (*thermoplastics*) είναι παρόμοιες με τα θερμικά διαμορφούμενα υλικά (*thermosets*) και διαφέρουν μόνο στο ότι τα υλικά *bagging* πρέπει να είναι ικανά να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Υλικά όπως *Kapton vacaloy* χρησιμοποιούνται επειδή αντέχουν έως τους 370^oC. Τα περισσότερα από τα θερμοπλαστικά (*thermoplastics*) λιώνουν σε ένα εύρος θερμοκρασιών 260-370^oC σε σύγκριση με τους 120-180^oC μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας των θερμικά διαμορφούμενων (*thermosets*). Το καλούπωμα των θερμοπλαστικών (*thermoplastics*) πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη τις θερμοκρασίες που απαιτούνται για να αποκτηθεί καλή ροή και συμπίεση (*good flow και compaction*). Οι υψηλές πυκνότητες των θερμοπλαστικών (*thermoplastics*) κάνουν τη διαδικασία της στερεοποίησης πολύπλοκη και μπορεί να είναι απαραίτητες υψηλές πιέσεις. Τα θερμοπλαστικά (*thermoplastics*) χρησιμοποιούνται για να αποκτήσουν βελτιωμένες ιδιότητες σε ζεστό και υγρό περιβάλλον και αυξημένη αντοχή πρόσκρουσης. Το υψηλό κόστος παραγωγής των θερμοπλαστικών (*thermoplastics*) εξισορροπείται μερικές φορές με τα πλεονεκτήματα της παραγωγής, όπως το ότι δεν απαιτείται ψύξη, και το μειωμένο κόστος μεταφοράς. Ειδικές εφαρμογές που περιλαμβάνουν υψηλή αντοχή σε πρόσκρουση και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες περιλαμβάνονται στην αεροδιαστημική και τους ιατρικούς εξοπλισμούς (όπου είναι κρίσιμες απόδοση και ποιότητα αλλά το κόστος είναι δευτερεύον), στην επεξεργασία φαγητού, σε θήκες για κάμερες και ρολόγια, ηλεκτρικούς και ηλεκτρονικούς εξοπλισμούς κλπ.

3.4 Διαμόρφωση μεσω κλιβάνου-«autoclave processing»

Οι κλίβανοι (*autoclaves*) είναι δοχεία υπό πίεση που περιέχουν πεπιεσμένο αέρα κατά τη διάρκεια της 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 μέσω 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 του 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.

Η αύξηση της πίεσης ασκεί μηχανικές δυνάμεις στο μη στερεοποιημένο σύνθετο υλικό, αυξάνει την αποδοτικότητα της μεταφοράς των πτητικών ουσιών στις εξόδους αναρρόφησης και προκαλεί αυξημένη ροή της ρητίνης. Ο όγκος του παγιδευμένου αέρα και της εκλυόμενης πτητικής ουσίας μειώνεται αναλογικά με την εφαρμοζόμενη πίεση αναρρόφησης σε δεδομένη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, το πορώδες και τα διάκενα ελαχιστοποιούνται. Επίσης η μεταφορά των πτητικών ουσιών του χυτού πολυμερούς στις εξόδους αναρρόφησης διευκολύνεται σε υψηλές πιέσεις.

Η πλειοψηφία των κλιβάνων (*autoclaves*) για την παραγωγή των σύνθετων υλικών είναι κυλινδρικά δοχεία υπό πίεση με θολωτά άκρα (*domed ends*), ένα από τα οποία είναι η πόρτα ή είσοδος. Οι κλίβανοι συνήθως στηρίζονται οριζοντίως στο δάπεδο του εργοστασίου ώστε να υπάρχει εύκολη πρόσβαση στο εσωτερικό. Η διάμετρος είναι ο περιοριστικός όρος στο μέγεθος. Κλίβανοι με μεγάλες διαμέτρους απαιτούν πολύ παχιά τοιχώματα και έτσι καθίστανται πολύ ακριβοί. Οι κλίβανοι που έχουν αναπτυχθεί περισσότερο είναι διαμέτρου περίπου 1m, ενώ η παραγωγή των κλιβάνων κυμαίνεται για διαμέτρους 1 έως 8m.

Τα εξαρτήματα των κλιβάνων (*tools for autoclaves*) είναι μορφής αρσενικού και θηλυκού. Η επιφάνεια του τμήματος που είναι προς την επιφάνεια του εργαλείου είναι γεωμετρικά πιο ακριβής και έχει καλύτερο τελείωμα επιφάνειας από την επιφάνεια του περιβλήματος (*bag*). Η επιλογή των υλικών για την εκτελούμενη εργασία βασίζεται συνήθως στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και των απαιτούμενων ποσοτήτων παραγωγής. Ειδικοί εργάτες του πηλού και του ξύλου χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πρωτότυπων τμημάτων με χαμηλή θερμοκρασία στερεοποίησης. Για την παραγωγή τμημάτων χρησιμοποιούνται έγχυτα εποξικά καλούπια (*cast epoxy tooling*) πολυεστέρων, αλουμινίου και χάλυβα.

Οι λειτουργίες του κλιβάνου δαπανούν μεγάλα ποσά ενέργειας και υλικών, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανικών αερίων (το άζωτο χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης ως εναλλακτικό των υψηλής πίεσης συμπιεστών) και υλικά της διαδικασίας μόρφωσης μέσω περιβλήματος (*bagging*). Ο κύκλος στερεοποίησης ενός τμήματος μέσα στον κλίβανο είναι μακρύς και διεξοδικός. Στην περίπτωση τμημάτων μεγάλου πάχους, ο κύκλος στερεοποίησης μπορεί να χρειάζεται να επαναληφθεί αρκετές φορές μέχρι να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση. Συναρμολογούμενα σύνεργα καλουπιών είναι περισσότερο οικονομικά στην περίπτωση μεγάλων κύκλων παραγωγής, εν συγκρίσει με αυτά των μικρών τμημάτων σύνθετων υλικών. Για μεγάλα τμήματα που υπερβαίνουν το μέγεθος των διαθέσιμων συμπιεστών, η επεξεργασία μέσω κλιβάνου είναι η πιο οικονομική επιλογή.

Ο ρυθμός παραγωγής εξαρτάται από πολλούς συντελεστές συμπεριλαμβανομένων των εργαλείων που χρησιμοποιούνται, το μέγεθος των τμημάτων και των αριθμό των στρώσεων. Το τμήμα πρέπει πρώτα να μορφωθεί με τη χειρωνακτική διαδικασία διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*) η οποία είναι χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό το μέγεθος του τμήματος καθορίζει το χρόνο αναρρόφησης. Ο ρυθμός παραγωγής του κλιβάνου επίσης καθορίζεται από το προφίλ της στερεοποίησης, το οποίο περιλαμβάνει τη θέρμανση, τη στερεοποίηση και το χρόνο ψύξης. Το μέγεθος του εργαλείου που χρησιμοποιείται επίσης επηρεάζει το ρυθμό παραγωγής επειδή και αυτό πρέπει να θερμανθεί. Μικρά τμήματα μπορούν να στερεοποιηθούν σε περίπου 3-5 ώρες ενώ τα μεγάλα απαιτούν από 12 έως 16 ώρες.

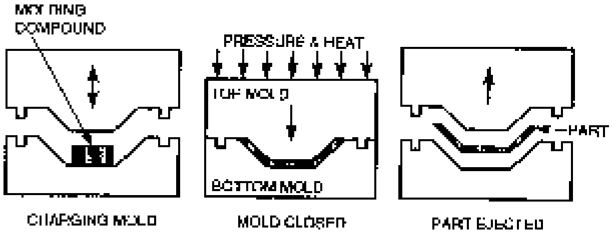
3.5 Εκμαγείο συμπίεσης – compression molding

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 με το εκμαγείο συμπίεσης (*compression molding*) είναι μια απλή και καλά εδραιωμένη διαδικασία. Ελαχιστοποιεί το κόστος συναρμολόγησης του τμήματος, σχεδόν εξαλείφει τα πλεονάζοντα υλικά, μειώνει τις δευτερογενείς τελικές επεξεργασίες και απαιτεί ελάχιστο φόρτο εργασίας. Η διαδικασία μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί, επιτρέποντας υψηλό όγκο παραγωγής με πολύ καλή ομοιομορφία. Τα μικρά τμήματα μπορούν να παραχθούν αρκετά γρήγορα (15 τμήματα το λεπτό) ενώ τα μεγαλύτερα τμήματα (π.χ. προφυλακτήρες αυτοκινήτου) με ρυθμό μεγαλύτερο των 24 τμημάτων την ώρα.

Η πρέσα είναι το πιο σημαντικό και ακριβό κομμάτι του εξοπλισμού σ’ αυτή τη διαδικασία. Οι πρέσες αυτές είναι συνήθως κάθετης δράσης με κινούμενα αρσενικά και θηλυκά τμήματα κατασκευασμένα από χάλυβα. Οι επιφάνειες των καλουπιών είναι γυαλισμένες και μερικές φορές επιχρωμιωμένες για να αυξηθεί η σκληρότητα της επιφάνειας. Τα μεγέθη της πρέσας κυμαίνονται από 100 έως 4.000t παράγοντας τμήματα κάτω του 1 kgr έως και πάνω από 75 kgr. Ο προαιρετικός εξοπλισμός περιλαμβάνει προθερμαντήρες και αρχικές μήτρες που επιτρέπουν γρηγορότερο κύκλο καλουπώματος και μείωση του παγιδευμένου αέρα στο τελικό τμήμα.

Η μέθοδος αυτή δεν επιτρέπει υψηλό λόγο όγκου συνεχών ινών. Για το λόγο αυτό, τα τμήματα που κατασκευάζονται δεν είναι κατάλληλα για κύριες κατασκευές παρόλο που χρησιμοποιούνται σε δευτερεύουσες κατασκευές. Αυτά τα εξαρτήματα της διαδικασίας με το εκμαγείο συμπίεσης (*compression molding*), χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μεγάλη δυσκαμψία μορφώνοντας νεύρα και φλάντζες μέσα στο τμήμα.



Σχ. 3.3: Διαδικασία με εκμαγείο συμπύκνωσης

Τα πιο συνήθη μίγματα που χρησιμοποιούνται είναι τα BMC (*Bulk Molding Compound*) και SMC (*Sheet Molding Compound*). Επίσης χρησιμοποιούνται κοντές ίνες, *fiber performs* και *prepregs*.

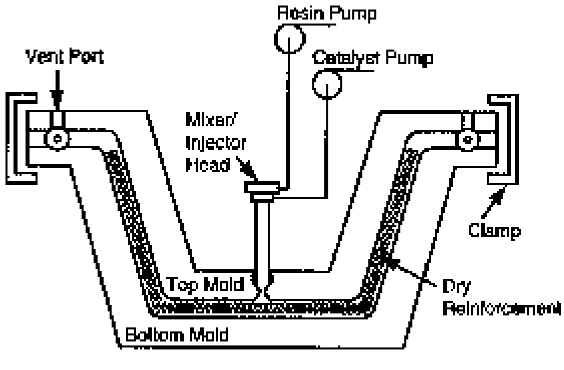
Το BMC (*Bulk Molding Compound*) είναι ένα μίγμα σαν ζύμη με λόγο όγκου ινών να κυμαίνεται από 20-50%. Ένας συνδυασμός υλικών πληρώσεως (ρόζοι ξύλου, οργανικά, κυτταρίνη, κλπ.) αναμιγνύονται με τη ρητίνη σε έναν αναμικτήρα με λεπίδες. Οι ενισχύσεις μπορούν να είναι από γυαλί, κυτταρίνη, βαμβάκι ή άλλα ινώδη υλικά. Η παρτίδα αυτή υλικών τοποθετείται στο καλούπι στους 150 έως 200$_{o}$C και ασκείται πίεση περίπου 3-4MPa.

Το SMC (*Sheet Molding Compound*) διαθέτει μακρύτερες ίνες και μεγαλύτερο λόγο όγκου ινών από ότι το BMC (*Bulk Molding Compound*). Μπορεί να διαμορφωθεί σε παχιά ή λεπτά τμήματα διατηρώντας στο μέγιστο την ακεραιότητα των ινών. Τα φύλλα του SMC (*Sheet Molding Compound*) περιέχουν ρητίνη, υλικά πληρώσεως, καταλύτες και προεμποτισμένες ενισχύσεις, οι οποίες κόβονται σε φύλλα κατάλληλου μεγέθους για να τοποθετηθούν στο θερμό καλούπι. Η θερμοκρασία στο καλούπι είναι γενικά περίπου 150 έως 200^{o}C και ασκείται πίεση περίπου 7-14MPa.

3.6 Καλούπι ρητινενέσεως - 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.

Η διαδικασία Resin Transfer Molding (RTM) μπορεί να παράγει σύνθετα υλικά με μεγάλες συνεχείς ίνες σε πολύπλοκα σχήματα και σχετικά μικρούς χρονικά κύκλους. Η διαδικασία αυτή διαφέρει από τις άλλες στο ότι όλες οι ενισχύσεις-ίνες τοποθετούνται ξηρές στο καλούπι πριν την εφαρμογή της ρητίνης. Αυτό 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. Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές της βασικής διαδικασίας Resin Transfer Molding (RTM).



Σχ. 3.4: Καλούπι ρητινενέσεως

Στη διαδικασία *Vacuum Assisted Resin Injection Molding (VARIM)* εφαρμόζεται αναρρόφηση στην έξοδο του καλουπιού και η ρητίνη εισάγεται στο καλούπι επίσης με αναρρόφηση. Αφού εφαρμοστεί αναρρόφηση αντί πίεσης, το μισό μέρος του καλουπιού μπορεί να αντικατασταθεί από ένα περίβλημα (*vacuum bag*). Η ροή της ρητίνης μπορεί να διευκολυνθεί με μικροαυλάκια που φτιάχνονται στο καλούπι ή από μια διανομή τοποθετημένη στη μέση κάτω από το περίβλημα (*vacuum bag*). Ορισμένες φάσεις αυτής της τεχνολογίας έχουν γίνει ευρεσιτεχνίες και διαφημίζονται με το όνομα SCRIMP. Εφόσον η διαφορική πίεση είναι πολύ χαμηλότερη από την πίεση που ασκείται στο συμβατικό RTM, το κόστος του καλουπιού μπορεί να μειωθεί σημαντικά, και τα βαριά μεταλλικά καλούπια που απαιτούνται στην RTM για να διατηρούν την ατμοσφαιρική πίεση, μπορούν να αντικατασταθούν από ελαφρύτερα καλούπια από ξύλο, εποξικά ή χάλυβα. Σε αυτή τη διαδικασία ο χρόνος του κύκλου κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως λίγες ώρες για πιο πολύπλοκα τμήματα.

Στη διαδικασία *preform molding* το υλικό του καλουπιού είναι συνήθως χάλυβας. Ένα *preform* τοποθετείται στο καλούπι και αντλείται στο ανοικτό εργαλείο (*open tooling*) μία μετρημένη ποσότητα ρητίνης. Αυτό στη συνέχεια κλείνει και συμπιέζεται προκαλώντας τη ροή της ρητίνης και τον εμποτισμό του *preform*. Ο χρόνος κύκλου για μεγάλα τμήματα με ομοιόμορφο πάχος είναι συχνά τρία λεπτά ή και λιγότερο.

Το *preform* γίνεται συνήθως με ψεκασμό κοντών ινών σε ένα διάτρητο προπέτασμα (*perforated screen*) και κατόπιν αρχίζει η αναρρόφηση μέχρι το συγκολλητικό (*binder*), το οποίο ψεκάζεται μαζί με την ενίσχυση για να συγκρατεί τις ίνες ενωμένες, να έχει το χρόνο να στερεοποιηθεί. Το συγκολλητικό είναι το μέσο στερεοποίησης που χρησιμοποιείται για να συγκρατεί τις δέσμες των ινών πριν η ρητίνη εισαχθεί στο σύστημα. Το συγκολλητικό βασίζεται στο 75% του βάρους του σε νερό με ένα συγκολλητικό μέσο (*corresponding bonding agent*) το οποίο συγκρατεί τις ίνες. Ο τύπος του συγκολλητικού που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τον τύπο των ινών και της ρητίνης που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία, έτσι ώστε το συγκολλητικό να μη δημιουργεί πρόβλημα αλληλεπίδρασης μεταξύ ινών και συγκολλητικού.

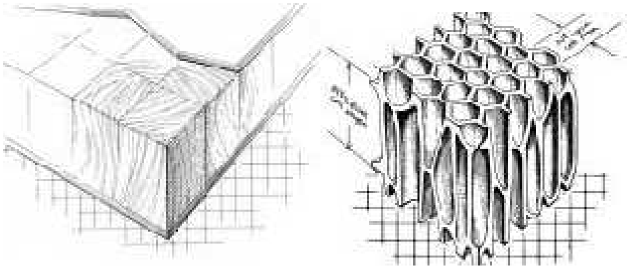
Η *Structural Reaction Injection Molding (SRIM)* χρησιμοποιεί ένα *preform* το οποίο τοποθετείται στο καλούπι πριν εισαχθεί η ρητίνη. Επειδή η ρητίνη και το αντιδραστήριο είναι πολύ αντιδραστικά αποθηκεύονται σε δύο διαφορετικές δεξαμενές. Από τις δύο δεξαμενές εισάγονται σε ένα θάλαμο ανάμιξης και το μίγμα αντλείται στο καλούπι όπου στερεοποιείται γρήγορα. Ο χρόνος περίπου ενός λεπτού του κύκλου είναι επαρκής για την παραγωγή σχετικά μικρών τμημάτων.

Στην *Flexible Resin Transfer Molding (FRTM)*, αντί να χρησιμοποιηθεί άκαμπτο καλούπι χρησιμοποιούνται δύο ελαστομερή διαφράγματα που περιέχουν τις ξηρές ίνες. Η ρητίνη εισέρχεται μέσα στο ευλύγιστο καλούπι με μέσα αναρρόφησης που εφαρμόζονται στις εξόδους του. Αφού οι ίνες έχουν εμποτιστεί με ρητίνη, σχηματίζεται στη συνέχεια το ευλύγιστο καλούπι ώστε να μορφωθεί το επιθυμητό τμήμα. Εφόσον οι ίνες τοποθετούνται σε ένα επίπεδο διάφραγμα, ο χρόνος και η εργασία που απαιτούνται με τη παραδοσιακή *Resin Transfer Molding (RTM)* διαστρωμάτωση σε ένα *contoured mold* έχουν εικονικά εξαλειφθεί.

Οι φυσικές ιδιότητες των καλουπωμένων τμημάτων της *Resin Transfer Molding (RTM)* τείνουν να γίνουν πολύ σταθερές. Αυτό οφείλεται στο κόστος ενός σχετικά υψηλού συντελεστή απωλειών στην περίμετρο του τμήματος. Συνήθως οι γωνίες και οι ακμές απαιτείται να είναι πλούσιες σε ρητίνη καθιστώντας δύσκολη την επίτευξη ομοιόμορφου λόγου όγκου ινών στο τμήμα. Όταν χρησιμοποιούνται χαμηλού κόστους υλικά στο καλούπι, οι πιέσεις σε αυτό πρέπει να είναι μικρές, πράγμα που οδηγεί σε αργούς χρόνους πληρώσεως και περιορισμένο λόγο όγκου ινών. Η μικρή αντοχή του καλουπιού στη θερμοκρασία, μαζί με την ανεπαρκή μεταφορά θερμότητας, περιορίζουν τη χημεία της ρητίνης να καθυστερήσει τους χρόνους στερεοποίησης με ελάχιστα εξωθερμικά για να αποτρέψουν την αποδιοργάνωση της ρητίνης ή τη ζημιά των εργαλείων. Οι ενισχύσεις γενικά κόβονται και τοποθετούνται στο καλούπι με το χέρι για κάθε καλούπωμα, πράγμα το οποίο αυξάνει σημαντικά το χρόνο του κύκλου για περίπλοκα τμήματα. Ένας μεγάλος περιορισμός είναι το γεγονός ότι ο σχεδιασμός του καλουπιού είναι πολύ κρίσιμος και απαιτεί μεγάλες ικανότητες. Ο σχεδιασμός του καλουπιού, ιδίως ο σχεδιασμός των εισόδων και εξόδων και η τοποθέτηση αυτών πραγματοποιείται όλο και περισσότερο χρησιμοποιώντας λογισμικά πακέτα που εξομοιώνουν τη ροή της ρητίνης στην κοιλότητα του καλουπιού.

Το κόστος και ο χρόνος για να φτιαχτεί ένα *preform (πρόσχημα*) της *Resin Transfer Molding (RTM)* είναι σημαντικά. Η απουσία ενισχύσεων στις ακμές των τμημάτων μπορεί να είναι σοβαρός περιορισμός αν απαιτούνται νεύρα και προεξοχές στο σχεδιασμό. Τα νεύρα και οι προεξοχές μπορούν να τοποθετηθούν χωριστά στην κοιλότητα του εργαλείου, αλλά είναι δύσκολο το να διατηρούνται οι ενισχύσεις στις ακμές ενώ αποφεύγεται ο εμπλουτισμός με ρητίνη στις γωνίες του τμήματος. Οι απώλειες τμημάτων (*scrap losses*) επίσης κοστίζουν και το κόστος αντικατάστασης μπορεί να είναι σημαντικό αν ένα μεγάλο εξάρτημα είναι ελαττωματικό. Η παραγωγή καλουπιών με οπές είναι δύσκολη στην διαδικασία *Resin Transfer Molding (RTM).* Συνήθως, τα τμήματα περιορίζονται σε πάχη περίπου 12mm. Η απόκλιση στην *Resin Transfer Molding (RTM)* είναι δύσκολο να επιτευχθεί, αλλά κάποιες εφαρμογές μπορούν να επιτύχουν περίπου ± 0,2mm. Η κίνηση των ινών κατά την έγχυση της ρητίνης είναι μερικές φορές σοβαρό πρόβλημα διότι προκαλεί διαρροή και ανομοιομορφία στην έγχυση της ρητίνης (*Resin Transfer).*

Ο ρυθμός παραγωγής εξαρτάται αυστηρά από το μέγεθος και τον τύπο του τμήματος που παράγεται. Η περιοχή παραγωγής της *RTM* μπορεί να διαμορφωθεί ώστε να λειτουργεί με αρκετά καλούπια ταυτόχρονα. Μία μηχανή *RTM* μπορεί να παράγει 45Kg/min και 2-8τμήματα/ώρα, ενώ απαιτούνται 2 ώρες για την παραγωγή ενός παρόμοιου τμήματος με το ψεκασμό (*spray-up*). Π.χ ένα τμήμα μεγάλου όγκου είναι ένα *balsa-core sandwich panel*. Κάθε πανέλο είναι 3,65m επί 3,0m με πάχος που κυμαίνεται από 3,8cm έως 45,7cm. Το βάρος του πανέλου είναι 272Kg και ο χρόνος παραγωγής είναι μία βδομάδα.



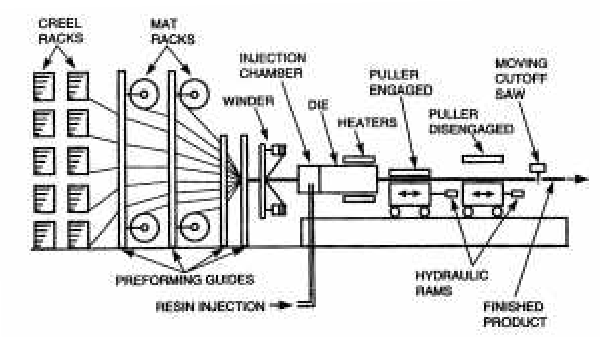
Κατασκευή πανέλου με πυρήνα Balsa Wood

Το κόστος παραγωγής της *RTM* είναι μικρότερο από την διαδικασία που χρησιμοποιεί τα *prepreg*, επειδή το κόστος των καθαρών υλικών (ινών και ρητινών) είναι σημαντικά μικρότερο. Σε κάποιες περιπτώσεις το κόστος των *RTM* έχει βρεθεί μικρότερο έως και 1/3 αυτού των διαδικασιών με *prepreg, μέσω περιβλήματος* (*vacuum bag*) για την παραγωγή του ίδιου τμήματος. Για ένα συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιώντας το ίδιο τμήμα, το κόστος παραγωγής με *RTM* έχει εκτιμηθεί στο 80% του κόστους της διαδικασίας χειρωνακτικής μόρφωσης διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*), συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού απόσβεσης (*equipment depreciation*), του κόστους των υλικών, του ρυθμού απόρριψης (*scrap rate*) και του κόστους εργασίας. Το κόστος του εξοπλισμού του RTM είναι συνήθως μικρότερο από άλλες διαδικασίες σύνθετων υλικών εκτός της διαδικασίας χειρωνακτικής μόρφωσης διαστρωμάτωσης (*hand lay-up*). Πάντως η RTM έχει λίγο πιο υψηλό κόστος εργασίας σε σχέση με την *SMC* και την *injection molding.*

3.7 Διαδικασία παραγωγής με έλξη - 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 και 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 (*cross-section*) του προϊόντος, όπως ορίζεται από τον σχεδιαστή. Οι ενισχύσεις εισέρχονται ξηρές στο θάλαμο έγχυσης (*injection chamber*), όπου εμποτίζονται με παροχετευόμενη ρητίνη υπό πίεση. Συχνά ο θάλαμος έγχυσης (*injection chamber*) είναι ολόκληρο τμήμα μήτρας. Η διατομή (*cross-section*) 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 (*moving cut off saw*) τοποθετημένο πάνω στο κινούμενο προϊόν αποκόπτει τμήματα με το επιθυμητό μήκος χωρίς να σταματήσει η διαδικασία. Το αποκοπτόμενο μήκος επιλέγεται ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά του προϊόντος που παράγεται με τη διαδικασία της έλξης.



Σχ. 3.4: Διαδικασία παραγωγής με έλξη

Οι παλινδρομικοί εξολκείς (*reciprocating pullers*) μπορούν να αντικατασταθούν από ερπυστριοφόρο εξολκέα (*caterpillar puller*) όπου δύο ελαστικές ζώνες κρατούν σφικτά το τμήμα ενώ συνεχώς έλκουν με τριβή (*friction*). Ένα λουτρό ρητίνης (*resin bath*) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εμποτισθούν οι ίνες πριν εισαχθούν στη μήτρα. Σε αυτή την περίπτωση δε χρησιμοποιούνται ο θάλαμος έγχυσης (*injection chamber*) και η δεξαμενή διατήρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης (*associated pressurization tank*). Πάντως, η χρήση του θαλάμου έγχυσης έχει το πλεονέκτημα της σχεδόν πλήρους εξάλειψης των πτητικών ουσιών (VOC=VOlatile Content) που θα προέρχονταν από το ανοικτό λουτρό ρητίνης. Οι εκπομπές στυρενίου (*styrene*) μειώνονται δραστικά, έως και στο 1% της λειτουργίας του ανοικτού λουτρού. Επίσης, οι χρόνοι έναρξης και λήξης της γραμμής παραγωγής με έλξη (*pultrusion*) μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Όταν χρησιμοποιείται ένας θάλαμος έγχυσης (*injection chamber*), οι ξηρές ίνες μπορούν να τοποθετηθούν με ακρίβεια στην είσοδο της μήτρας, πράγμα το οποίο μεταφράζεται σε βέλτιστη ομοιομορφία του υλικού. Η πίεση έγχυσης μπορεί να ρυθμιστεί και να παρακολουθείται συνεχώς σε οθόνη για τη βελτίωση του εμποτισμού των ινών.

Μπορούν να παραχθούν τόσο κλειστές διατομές (π.χ. κιβωτιοειδείς διατομές δοκών), όσο και ανοικτές διατομές (π.χ. διατομές διπλού ταυ). Στη διαδικασία της έλξης είναι ευκολότερη η παραγωγή κλειστών διατομών. Οι κλειστές διατομές, όπως οι κιβωτιοειδείς, μορφώνονται χρησιμοποιώντας ένα προεξέχον περιστρεφόμενο καλούπι/άξονα (τύπου προβόλου) (*mandrel cantilevered*) πίσω από την είσοδο της μήτρας. Στη γραμμή παραγωγής με έλξη (*pultrusion*) μπορεί να εφαρμοστεί μία περιστρεφόμενη μηχανή περιέλιξης (*rotating winder*) για να απλώσει τις ενισχύσεις υπό γωνία (συνήθως ± θ) γύρω από το προϊόν. Αυτό συνήθως χρησιμοποιείται στην κατασκευή σωλήνων και αξόνων οδήγησης (*drive shafts*). Άλλες προσθήκες στη γραμμή παραγωγής είναι οι προθερμαντήρες ινών (*fiber preheaters*) και οι θερμαντήρες με ραδιοσυχνότητα *(radio-frequency [RF] heaters*), ειδικά για παχιά τμήματα ή όταν χρησιμοποιείται ένα θερμοπλαστικό (*thermoplastic*) συνδετικό υλικό. Τα θερμοπλαστικά (*thermoplastic*) μπορούν να τροφοδοτηθούν υπό μορφή ινών αναμεμιγμένα καλά με τις ενισχύσεις. Μία άλλη επιλογή είναι η τροφοδότηση της γραμμής παραγωγής με *prepregs*, αλλά αυτό προσθέτει έναν επιπλέον χειρισμό που είναι η κατασκευή των *prepregs* και άρα επιπλέον κόστος.

Το λειτουργικό κόστος της διαδικασίας παραγωγής με έλξη (*pultrusion*) είναι χαμηλό. Το μεγαλύτερο κόστος της επεξεργασίας αυτής έγκειται στον εξοπλισμό, στις χρωμιομένες βάσεις της μήτρας, στο σχεδιασμό και το συντονισμό του συστήματος καθοδήγησης. Για τους λόγους αυτούς, η διαδικασία παραγωγής με έλξη ταιριάζει σε εφαρμογές μεγάλου όγκου παραγωγής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε τύπος ινών αλλά το γυαλί κυριαρχεί λόγω χαμηλού κόστους. Ειδικοί σχηματισμοί ποικίλων ινών έχουν αναπτυχθεί γι’ αυτή τη διαδικασία, συμπεριλαμβανομένων των πολυεστέρων, εστέρων βινυλίου, εποξικών και φαινολών (*polyesters, vinyl-esters, epoxy, phenolics*). Ακόμα και τα θερμοπλαστικά (*thermoplastics*) παράγονται με τη διαδικασία της έλξης, αλλά οι πολυεστέρες και οι εστέρες βινυλίου (*polyesters, vinyl-esters*) κυριαρχούν στην αγορά επίσης λόγω χαμηλού κόστους. Η κύρια μορφή ινών που χρησιμοποιείται είναι αυτή της δέσμης ινών και των συνεχών δεσμών (*roving και continuous strand mat [CSM]*), με τις τελευταίες συνήθως να παρέχουν εγκάρσια αντοχή και μεγάλη ευκολία παραγωγής. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιούνται επίσης και περισσότερο περίπλοκες μορφές ινών, όπως τα *stitched bidirectional materials*. Εκτός της περίπτωσης των θερμοπλαστικών (*thermoplastics*) και άλλων ειδικών εφαρμογών, δε χρησιμοποιείται καμία προεμποτισμένη ίνα, επιτυγχάνοντας έτσι αρκετά χαμηλό κόστος.

Η διαδικασία παραγωγής με έλξη (*pultrusion*) έχει ορισμένους περιορισμούς όσον αφορά στον προσανατολισμό των ινών και στο λόγο όγκου ινών. Πρέπει να χρησιμοποιείται μία ελάχιστη ποσότητα δεσμών ή διαμηκών ινών (*roving ή longitudinal fibers*) ώστε να είναι ικανές να έλκουν το τελικό προϊόν. Δέσμες ινών διπλού προσανατολισμού πρέπει να αγκυρώνονται (*stitched*) για να αποτραπεί η στρέβλωση των ινών κοντά στις ακμές. Ο λόγος όγκου ινών μπορεί να διαφέρει υπερβαίνοντας το 45%, με το 30% να είναι η πιο τυπική τιμή. Λοιπά υλικά πληρώσεως (*fillers*) μπαίνουν συνήθως για μείωση του κόστους ή της ποσότητας ρητίνης και για να διατηρηθεί σταθερή αναλογία των επιμέρους υλικών, διευκολύνοντας επιπλέον την διαδικασία. Μία ελάχιστη αναλογία ινών και υλικών πληρώσεως είναι απαραίτητη για την επιτυχή διαδικασία παραγωγής με έλξη (*pultrusion*) χωρίς επιτάχυνση ή επιβράδυνση. Ο απαιτούμενος όγκος ινών μπορεί να ελαττωθεί αν η διαφορά αντικατασταθεί από υλικά πληρώσεως (*fillers*) μέσα σε συγκεκριμένα όρια. Το πάχος των στερεών τοιχωμάτων που έχουν παραχθεί με έλξη, περιορίζεται περίπου στα 12mm όταν χρησιμοποιούνται *standard conduction heaters* εξαιτίας των περιορισμών στερεοποίησης και των ενδοστρωματικών ρηγματώσεων (*interlaminar cracking*). Έτσι, μπορεί να είναι δύσκολο να ελεγχθεί ο λόγος όγκου κενών σε διατομές μεγάλου πάχους.

Αν η μήτρα δεν έχει θερμανθεί, το σύνθετο υλικό την εγκαταλείπει χωρίς να έχει πλήρως στερεοποιηθεί, επιτρέποντας πρόσθετους χειρισμούς στο μη στερεοποιημένο τμήμα. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί η στερεοποίηση μέσα σε *tunnel-oven downstream* από τη μήτρα. Στη διαδικασία του *tunnel-oven*, οι δέσμες ινών (*roving και mat*) οδηγούνται σε ένα λουτρό με ρητίνη (*resin bath*) και στη συνέχεια σε μία *sizing brush*, που απομακρύνει τον παγιδευμένο αέρα και την περιττή ρητίνη. Οι εμποτισμένες δέσμες ινών καλουπώνονται στη συνέχεια στο επιθυμητό μέγεθος και σχήμα σε μία μήτρα (όχι θερμαινόμενη). Το τμήμα που παράγεται με έλξη (*pultruded part*) εισέρχεται σε κλίβανο *tunnel-oven* και στερεοποιείται. Το στερεοποιημένο τμήμα έλκεται με ερπυστριοφόρο ή δύο εναλλακτικούς εξολκείς. Η διαδικασία του *tunnel-oven* χρησιμοποιείται λιγότερο σήμερα καθώς έχει περιορισμούς στα σχήματα που μπορεί να παράγει και την ανάγκη δευτερευόντων φινιρισμάτων. Πάντως, χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενισχυμένων δοκών από σκυρόδεμα. Αφού η μη στερεοποιημένη δοκός βγει εκτός μήτρας, περιτυλίγεται σε μία γωνία με μια δέσμη ινών ή ακόμα, καλύπτεται με άμμο. Στη συνέχεια στερεοποιείται στον κλίβανο *tunnel-oven*. Σ' αυτή την περίπτωση, η τραχύτητα της επιφάνειας είναι ένα πλεονέκτημα επιτρέποντας στη δοκό να επιτύχει την επιθυμητή ένωση με το σκυρόδεμα.

Με τη μέθοδο της μήτρας-στερεοποίησης μπορούν να παραχθούν μόνο ευθεία σταθερής διατομής (*cross-section*) μέλη. Το *pulforming*, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καμπυλωτά σχήματα, όπως τα *leaf springs*. Στη διαδικασία *step-molding ή pulforming*, οι δέσμες ινών (*roving και mat*) εισέρχονται σε ένα λουτρό εμποτισμού (*impregnating bath*). Στη συνέχεια το υλικό τοποθετείται στο καλούπι, αυτό κλείνει και εφαρμόζεται θερμότητα. Εφόσον αυτό το τμήμα του προϊόντος έχει στερεοποιηθεί, αφαιρείται από το καλούπι και εισέρχεται η επόμενη διατομή στο καλούπι. Ένα πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι επιτρέπει την παραγωγή μελών με ανομοιόμορφη-μεταβλητή διατομή. Πάντως, η διαδικασία είναι αργή και είναι δύσκολο να παραχθούν μεγάλων διαστάσεων δομικά μέλη.

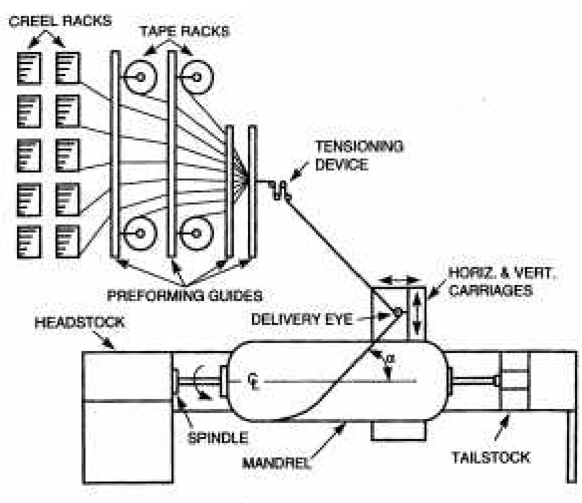
Ο ρυθμός παραγωγής της διαδικασίας με έλξη ποικίλει ευρέως εξαρτώμενος από τον τύπο της μηχανής που χρησιμοποιείται και τον τύπο της διατομής που παράγεται. 'Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα δοκού που μπορεί να παραχθεί είναι περίπου 2m/min, ενώ η γραμμή παραγωγής ενός πανέλου μπορεί να παράγει περίπου 20m^2/min.

3.8 Διαδικασία περιέλιξης - filament winding

Τα περισσότερα σχήματα που μορφώνονται μέσω αυτής της διαδικασίας είναι επιφάνειες κυλινδρικών ή σφαιρικών κελυφών, όπως σωλήνες, κύλινδροι και σφαίρες. Στη διαδικασία της περιέλιξης (*filament winding*), συνεχείς ενισχύσεις όπως δέσμες ινών (*roving*) περιτυλίγονται γύρω από έναν περιστρεφόμενο καλούπι/άξονα (*mandrel*) μέχρι η επιφάνεια να καλυφθεί και να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται ακατέργαστα υλικά, ίνες και ρητίνες, σε μια σχεδόν αυτοματοποιημένη μορφή με μικρό κόστος εργασίας που συνεισφέρει στο μικρό κόστος παραγωγής. Η εκ των προτέρων προγραμματισμένη περιστροφή του άξονα και η οριζόντια μετακίνηση του στομίου παροχής (*delivery eye*) παράγει ένα ελικοειδές σχήμα, που είναι η απλούστερη μέθοδος λειτουργίας της ελικοειδούς μηχανής περιέλιξης (*helical winding machine*).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι των μηχανών περιέλιξης: η ελικοειδής και η πολική ως προς σημείο (*polar*). Η ελικοειδής είναι παρόμοια με τον τόρνο (*lathe*). Ο άξονας-καλούπι περιστρέφεται συνεχώς ενώ το στόμιο παροχής παλινδρομεί εμπρός – πίσω. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα και η γραμμική ταχύτητα του στομίου μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να παράγουν κάθε προσανατολισμό ινών μεταξύ 5^o-90^o, το τελευταίο ονομάζεται *hoop winding*. Για να ολοκληρωθεί μία στρώση επικάλυψης του άξονα απαιτούνται αρκετές κινήσεις εμπρός-πίσω του βαγονιού/φορείου (*carriage)*. Μία τέτοια μόρφωση είναι πάντα ισορροπημένη διαστρωμάτωση (*2ply balanced laminate*) δύο στρώσεων υπό γωνία ±θ. Οι ίνες έρχονται από καλάθια ή ταινιόδρομους και τεντώνονται μέσω μιας συσκευής ελέγχου τάσεως που προσαρμόζεται στο άκρο του φορείου. Στη συνέχεια η ενίσχυση περνά μέσα από ένα λουτρό ρητίνης (*resin bath*) όπου προσκολλάται η ρητίνη. Στη συνέχεια η εμποτισμένη ίνα περνά μέσω του *στομίου παροχής* το οποίο είναι τοποθετημένο στο φορείο. Επιπροσθέτως με την περιστροφή του καλουπιού/άξονα, το *φορείο* και το *στόμιο παροχής* μπορούν να κινηθούν με πολλούς τρόπους που έχουν σχεδιαστεί για να βοηθήσουν στην τοποθέτηση των ινών σε πολύπλοκες διαδρομές (*complicated contours*). Μία ελικοειδής περιέλιξη (*helical winder*) έχει τη δυνατότητα για τρεις πιθανές κινήσεις που ονομάζονται άξονες, αλλά είναι διαθέσιμες μηχανές που έχουν μέχρι και έξι άξονες. Μία μηχανή με έξι άξονες ξεχωριστά ελέγχει την περιστροφική κίνηση, την οριζόντια τροφοδότηση του φορείου, την ακτινική θέση του φορείου, την γωνία του *στομίου παροχής* και την παρέκκλιση (*yaw*) και την κάθετη τροφοδότηση του φορείου. Οι περιελίξεις (*winders*) με λιγότερους άξονες χρησιμοποιούνται για πιο απλά τμήματα, όπως μπαστούνια του γκολφ, και αυτές με μεγαλύτερο αριθμό αξόνων χρησιμοποιούνται για περισσότερο πολύπλοκα τμήματα όπως οι πτέρυγες των ανεμογεννητριών. Μία ελικοειδής περιέλιξη (*helical winder*), παράγει μια γεωδαιτική τροχιά (*geodesic path*), δηλ. μία τροχιά που ακολουθεί το νήμα υπό ένταση στην επιφάνεια του περιστρεφόμενου καλουπιού/άξονα. Ένα παράδειγμα τέτοιας τροχιάς χρησιμοποιείται στην περιέλιξη ενός κυλινδρικού δοχείου. Για πιο πολύπλοκα σχήματα, η περιέλιξη (*winder*), μπορεί να προγραμματιστεί να παρεκκλίνει από τη γεωδαιτική τροχιά. Σ' αυτή την περίπτωση η δέσμη ινών τείνει να γλιστρήσει πίσω στη γεωδαιτική τροχιά.

Η διαφορά μεταξύ της γεωδαιτικής και της ορισμένης (*set*) τροχιάς είναι η γωνία απόκλισης (*slip angle*), η οποία περιορίζεται από τις συνθήκες της διαδικασίας. Ένα νήμα (*string*) ελεύθερο να ολισθήσει/αποκλίνει, τεντωμένο μεταξύ δύο σημείων πάνω στην κυρτή πλευρά κάθε επιφάνειας ακολουθεί τη γεωδαιτική τροχιά. Αν το σχήμα της επιφάνειας μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε η γεωδαιτική τροχιά να συμπίπτει με την συνισταμένη (*resultant*) στο *hoop* και των *meridional forces*, το σχήμα ονομάζεται γεωδαιτικός θόλος (*dome*). Ο σχεδιασμός τέτοιων σχημάτων χρησιμοποιείται στα καμπύλα άκρα των λεβήτων πίεσης.



Σχ. 3.4: Η διαδικασία της περιέλιξης

Η ως προς σημείο περιέλιξη (με πολικές συντεταγμένες) (*polar winders*), χρησιμοποιείται για την παραγωγή σφαιρικών δοχείων ή κυλινδρικών, με λόγο μήκους προς διάμετρο μικρότερο του 2. Μία τέτοια περιέλιξη ως προς σημείο είναι πιο απλή μηχανικά, επιπλέον λιγότερο ακριβή και ταχύτερη από την ελικοειδή. Αποτελείται από έναν βραχίονα που περιστρέφει τον άξονα παραδίδοντας στο νήμα σε μία δισδιάστατη τροχιά (*planar path*). Ο άξονας προχωράει αργά ώστε ο βραχίονας να καλύπτει την επιφάνειά του. Εκτός από την τέλεια σφαίρα, η δισδιάστατη τροχιά πάντα έχει μια γωνία απόκλισης σε σχέση με τη γεωδαιτική τροχιά, που περιορίζει την εφαρμογή της περιέλιξης ως προς σημείο (*polar winding*) σε σχεδόν σφαιρικά σχήματα.

Μετά την περιέλιξη, το τμήμα μετακινείται σε ηλεκτρικό φούρνο, και επιπλέον ελευθερώνει τη μηχανή για την περιέλιξη άλλου τμήματος. Η ανάγκη συνεχούς έντασης της ίνας γύρω από τον άξονα σχεδόν αποτρέπει την παραγωγή σχημάτων με αρνητική καμπύλωση (r_2<0), εκτός αν χρησιμοποιηθούν ειδικά εξαρτήματα. Οι μικρές ακτίνες καμπύλωσης είναι επίσης πρόβλημα διότι τσακίσματα ινών και ξαφνικές αλλαγές στην καμπύλωση τείνουν να δημιουργήσουν ζώνες πλούσιες σε ρητίνη. Η ανάγκη ενός άξονα και η απομάκρυνση αυτού αφού το σύνθετο υλικό έχει στερεοποιηθεί περιορίζουν επίσης τα σχήματα που μπορούν να υποστούν περιέλιξη. Γενικά, στη διαδικασία περιέλιξης βρίσκουν εφαρμογή οι περισσότερες επιφάνειες εκ περιστροφής (*revolution*).

Αρκετοί τύποι περιστρεφόμενων καλουπιών/αξόνων έχουν αναπτυχθεί για να διευκολύνουν την απομάκρυνση του τελικού προϊόντος. Η πιο εύκολη εναλλακτική λύση που χρησιμοποιείται στα δοχεία πίεσης είναι η χρήση ενός μεταλλικού γραμμικού στοιχείου όπως ο άξονας και η εγκατάλειψη αυτού του γραμμικού στοιχείου ως εσωτερικό τμήμα του τελικού προϊόντος. Αυτό μερικές φορές απαιτείται για την αποφυγή διαρροής αερίων με διάχυση μέσω του τοιχώματος του σύνθετου υλικού. Πτυσσόμενοι άξονες μορφώνονται από τμήματα τα οποία μπορούν να αποσυνδεθούν αφού το τμήμα στερεοποιηθεί. Αυτοί είναι οι πλέον ακριβοί άξονες και χρησιμοποιούνται σε μεγάλους όγκους παραγωγής. Ένας άξονας από ευδιάλυτη άμμο (*soluble sand mandrel*) μορφώνεται από άμμο και *polyvinyl alcohol*. Το μίγμα μορφώνεται σε δύο ή περισσότερα τμήματα τα οποία όταν ενωθούν δίνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Εφόσον το σύνθετο υλικό στερεοποιηθεί, ο άξονας διαλύεται με την έγχυση ζεστού νερού. Καλούπια από πηλό χρησιμοποιούνται μόνο για πρωτότυπα ή μικρής ζήτησης (*low runs*) μεγάλα τμήματα επειδή απαιτούν αρκετό κόπο και μπορεί να γίνει κάποια ζημιά στο τμήμα κατά την αφαίρεση.

Εκτός της χρήσης εμποτισμένων ινών, είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν *prepregs* ή υγρά ξανά-ρολλαρισμένα (*wet re-rolled*) υλικά, αλλά αυτές οι επιλογές πάντα προσθέτουν περισσότερο κόστος στο προϊόν. Η χρήση υγρών ενισχύσεων, η τοποθέτηση των ινών, ο εμποτισμός και η στερεοποίηση γίνονται ταυτόχρονα. Η εμποτισμένη ίνα τοποθετείται στον άξονα υπό τάση, και επιπλέον συμπιέζει το υλικό πριν γίνει η περιέλιξη. Η μέγιστη τάση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι σε σχέση με την αντοχή της ίνας και του ρυθμού τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται. Η στερεοποίηση δεν είναι τόσο καλή όσο αυτή που αποκτάται μέσω κλιβάνου καταλήγοντας σε υψηλότερο λόγο όγκου κενών και κάπως χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Πάντως, το να μην απαιτείται κλίβανος είναι σημαντικό πλεονέκτημα γιατί μειώνεται το κόστος μέσω του χαμηλότερου κόστους εξοπλισμού και του μικρότερου χρόνου της διαδικασίας. Για το λόγο αυτό, τα μεγάλα τμήματα που δεν χωρούν σε κανένα διαθέσιμο κλίβανο μπορούν να κατασκευαστούν με τη διαδικασία της περιέλιξης.

Το μέγιστο πάχος με αυτή τη διαδικασία περιορίζεται από την ολίσθηση (*slippage*) των ινών και το τσαλάκωμα υπό την πίεση των νέων στρώσεων που είναι από πάνω. Όταν το πάχος είναι μεγάλο, μπορεί να είναι απαραίτητο να σταματήσει η περιέλιξη και να αφεθεί το τμήμα να στερεοποιηθεί τμηματικά, μέχρι να πήξει η ρητίνη, πριν προστεθούν και άλλες στρώσεις. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία καταλήγει σε επιπρόσθετο κόστος. Για το λόγο αυτό, σχεδόν σε όλες τις διαδικασίες περιέλιξης, προτιμώνται σχετικά λεπτές διαστρωματώσεις από την άποψη της παραγωγής.

Οι μεγαλύτεροι περιορισμοί της διαδικασίας περιέλιξης είναι οι περιορισμοί του μεγέθους, των γεωμετρικών πιθανοτήτων, του προσανατολισμού των ινών και του τελειώματος της επιφάνειας στο τελικό προϊόν. Το περιεχόμενο των κενών μπορεί να είναι υψηλό αφού δεν χρησιμοποιήθηκε ούτε αναρρόφηση (*vacuum*) ούτε κλίβανος (*autoclave*) και η ρητίνη στερεοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία.

Οι ρυθμοί παραγωγής της διαδικασίας περιέλιξης ποικίλουν λόγω του μεγέθους του τμήματος και του τύπου του άξονα που υπαγορεύει τον απαιτούμενο χρόνο για να ολοκληρωθεί και να αφαιρεθεί το τμήμα από τη μηχανή περιέλιξης. Αν ο χρόνος στερεοποίησης και απομάκρυνσης (*set up και removal time*) δεν ενδιαφέρουν, ο ρυθμός παραγωγής υπαγορεύεται από το ρυθμό τροφοδοσίας με τον οποίο οι ίνες περιτυλίγονται γύρω από τον άξονα. Οι ρυθμοί τροφοδοσίας ποικίλουν σύμφωνα με την αντοχή των ινών που χρησιμοποιούνται, και τυπικά είναι 0,6-1,2m/sec για την παραγωγή χρησιμοποιώντας στερεοποίηση υγρών ινών (*wet fiber set up*).

3.9 Γενικές παρατηρήσεις – πλεονεκτήματα σύνθετων

Η χρήση των σύνθετων υλικών, γνωστών και ως ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers), αποτελεί σήμερα την πλέον σύγχρονη τεχνική στις κατασκευές έργων υποδομής, σε επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, στην αεροδιαστημική, στη ναυσιπλοΐα κ.α . Το πολύ μικρό τους βάρος, η εξαιρετικά υψηλή αντοχή τους , η ποικιλία στο μέγεθος και στο σχήμα των τμημάτων που διατίθενται και το ότι δεν είναι ευαίσθητα στη διάβρωση, είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά τους που τα κάνουν ελκυστικά στις παραπάνω χρήσεις. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται ίνες με υψηλή εφελκυστική αντοχή εμποτισμένες με θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, των οποίων τα χαρακτηριστικά είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασίες άνω των 80^oC. Τα σύνθετα υλικά είναι σχεδόν πλήρως ελαστικά μέχρι την αστοχία τους. Η παντελής έλλειψη πλάστιμης συμπεριφοράς, που συνεπάγεται και αδυναμία απορρόφησης ενέργειας από το υλικό, αποτελεί ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών. Έτσι χρησιμοποιώντας διαφορετικού τύπου ίνες που αστοχούν σε διαφορετικά μεγέθη παραμόρφωσης δημιουργείται μία ψευδο-πλάστιμη συμπεριφορά.

Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένα χαρακτηριστικά τους σε σύγκριση με τον κοινό χάλυβα.

Πίνακας 3.4 : Τυπικά χαρακτηριστικά ινών σε σύγκριση με τα αντίστοιχα του χάλυβα.

Ίνες	***Πυκνότητα Kg/m^3x10^3***	***Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)***	***Λόγος Poisson***	***Εφελκυστική Αντοχή (MPa)***	***Παραμορφ. Αστοχίας (%)***
Άνθρακα					
Υψηλού Ε	*1,90*	*380*	*0,35*	*2100*	*0,6*
Υψηλής f_t	*1,80*	*230*	*0,35*	*2700*	*1,3*
Γυαλιού					
Τύπου Ε	*2,54*	*72-75*	*0,25*	*3500*	*4,8*
Τύπου Ζ (ή AR)	*2,27*	*70-76*	*0,25*	*2500-3500*	*3-4,6*
Τύπου S2	*2,44*	*85-88*	*0,25*	*4600*	*5*
Αραμιδίου					
Kevlar 29	*1,45*	*65*	*0,32*	*3500*	*4*
Kevlar 49	*1,44*	*1 25*	*0,32*	*3500*	*2,1*
Χάλυβας	***7,86***	***200***	***0,28***	***400-1700***	***10***

Πίνακας 3.5 : Τυπικές τιμές μέτρου ελαστικότητας και παραμόρφωσης αστοχίας σύνθετων υλικών και χάλυβα.

Υλικό	***Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)***	***Παραμόρφωση Αστοχίας (%)***
Σύνθετο Υλικό με ίνες γυαλιού (GFRP)	*50*	*3*
Σύνθετο Υλικό με ίνες αραμιδίου (AFRP)	*65-120*	*2-3*
Σύνθετο Υλικό με ίνες άνθρακα (CFRP)	*35-190*	*1-1,5*
Χάλυβας	***200***	***10***

Πίνακας 3.6 : Ποιοτική αξιολόγηση ινοπλισμένων πολυμερών με άριστα το 10.

Χαρακτηριστικά	***CFRP***	***AFRP***	***GFRP***
Εφελκυστική αντοχή	*10*	*10*	*10*
Μέτρο Ελαστικότητας	*9*	*6*	*3*
Παραμόρφωση αστοχίας	*6*	*9*	*9*
Συμπεριφορά σε μακροχρόνιες επιδράσεις	*9*	*6*	*3*
Συμπεριφορά σε κόπωση	*6*	*4*	*2*
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	*6*	*4*	*2*
Πυκνότητα	*4*	*6*	*2*
Κόστος	*6*	*6*	*9*

Τα σύνθετα υλικά έχουν πλεονεκτήματα ότι συνήθως διαθέτουν τις καλύτερες ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται, ενώ επιπλέον διαθέτουν και ιδιότητες τις οποίες κανένα από τα αρχικά υλικά δεν διέθετε. Έτσι οι γενικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών οι οποίες τα καθιστούν ανώτερα από τα συμβατικά μπορεί να είναι οι εξής :

1. Αντοχή.
2. Ακαμψία.
3. Αντίσταση σε διάβρωση.
4. Αντίσταση σε παντός είδους φθορά κατά τη χρήση τους.
5. Κόστος.
6. Βάρος.
7. Συμπεριφορά σε κόπωση.
8. Θερμική μόνωση.
9. Θερμική αγωγιμότητα.
10. Ακουστική μόνωση.

Είναι όμως προφανές ότι ένα σύνθετο υλικό δε διαθέτει όλες τις παραπάνω ιδιότητες ταυτοχρόνως, αφού δεν υπάρχει ποτέ τέτοια απαίτηση στην πράξη και αφού ορισμένες από τις ιδιότητες είναι ασυμβίβαστες μεταξύ τους (π.χ. θερμική μόνωση, θερμική αγωγιμότητα). Κάθε σύνθετο υλικό κατασκευάζεται έτσι ώστε να διαθέτει μερικές από αυτές τις ιδιότητες.

Από την άποψη των ινωδών σύνθετων υλικών οι ιδιότητες οι οποίες τα καθιστούν πολύ σημαντικά είναι η ακαμψία, η αντοχή, το βάρος και το κόστος τους.

Ένας από τους πλέον κοινούς τρόπους που χρησιμοποιούνται για να εκφραστεί η αποτελεσματικότητα ενός υλικού είναι οι λόγοι ακαμψία/πυκνότητα και αντοχή/πυκνότητα. Μια τέτοια έκφραση παρόλα αυτά δεν περιλαμβάνει καμία πληροφορία σχετικά με το κόστος της επιτεύξεως ενός τέτοιου λόγου. Επειδή όμως το κόστος επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί από μόνο του ως κριτήριο και έτσι οι προαναφερθέντες λόγοι αποτελούν σπουδαία κριτήρια, μαζί με το κόστος, για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας των ινωδών σύνθετων υλικών.

Στους πίνακες 1.1 και 1.2 έχουμε ήδη παρατηρήσει ότι οι λόγοι αντοχή/πυκνότητα και ακαμψία/πυκνότητα φθάνουν σε πάρα πολύ υψηλές τιμές για ίνες διαφόρων υλικών. Τα ινώδη σύνθετα υλικά τώρα τα οποία έχουν ως έγκλεισμα τέτοιες ίνες παρουσιάζουν ανάλογα πλεονεκτήματα, έχουν δηλαδή τους δυο αυτούς λόγους σημαντικά μεγαλύτερους από τους αντίστοιχους λόγους των κοινών υλικών. Η ιδιότητα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η πλέον σημαντική ιδιότητα των ινώδων υλικών.

Επίσης τα υλικά αυτά απαιτούν απλή τοποθέτηση τις περισσότερες φορές εκεί που χρησιμοποιούνται. Συνέπεια αυτής της απλής τοποθετήσεως είναι η μεγάλη ταχύτητα κατασκευής η οποία γίνεται ακόμα μεγαλύτερη όταν τα υλικά έχουν ως μήτρα ρητίνη η οποία μπορεί να πολυμερισθεί στον τόπο κατασκευής.

Ο λόγος κόστους/πυκνότητας ενός υλικού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως π.χ. από την πείρα η οποία έχει αποκτηθεί επί μιας μεθόδου κατασκευής του υλικού, από την τεχνολογία της μεθόδου κατασκευής κλπ. Εκτός από αυτά ο λόγος αυτός δύναται από μόνος του να αποτελέσει κριτήριο για την αποτελεσματικότητα ενός υλικού από απόψεως κόστους, επειδή πρέπει να ληφθούν υπ’όψη και τα απόβλητα κατά τη χρησιμοποίηση του υλικού. Απόβλητα είναι το μέρος του υλικού το οποίο περισσεύει μετά από την κατεργασία για την διαμόρφωση του τελικού προιόντος. Για τα περισσότερα κοινά υλικά το ποσοστό των αποβλήτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ποσοστό του τελικού προιόντος και παρά την δυνατότητα ανακυκλώσεως και χρησιμοποιήσεως εκ νέου,η ωφελιμότητα αυτής της ανακυκλώσεως αντισταθμίζεται πολλές φορές από το κόστος αυτής επειδή τα απόβλητα δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στη μορφή την οποία βρίσκονται και χρειάζονται κάποια κατεργασία.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά εν τούτοις παρά την δυσκολία ανακυκλώσεως των αποβλήτων τους, παρουσιάζουν πολύ μειωμένο ποσοστό αποβλήτων επειδή δύνανται να διαμορφωθούν όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην τελική τους μορφή. Ένα απλό παράδειγμα επί του θέματος των αποβλήτων είναι το εξής : Οι δοκοί και γενικότερα πολλά στοιχεία των πλαισίων των αεροσκάφων διαμορφώνονται με μεγάλες οπές για λόγους ελαττώσεως βάρους. Όταν λοιπόν το πλαίσιο κατασκευάζεται από συμβατικό υλικό π.χ. κράματα του αλουμινίου, οι οπές αυτές έχουν ως συνέπεια την δημιουργία αποβλήτων τα οποία έχουν τη δυνατότητα να φθάσουν μέχρι 600% (κατά βάρος) . Εν τούτοις, έαν είναι δυνατό το πλαίσιο αυτό να κατασκευασθεί από ινώδη σύνθετα υλικά, το ποσοστό των αποβλήτων μπορεί να πέσει μέχρι 10% εξ’αιτίας των προαναφερθέντων λόγων. Το γεγονός αυτό δεν είναι θεωρητικό αλλά έχει επιτευχθεί στην πράξη σε πολλές περιπτώσεις κατασκευής τμημάτων πλαισίων αεροσκαφών και δείχνει φανερά την ανωτερότητα των ινώδων σύνθετων υλικών σε σχέση με τα συμβατικά υλικά σε ορισμένες περιπτώσεις.

Συνοπτικά μπορεί να λεχθεί ότι ο λόγος κόστος/πυκνότητα πολλών κοινών υλικών δύναται σε πολλές περιπτώσεις να είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο των ινωδών υλικών. Το γεγονός όμως ότι τα συμβατικά υλικά γενικώς παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό αποβλήτων, αυξάνει την ποσότητα των υλικών αυτών η οποία πρέπει να χρησιμοποιηθεί για μια συγκεκριμένη κατασκευή και κατά συνέπεια το συνολικό κόστος της κατασκευής. Με κριτήριο, τώρα, το συνολικό κόστος μπορεί να λεχθεί ότι τα ινώδη υλικά έχουν αποδειχτεί σε πολλές περιπτώσεις περισσότερο αποτελεσματικά από τα συμβατικά.

4. Σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών

4.1 Διαμόρφωση ιξωδοελαστικών υλικών των οποίων το μέτρο ελασικότητας αποθήκευσης είναι σταθερό με τη συχνότητα

Το παρόν άρθρο παρουσιάζει μια συνάρτηση χαλάρωσης που χαρακτηρίζει παχύρευστα υλικά των οποίων το μέτρο αναλογίας του φορτίου αποθήκευσης είναι σταθερό με τη συχνότητα, και των οποίων ο συντελεστής απώλειας δείχνει την αντιπροσωπευτική κορυφή απόσβεσης των υλικών. Η συμπεριφορά αυτή είναι χαρακτηριστική για ορισμένα σύνθετα υλικά, όπου τα ελαστικά συστατικά δίνουν το σταθερό συντελεστή, και τα πολυμερή στοιχεία παρέχουν το μεταβλητό συνελεστή απωλειών. Το νέο μοντέλο δίνει έναν τρόπο να παρασχεθούν συγκριτικά στοιχεία για τα διαφορετικά υλικά σε μια μορφή που μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στις προσομοιώσεις. Η φυσική έννοια των πρότυπων παραμέτρων καθορίζεται από την ανάλυση των σύνθετων συντελεστών στο πεδίο συχνότητας. Η παρουσιαζόμενη συνάρτηση χαλάρωσης επαληθεύεται από τη συναρμολόγηση καμπυλών σε πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένα πολυμερή δείγματα, κατασκευασμένα από μητρώα εποξικής ρητίνης με σύνολα μεταλλευμάτων.

- Εισαγωγή

Τα ιξωδοελαστικά υλικά χαρακτηρίζονται από την κατοχή της *άπειρης μνήμης*, δηλαδή, η πραγματική μηχανική απόκρισή τους διαμορφώνεται από το παρελθόν, πράγμα που υπονοεί ότι η συμπεριφορά οποιουδήποτε γραμμικού ιξωδοελαστικού υλικού μπορεί να αντιπροσωπευθεί από μια κληρονομική προσέγγιση βασισμένη στην Αρχή της Υπέρθεσης του **Boltzmann** (1876), που δίνεται ως:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{t} G(t-\tau)\mathrm{d}\varepsilon(\tau), \quad (1)$$

όπου το σ(t) και το ε(t) αντιπροσωπεύουν την πίεση και την παραμόρφωση με το χρόνο t, αντίστοιχα, το G(t) είναι η συνάρτηση χαλάρωσης και το r είναι ο χρόνος καθυστέρησης. Εάν η ιστορία της παραμόρφωσης ε(t) θα μπορούσε να αντιπροσωπευθεί από ομαλές συνεχείς συναρτήσεις , η εξίσωση (1) μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα ολοκλήρωμα συνελίξεων:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{t} G(t-\tau)\frac{\partial\varepsilon(\tau)}{\partial\tau}\mathrm{d}\tau. \quad (2)$$

Τα γραμμικά ιξωδοελαστικά πρότυπα για τη μη κατευθυνόμενη επεκτατική συμπεριφορά μπορούν να κατασκευαστούν με το διαχωρισμό της συνάρτησης χαλάρωσης G(t) στον ελαστικό όρο E_o και ένα άλλο ιξώδες cg(t) ως εξής:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{t} (E_0 + cg(t-\tau))\frac{\partial\varepsilon(\tau)}{\partial\tau}\mathrm{d}\tau,$$

,όπου E_o είναι ο χαλαρωμένος συντελεστής, το c είναι το εύρος του ιξώδους και το g (t) είναι η λειτουργία απόσβεσης, που ομαλοποιείται συνήθως ως

$$\int_{0}^{\infty} g(t)\mathrm{d}t = 1. \quad (3)$$

Με τη χρησιμοποίηση των ιδιοτήτων των ολοκληρωμάτων συνελίξεων, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στο πεδίο συχνοτήτων παράγει τη σχέση

$$\tilde{\sigma}(\omega) = E^*(\omega)\tilde{\varepsilon}(\omega),$$

όπου $\tilde{(\cdot)}(\omega)$ δείχνει το μετασχηματισμό κατά Φουριέ για (.)(t) και E*(ω) είναι ο σύνθετος συντελεστής, που δίνεται από $E^*(\omega) = E_0 + i\omega c\tilde{g}(\omega)$ (4) , ο οποίος μπορεί να διαιρεθεί στα πραγματικά και φανταστικά μέρη, $E^*(\omega) = E'(\omega) + i\,E''(\omega),$

όπου Ε΄(ω) και Ε΄΄(ω) είναι ο συντελεστής αποθήκευσης και απώλειας, αντίστοιχα, ο οποίος εξαρτάται κανονικά από τη συχνότητα (δείτε, π.χ Ward και Hadley (1993) για τις λεπτομέρειες), και η αναλογία μεταξύ τους είναι ο συντελεστής απώλειας $\eta(\omega)$,

όπου $\eta(\omega) = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)}.$.

Ο **Adhikari** (2000) και ο **Park** (2001) συζητούν τις διαφορετικές προσεγγίσεις στη μαθηματική διαμόρφωση της συμπεριφοράς των ιξωδοελαστικών υλικών, τα οποία χαρακτηρίζονται από τη συνάρτηση απόσβεσης g(t) στο πεδίο του χρόνου ή από το μετασχηματισμό κατά Φουριέ $\tilde{g}(\omega)$ στο πεδίο συχνότητας. Η συνάρτηση απόσβεσης g(t) μπορεί να κατασκευαστεί με την ανάλυση της υλικής χαλάρωσης όταν φορτίζεται υπό μια σταθερή πίεση ε_o, που υπονοεί την ύπαρξη μιας αρχικής πίεσης σ_o, που δίνεται από τον τύπο $\sigma_0 = E_0\varepsilon_0$ και έπειτα, οι πιέσεις μειώνονται ασυμπτωτικά με το χρόνο μέχρι σ_∞. Απλές συναρτήσεις που χαρακτηρίζουν τη χαλάρωση πίεσης δίνονται από τα εκθετικά και υπερβολικά πρότυπα (**Crawford**, 1998), που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Η παράμετρος t_o των προτύπων του Πίνακα 1 είναι γνωστή ως *χρόνος χαλάρωσης*. Η συνάρτηση απόσβεσης g(t) μπορεί να συνάγεται από τη διαφοροποίηση της χαλάρωσης πίεσης σ(t), όπως πρέπει να διαφαίνεται στις δεύτερες και τρίτες σειρές του Πίνακα 1. Στις ακόλουθες σειρές, παρουσιάζονται ο μετασχηματισμός κατά Φουριέ για τη συνάρτηση χαλάρωσης και ο σύνθετος συντελεστής.

Αφ' ενός, πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο τα εκθετικά όσο και τα υπερβολικά πρότυπα, κατέχουν πραγματικά και φανταστικά μέρη του σύνθετου συντελεστή εξαρτώμενα από τη συχνότητα. Αφ' ετέρου, ο συντελεστής αποθήκευσης και ο συντελεστής απώλειας του προηγούμενου, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, προσεγγίζει τη χαρακτηριστική μορφή των ιξωδοελαστικών υλικών που παρουσιάζονται σε λαστιχωτές ζώνες, ζώνες μεταφοράς και γυάλινες ζώνες: ο συντελεστής αποθήκευσης αυξάνεται μέσα σε δύο ασύμπτωτες και ο συντελεστής απώλειας παρουσιάζει μια αιχμή (δείτε, π.χ **Ward και Hadley** (1993) για λεπτομέρειες).

Table 1

Exponential and hyperbolic models in time and frequency domains

	Exponential	Hyperbolic
$\sigma(t)$	$\sigma_0 + (\sigma_\infty - \sigma_0)(1 - \exp(-t/t_0))$	$(\sigma_0 - \sigma_\infty)\frac{t_0}{t_0 + t} + \sigma_\infty$
$g(t)$	$\frac{1}{t_0}\exp(-t/t_0)$	$\frac{t_0}{(t_0 + t)^2}$
$\tilde{g}(\omega),\ \omega \geqslant 0$	$\frac{1}{1 + i\omega t_0}$	$-\pi\omega t_0 \exp(i\omega t_0)$
$E^*(\omega)$	$E_0 + \frac{c}{t_0}\frac{i\omega t_0}{1 + i\omega t_0}$	$E_0 - i\pi\frac{c}{t_0}(\omega t_0)^2 \exp(i\omega t_0)$

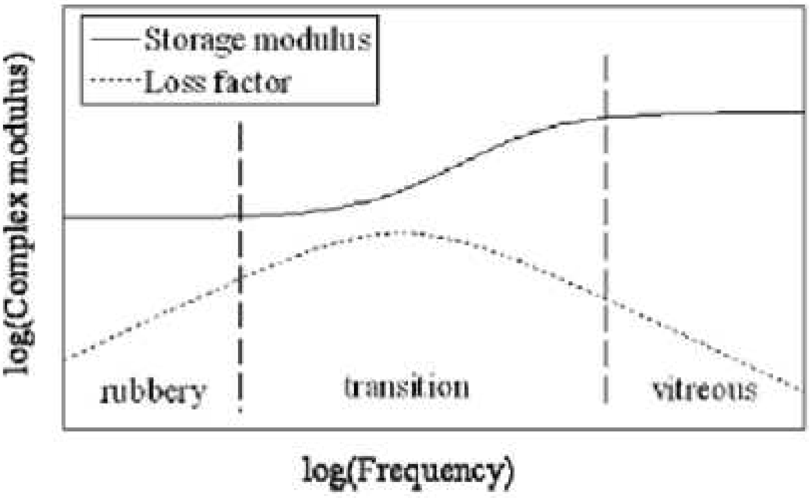


Fig. 1. Complex modulus for exponential model.

Αφ’ ετέρου, ο όρος exp(iωt$_o$) από το υπερβολικό πρότυπο προκαλεί ταλαντώσεις στην αποθήκευση και την απώλεια του συντελεστή που δεν εξευρίσκεται στα πραγματικά υλικά, κατά συνέπεια αυτό το πρότυπο χρησιμεύει μόνο στον τομέα του χρόνου.

Μερικά σύνθετα υλικά, όπως το πολυμερές σκυρόδεμα, παρουσιάζουν μια συμπεριφορά που είναι πρώτιστα ελαστική, και των οποίων το μέτρο ελαστικότητας του Young είναι σταθερό στις μεγάλες συχνότητες και θερμοκρασίες, αλλά παρουσιάζει μεταβλητή αποσβεστική ικανότητα (**Corte** και **Castillo**). Η συμπεριφορά αυτού του είδους των υλικών δεν μπορεί να αντιπροσωπευθεί από τα προηγουμένως αναφερθέντα, ούτε από τα πιο σύγχρονα πρότυπα όπως το κλασματικό παράγωγο (**Bagley και Torvik**, 1983 **Pritz**, 1996, 2003).

Συνεπώς, σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται μια νέα συνάρτηση χαλάρωσης, η οποία διαμορφώνει τη συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών, των οποίων το μέτρο αναλογίας του φορτίου αποθήκευσης είναι σταθερό με τη συχνότητα, και ο συντελεστής απώλειας παρουσιάζει τη χαρακτηριστική κορυφή των υλικών απόσβεσης. Αυτή η συνάρτηση χαλάρωσης, κατάλληλη για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων και θερμοκρασιών, δίνει έναν τρόπο να παρασχεθούν συγκριτικά στοιχεία για τα διαφορετικά υλικά σε μια μορφή που μπορεί εύκολα να ενσωματώνεται στις προσομοιώσεις. Έπειτα, παρουσιάζεται το νέο μοντέλο και αναλύεται η φυσική έννοια των παραμέτρων. Τελικά το πρότυπο επαληθεύεται με τη βοήθεια της συναρμολόγησης καμπυλών στις πειραματικές μετρήσεις επάνω σε συγκεκριμένα δείγματα πολυμερών.

- Ανάλυση του προτεινόμενου προτύπου

Το νέο μοντέλο που προτείνεται σε αυτό το άρθρο προτείνει ότι, όταν το υλικό υποβάλλεται σε μια σταθερή παραμόρφωση ε_o, η πίεση σ(t) ακολουθεί το νόμο

$$\sigma(t) = \sigma_0 + (\sigma_\infty - \sigma_0)\frac{2}{\pi}\arctan\left(\frac{t}{t_0}\right). \quad (5)$$

Αυτή η συνάρτηση αντιπροσωπεύεται στο Σχήμα 2, καθώς επίσης και τα εκθετικά και υπερβολικά πρότυπα. Προφανώς, οι τρεις καμπύλες παρουσιάζουν τον ίδιο χρόνο χαλάρωσης t_0 και αρχική σ_0 και ασυμπτωτικές πιέσεις σ_{00}.

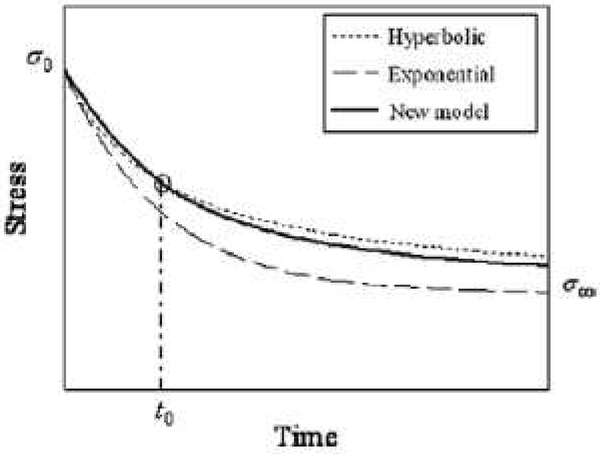


Fig. 2. Stress relaxation under constant strain.

Από το Σχήμα 2 πρέπει να σημειωθεί ότι η πίεση μειώνεται γρηγορότερα για το εκθετικό πρότυπο, επομένως πρώτα αυτό φθάνει στην ασυμπτωτική ζώνη. Στην αρχή, το ποσοστό πίεσης για το νέο μοντέλο είναι το χαμηλότερο, αλλά αυτό αυξάνεται γρήγορα και υπερβαίνει αυτό του υπερβολικού πέρα από το $t = t_0$.

Η συνάρτηση απόσβεσης που αντιστοιχεί στην εξίσωση (5) συνάγεται από τη διαφοροποίηση και την κανονικοποίηση μέσα από την εξίσωση (3) ,

$$g(t) = \frac{2}{\pi}\frac{t_0}{t_0^2 + t^2}$$

του οποίου ο μετασχηματισμός κατά Φουριέ στο $\omega \geq 0$ δίνει

$$\tilde{g}(\omega) = 2\exp(-\omega t_0).$$

Ο σύνθετος συντελεστής για το προτεινόμενο πρότυπο λαμβάνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4), η οποία παράγει

$$E^*(\omega) = E_0 + \mathrm{i}2\frac{c}{t_0}\omega t_0\exp(-\omega t_0), \quad (6)$$

όπου το πραγματικό μέρος, που αντιπροσωπεύει το συντελεστή αποθήκευσης, είναι σταθερό με τη συχνότητα,

$E'(\omega)=E_o$,

και ο συντελεστής απώλειας, που αντιπροσωπεύεται στο Σχήμα 3, εξαρτάται από τη συχνότητα ως εξής:

$$\eta(\omega) = \frac{2}{E_0}\frac{c}{t_0}\omega t_0 \exp(-\omega t_0). \quad (7)$$

Από την ανάλυση αυτής της καμπύλης μπορεί να επισημανθεί ότι η συχνότητα ω_o, στην οποία ο συντελεστής απώλειας φθάνει τη μέγιστη τιμή η_0, συσχετίζεται με το χρόνο χαλάρωσης t_0 ως εξής, $\omega_o=1/t_o$,
κατά συνέπεια, η εξίσωση (7) μπορεί επίσης να γραφτεί ως

$$\eta(\omega) = \eta_0 \frac{\omega}{\omega_0} \exp\left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right).$$

Κατόπιν, το νέο μοντέλο μπορεί να καθοριστεί είτε από τις παραμέτρους E_0, c και t_0, είτε από E_0, η_0 και ω_0. Το σημείο καμπής δίνεται στη συχνότητα $2\omega_0$, και η αντίστοιχη τιμή για τον παράγοντα απώλειας είναι $2\eta_o{*}e^{-1}$, όπου το e είναι η βάση των φυσικών λογαρίθμων.

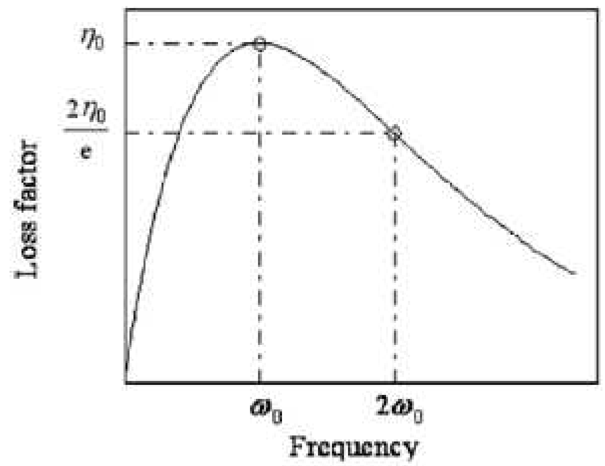


Fig. 3. Loss factor evolution for the new model.

- Συναρμολόγηση καμπυλών στις πειραματικές μετρήσεις

Σ' αυτό το τμήμα το προτεινόμενο πρότυπο επαληθεύεται με τη βοήθεια της συναρμολόγησης καμπυλών στις πειραματικές μετρήσεις αποκτηθείσες από Corte και Castillo για το σύνθετο συντελεστή των συγκεκριμένων πολυμερών δειγμάτων σε ένα εύρος συχνότητας μέχρι 160 Hz. Τα ορυκτά σύνολα του κατασκευασμένου πολυμερούς σκυροδέματος (**Castillo**, 2004), περίπου 90% της συνολικής υλικής μάζας, δίνουν την ελαστική συμπεριφορά στο σύνθετο υλικό, και η εποξική ρητίνη, το υπόλοιπο 10%, παρέχει τη μεταβλητή ικανότητα απόσβεσης. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει το μέτρο ελαστικότητας αποθήκευσης και το συντελεστή απώλειας που μετριέται στις προηγουμένως αναφερθείσες συχνότητες.
Η διαδικασία συναρμολογήσεων καμπυλών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ελαχιστοποίησης των **Nelder** και **Mead** (1965), η οποία εφαρμόζεται στη λειτουργία *fminsearch* του Matlab (The MathWorks Inc., 2005). Η ελαχιστοποιημένη συνάρτηση είναι

$$\sum_{s}^{s_{max}} \kappa_s \left| E^*(\omega_s) - E^*_s \right|,$$

όπου το s είναι ο δείκτης του αθροίσματος, s_{max} είναι ο συνολικός αριθμός των πειραματικών στοιχείων, το $|.|$ αντιπροσωπεύει την απόλυτη τιμή, κ_s είναι ένας συντελεστής βάρους, $E^*(\omega_s)$ είναι η τιμή της καμπύλης συναρμολογήσεων στη συχνότητα ω_s, που δίνεται από την εξίσωση (6), και E^*_s

είναι ο μετρημένος εις την s-στή σύνθετος συντελεστής στην ίδια συχνότητα ω_s (δείτε τον Πίνακα 2). Ο συντελεστής βάρους κ_s λήφθηκε ως συνάρτηση του τετραγώνου του συντελεστή απώλειας

$$\kappa_s = \eta_s^2,$$

έτσι ώστε το πιο μετριασμένο στοιχείο να παίρνει ένα μεγαλύτερο βάρος. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας συναρμολογήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Η ποιότητα της διαδικασίας συναρμολογήσεων μπορεί να φανεί στο Σχήμα 4, στο οποίο γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της πειραματικής και της θεωρητικής καμπύλης. Μπορεί να επισημανθεί ότι το θεωρητικό πρότυπο ταιριάζει στα πειραματικά στοιχεία με λάθη μικρότερα από 10% εκτός από τη χαμηλότερη συχνότητα.

Table 2
Storage modulus E and loss factor η for polymer concrete specimens

f (Hz)	E (10^9 Pa)	η
24.9	36.9	0.0106
40.4	38.2	0.0221
85.5	38.0	0.0153
137	38.0	0.0079

Table 3
Parameters for the fitted model

E_0 (10^9 Pa)	ω_0 (rad/s-Hz)	η_0	t_0 (10^{-3} s)	c (10^6 Pa s)
38.2	259-41.3	0.0221	3.85	4.42

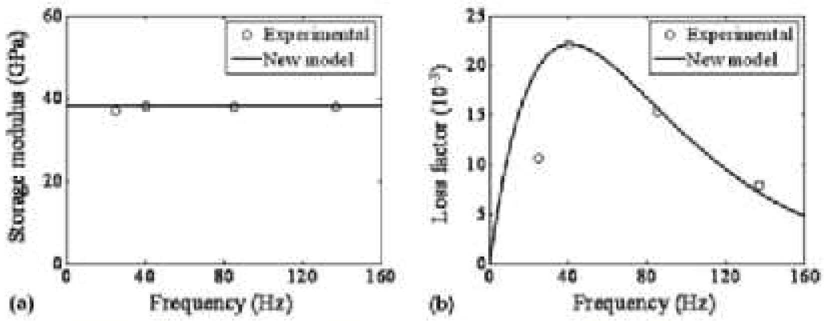


Fig. 4. Comparison between experimental data and fitted model: (a) storage modulus and (b) loss factor.

- Συμπεράσματα

Σ' αυτό το άρθρο έχει παρουσιαστεί μια συνάρτηση χαλάρωσης, η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά κάποιων σύνθετων υλικών που χαρακτηρίζονται από ένα σταθερό μέτρο ελαστικότητας αποθήκευσης και από έναν συντελεστή απώλειας που παρουσιάζει τη χαρακτηριστική κορυφή των υλικών με απόσβεση. Από αυτήν τη συνάρτηση χαλάρωσης, κατάλληλη για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνότητας και θερμοκρασίας, το σύνθετο μέτρο ελαστικότητας έχει συναχθεί και αναλυθεί στο πεδίο συχνοτήτων, απ' όπου έχει καθοριστεί η φυσική έννοια των πρότυπων παραμέτρων. Το νέο μοντέλο, το οποίο έχει επαληθευτεί με τη βοήθεια της καμπύλης που ταιριάζει στις πειραματικές μετρήσεις για το πολυμερές σκυρόδεμα, δίνει έναν τρόπο να παρασχεθούν τα συγκριτικά στοιχεία για διαφορετικά υλικά σε μια μορφή που μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στις προσομοιώσεις.

4.2 Αποτελέσματα των στρωμάτων κονιάματος στη διαστρωμάτωση Gfrp που συνδέεται με ιστορική τεκτονική

Τα εξωτερικά ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs) που χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση στη διάτμηση σε ιστορικές φέρουσες τοιχοποιίες αυξάνουν την εφελκυστική ικανότητα με τρόπο που συμβάλλει στην αντοχή απέναντι στη συνδυασμένη συμπίεση και στις υψηλές διατμητικές δυνάμεις που προκαλούνται σε περίπτωση σεισμού. Η τοπική και ολική ικανότητα των ενισχυμένων με FRPs φέρουσων τοιχοποιιών εξαρτάται από την αποκόλληση. Το συγκεκριμένο άρθρο πραγματεύεται την αντοχή αγκύρωσης των GFRP λωρίδων που εφαρμόζονται σε ιστορικές τοιχοποιίες μέσω της ανάλυσης αποτελεσμάτων που προέκυψαν από διατμητικές δοκιμές εφελκυσμού - θλίψης και οι οποίες διεξήχθησαν σε GFRP που εφαρμόστηκαν σε ιστορικούς συνδέσμους με πλίνθους.

Η επιστημονική έρευνα προέβλεψε επίσης την ανάλυση φαινομένων που προκύπτουν από την παρουσία στρωμάτων κονιάματος σε πραγματικές, ιστορικές φέρουσες τοιχοποιίες από πλίνθους, εξομοιωμένων μέσω αυλακώσεων που δημιουργήθηκαν στην επιφάνεια πλίνθων πηλού, οι οποίοι πληρώθηκαν με κονίαμα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ψαθυρή αστοχία των συνδέσμων οφειλόμενη σε αποκόλληση. Ακολούθησε επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκειμένου να εκτιμηθούν οι τιμές των φορτίων αστοχίας, διαγράμματα στράγγισης – μήκους αγκύρωσης και τα διαγράμματα διατμητικής τάσης – λανθανουσών πειραματικών σχέσεων. Τέλος, η αγκύρωση των GFRP σε ιστορικούς πλίνθους μελετήθηκε θεωρητικά για να βελτιώσει την κλασική λύση με την ενσωμάτωση προσκολλημένης διατμητικής παραμόρφωσης. Επίσης, έγινε συζήτηση επί των πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων.

- Συζήτηση

Τα πειραματικά δεδομένα τάσης που αποθηκεύονταν κατά τη διάρκεια των διατμητικών δοκιμών εφελκυσμού-θλίψης σε GFRP πάνω σε – ιστορικούς – συνδεδεμένους με πλίνθο συνδέσμους, λήφθηκαν χρησιμοποιώντας μετρητές τάσης οι οποίοι τοποθετήθηκαν στη θέση 1 προσκολλημένοι στην άνω επιφάνεια, δίνοντας μέτρηση σε κάθε σημείο.

$$\varepsilon_{1,top} = \frac{du_{1,top}}{dx}$$

Θεωρώντας ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_{1,top} = \frac{du_{1,top}}{dx} \cong \frac{du_{1,a}}{dx} \quad (1)$$

η τάση στην κορυφή της GFRP λωρίδας μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σχεδόν ίση με την τάση του *ενδιάμεσου στοιχείου m*. Διαφοροποιώντας την εξίσωση

$\tau_a(x) - G_m \cdot \frac{u_{1,a}(x)}{t_m}$ και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (1), έχουμε:

$$\varepsilon_{1,top} = \frac{t_m}{G_m} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (2)$$

Εισάγοντας την εξίσωση $\tau_a(x) = \frac{P}{b_1} \cdot \beta \cdot \frac{\cosh(\beta x)}{\sinh(\beta L)}$ στην εξίσωση 2, η τελική σχέση που δίνει την πειραματική τάση μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$\varepsilon_{1,top} = \frac{t_m}{G_m} \cdot \frac{P}{b_1} \cdot \beta^2 \cdot \frac{\sinh(\beta x)}{\sinh(\beta L)}$$

Η μέγιστη τιμή τάσης αντιστοιχεί στο σημείο στην άκρη του συνδέσμου όπου x=L :

$$\varepsilon_{1,top}(L) = \frac{t_m}{G_m} \cdot \frac{P}{b_1} \cdot \beta^2 \qquad (3)$$

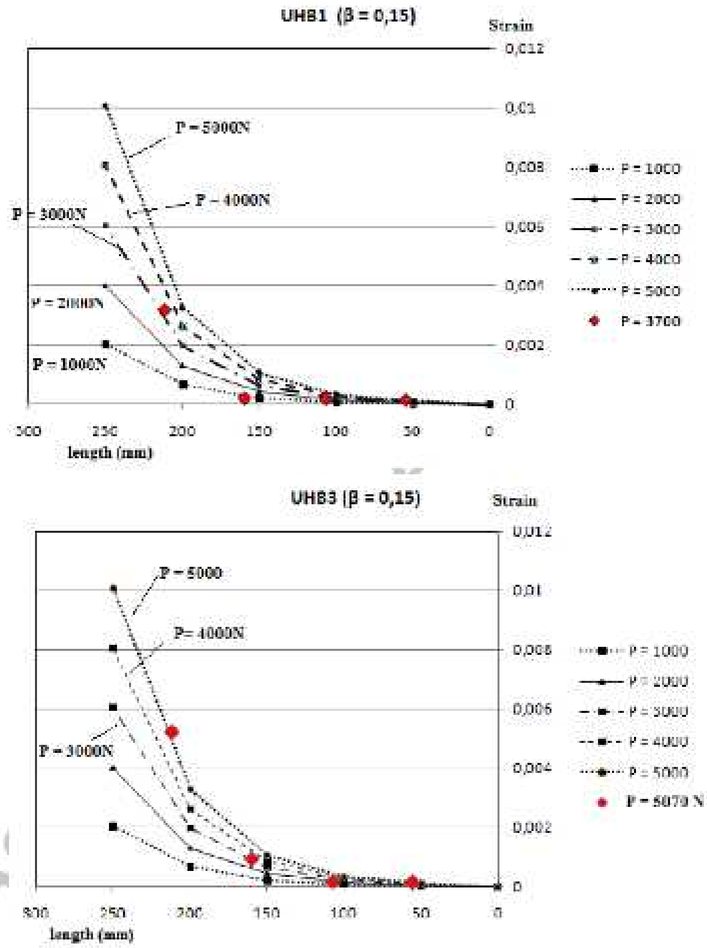
$$\beta^2 = \frac{3 \cdot G_1 \cdot G_m}{E_1 t_1 (3 \cdot G_1 \cdot t_m + t_1 \cdot G_m)}$$

Η εξίσωση (4) μας δίνει τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε το συντελεστή β^2 στην περίπτωση εφαρμογής GFRP σε ιστορικούς συνδέσμους συνδεδεμένους με πλίνθο, οι οποίοι μελετώνται πειραματικά υποθέτοντας *τις τιμές του μετρητή στη θέση 1* (t_1 και E_1) στον Πίνακα 3. Όπως επίσης τιμές για παραμέτρους στον τύπο της διάτμησης $G_1 = \frac{E_1}{2 \cdot (1 + \nu_1)}$ και G_m με ν_1=0.22, ν_m=0.30 και $E_m \approx$ 1760N / mm2. Πειραματικές μετρήσεις σε αποσπασμένο στρώμα πηλού το οποίο προέκυψε με αποκόλληση έδειξαν ότι το πάχος του *ενδιάμεσου στοιχείου* είναι περίπου t_m = 1.5 mm – 3.0 mm. Με την εξίσωση 4 ο συντελεστής β^2 =0.053 - 0.026 για t_m = 1.5 mm και 3.0 mm αντίστοιχα.

Τέλος, η εξίσωση 3 μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κριτήριο σε αστοχία αποκόλλησης, χρήσιμο για τον προσδιορισμό της αντοχής της αγκύρωσης. Η μέγιστη τιμή τάσης στις περιπτώσεις που μελετήθηκαν είναι ίση με:

$$\varepsilon_{1,top}(L) \approx 7.8 \cdot 10^{-3}$$

,κάτι το οποίο μας επιτρέπει να επιτύχουμε μια θεωρητική τιμή για το φορτίο αστοχίας P =3350 N, το οποίο αποτελεί μια ασφαλή τιμή για συγκολλημένη αγκύρωση ενάντια σε αστοχία αποκόλλησης του GFRP. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την περίπτωση όπου β = 0,15.



(a)

(b)

Figure 15 – Comparison of theoretical diagrams strain values vs. length of anchorage with experimental values at (a) P =3700N (UHB1)and (b) P=5070N (UHB_3).

➢ Συμπεράσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα που λήφθηκαν από διατμητικές δοκιμές εφελκυσμού – θλίψης σε σύνθετα υλικά από γυαλί προσαρτημένα σε ιστορικούς συνδέσμους συνδεδεμένους με πλίνθο παρουσιάστηκαν και συζητήθηκαν στον παρόν άρθρο μελετώντας τις συνέπειες της παρουσίας στρώσεων κονιάματος σε ιστορική τοιχοποιία με πλινθοδομή εξομοιωμένη με αυλακώσεις πληρωμένες με κονίαμα. Τα πειραματικά δεδομένα αναλύθηκαν προκειμένου να εκτιμηθούν : οι νόμοι που διέπουν την διάτμηση – ολίσθηση των υπό εξέταση δοκιμίων, η ενέργεια θραύσης και οι τιμές των φορτίων αστοχίας. Τα κυριότερα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης περιγράφηκαν παραπάνω και συνοψίζονται στα εξής :

1. Η ενίσχυση ιστορικής τοιχοποιίας με τη χρήση GFRP είναι στενά συνδεδεμένη με την αντοχή της συγκολλημένης αγκύρωσης, η οποία συνήθως υπόκειται σε αστοχία αποκόλλησης με απόσπαση ενός λεπτού στρώματος πηλού.
2. Η βελτίωση της αντοχής της αγκύρωσης εξαρτάται από την ικανότητα σε εφελκυσμό των ιστορικών πλίνθων πηλού, ενώ η επίδραση των συνδέσμων κονιάματος δε σχετίζεται με την απόκριση της συγκόλλησης.
3. Οι τιμές της ενέργειας θραύσης σε δείγματα πλίνθων πηλού με αυλακώσεις που ήταν πληρωμένες με κονίαμα ήταν, σε πολλές περιπτώσεις, μεγαλύτερες από εκείνες που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας πλίνθους με ομαλή επιφάνεια.
4. Η θεωρητική ανάλυση της αγκύρωσης, αγνοώντας το μοντέλο διατμητικής υστέρησης των συγκολλημένων στοιχείων, οδήγησε σε ισχύουσες σχέσεις για τον καθορισμό της μέγιστης ικανότητας αγκύρωσης με επαρκή ασφάλεια εκφρασμένη σε όρους αστοχίας αποκόλλησης.

4.3 Ρεολογία απο pvc πλαστισόλη-ν: μέτρο αποθήκευσης και δίκτυο που αποτελείται απο σωματιδιακή επικοινωνία

Προηγούμενη έρευνα με πλαστισόλες PVC έδειξε ότι αυτή η ψευδοπλαστική συμπεριφορά υπό την αυξανόμενη συχνότητα των δυναμικών μετρήσεων ήταν αποτέλεσμα της ανάπτυξης ενός ακινητοποιημένου στρώματος. Στη συνέχεια, αξιολογήθηκαν το δυναμικό ιξώδες και ο συντελεστής αναλογίας αποθήκευσης της κινητής φάσης. Τα δείγματα αποτελούνταν από λεπτά και χονδροειδή μόρια, των οποίων ποίκιλλε η λεπτή/χονδροειδής αναλογία. Η παρούσα εργασία συσχετίζει το συντελεστή αναλογίας αποθήκευσης σε διαφορετικές συχνότητες με τη λεπτή/χονδροειδή αναλογία μέσω ενός πρότυπου δικτύου που αποτελείται από επαφές μορίων με μόρια. Οι επαφές είναι τριών ειδών, λεπτή-λεπτή, λεπτή-χονδροειδής, και χονδροειδής-χονδροειδής. Ο μέσος όρος των σημείων επαφής ανά μόριο έχει αξιολογηθεί για τα ανωτέρω είδη επαφών σε διαφορετικές συχνότητες. Επίσης, η συμμετοχή διάφορων μορίων στο δίκτυο έχει αξιολογηθεί σαν μια σχετική μέτρηση. Σε χαμηλότερη συχνότητα υπάρχουν σχετικά μεγαλύτεροι αριθμοί σημείων της λεπτής-λεπτής επαφής ανά μόριο, αλλά λιγότεροι αριθμοί μορίων συμμετέχουν στο δίκτυο. Επομένως, το δίκτυο είναι μάλλον χαλαρό. Η λεπτή-χονδροειδής επαφή παρουσιάζει μια παρόμοια τάση αλλά λιγότερα σημεία επαφής ανά μόριο σε όλα τα επίπεδα συχνοτήτων. Η χονδροειδής-χονδροειδής επαφή περιορίζεται σε έναν σχηματισμό ζευγαριού, δηλαδή, μόνο 0.5 σημείο επαφής ανά μόριο κατά μέσον όρο. Εντούτοις, η χονδροειδής-χονδροειδής επαφή συμβάλλει σημαντικά στο μέγεθος του συντελεστή, λόγω του μεγέθους του μορίου. Στην υψηλότερη συχνότητα υπάρχουν λιγότερες λεπτές-λεπτές επαφές, αλλά ένας μεγαλύτερος αριθμός μορίων συμμετέχουν στο δίκτυο. Η τάση με τη λεπτή-χονδροειδής επαφή είναι πολύ παρόμοια. Η χονδροειδής-χονδροειδής επαφή αυξάνει σημαντικά στις υψηλότερες συχνότητες.

- *Συντελεστής των διασκορπισμένων συστημάτων*

Ο ελαστικός συντελεστής ενός διασκορπισμένου συστήματος, G, συχνά εκφράζεται ως $G=G_0*F(\upsilon)$ (1),
όπου G_0 είναι ο συντελεστής του μέσου και F(υ) είναι μια συνάρτηση του κλάσματος όγκου των διασκορπισμένων μορίων. Η εξίσωση χρησιμοποιήθηκε, παραδείγματος χάριν, για να συσχετίσει το συντελεστή του γεμισμένου καουτσούκ με τον πίνακα του καουτσούκ για ένα δεδομένο κλάσμα όγκου του υλικού πληρώσεως. Μια ρητή μορφή της συνάρτησης F(υ), δόθηκε από τον **Guth** για τη δυαδική αλληλεπίδραση των σφαιρών. Μια προσπάθεια να εφαρμόσουμε την εξίσωση (1) στο παρόν σύστημα θα ήταν να μεταχειριστούμε το G_0 ως το συντελεστή των λεπτών μορίων συν τον πλαστικοποιητή και το υ ως το κλάσμα όγκου των χονδροειδών μορίων. Υπάρχουν δύο ενστάσεις γι’ αυτή την προσέγγιση: η μία είναι ότι η σχέση καθιερώνεται για σχετικά αραιά συστήματα, για τα οποία εξετάζεται μόνο η δυαδική αλληλεπίδραση των μορίων. Το παρόν σύστημα έχει μια πολύ συσσωρευμένη διασπορά έτσι ώστε αναμένεται μια πολλαπλάσια αλληλεπίδραση. Η άλλη ένσταση προέρχεται από την εξέτασή της ιξώδους συμπεριφοράς, όπου η ακόλουθη σχέση που δόθηκε από τον **Farris** βρέθηκε να είναι μη εφαρμόσιμη:
$\eta=\eta_f * f(\upsilon_c)$,
όπου η είναι το ιξώδες μιας παύσης που περιέχει τα δυαδικά μόρια, η_f είναι το ιξώδες του μέσου που περιέχει τα λεπτά μόρια και το υγρό και η $f(\upsilon_c)$ είναι μια συνάρτηση του κλάσματος όγκου των χονδροειδών μορίων, υ_c. Ο λόγος για το ανεφάρμοστο της σχέσης ερμηνεύεται να είναι ότι η μεμονωμένη λεπτή-χονδροειδής αλληλεπίδραση διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο εκτός από τις λεπτές-λεπτές και χονδροειδείς-χονδροειδείς αλληλεπιδράσεις. Αυτό είναι ο λόγος για την υιοθέτηση της εξίσωσης 1.

- *Φύση των επαφών των μορίων στα δίκτυα*

Οι παράμετροι δικτύων που δίνονται στον Πίνακα 1 αποκαλύπτουν τη φύση των επαφών των μορίων σε διαφορετικές συχνότητες. Ένα λεπτό σωματίδιο, το οποίο περιλαμβάνεται στο σχηματισμό δικτύων χαμηλής συχνότητας, αγγίζει άλλα λεπτά μόρια σε πολλά σημεία, δηλαδή, την υψηλότερη τιμή της παραμέτρου n για τις λεπτές-λεπτές επαφές. Στην υψηλότερη συχνότητα ο αριθμός των σημείων επαφής μειώνεται σημαντικά, δηλαδή, η χαμηλότερη τιμή του n. Εντούτοις, η τιμή της g_{ff} είναι πολύ χαμηλή σε χαμηλές συχνότητες και γίνεται πολύ υψηλή σε υψηλή συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι σε χαμηλή συχνότητα σχετικά λίγα μόρια περιλαμβάνονται στο σχηματισμό δικτύων και σε υψηλή συχνότητα ένας μεγάλος αριθμός μορίων συμμετέχει στο δίκτυο. Επομένως, το δίκτυο είναι χαλαρό σε χαμηλή συχνότητα και γίνεται σφιχτό σε υψηλή συχνότητα.

Η τάση προς τη λεπτή-χονδροειδή επαφή με αυξανόμενη συχνότητα είναι παρόμοια με αυτήν της λείας-λείας επαφής εκτός από το ότι λιγότερα σημεία επαφής είναι παρόντα για ένα δεδομένο μόριο που συμμετέχει στο δίκτυο, δηλαδή, μια χαμηλότερη τιμή του n (λεπτή-χονδροειδής επαφή) έναντι αυτής του n (λεπτή-λεπτή επαφή). Όταν ένα λεπτό μόριο αγγίζει ένα χονδροειδές μόριο, δεν είναι πιθανό να αγγίξει κι άλλο χονδροειδές μόριο. Επομένως, το n είναι πολύ κοντά στο 0.5. Όταν ένα χονδροειδές μόριο αγγίζει ένα λεπτό μόριο, μπορεί να αγγίξει πολλά λεπτά μόρια. Αυτό δίνει μια υψηλή αξία για το n. Η τρέχουσα έρευνα δε διαφοροποιεί τις ανωτέρω δύο περιπτώσεις. Επομένως, η αξία του n (λεπτή-χονδροειδής επαφή) είναι κάποιος μέσος όρος άνω των δύο τύπων επαφών. Για πιο ακριβή ανάλυση η πιθανότητα της λεπτής-χονδροειδούς επαφής και αυτή της χονδροειδούς-λεπτής επαφής πρέπει να διαφοροποιηθούν. Δεν έγινε εδώ, επειδή ο αυξανόμενος αριθμός των παραμέτρων δυσκολεύει την αξιολόγησή τους.

Η τιμή του n για τις χονδροειδείς-χονδροειδείς επαφές ορίζεται να είναι 0.5 για το λόγο που προαναφέρθηκε. Ο αριθμός των χονδροειδών μορίων που αγγίζουν άλλα χονδροειδή μόρια αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της συχνότητας, όπως υποδεικνύεται από τις τιμές της g_{cc}.

TABLE 5
Network Parameters

Modulus:	G'_0	G'	G'_m	G'_m	G'_m
ω, rad/s:		10(E−1)	10(E0)	10(E+1)	10(E+2)
n for ff:	2.71	2.34	1.77	1.36	1.20
n for fc:	1.2	1.2	1.0	0.8	0.6
n for cc:	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
g_{ff}:	7.0	15.0	70	300	1,100
g_{fc}:	110	170	220	325	500
g_{cc}:	140	128	170	750	7,000

- Συμπεράσματα

Ο συντελεστής αποθήκευσης PVC πλαστισόλης εξηγείται βάση του τύπου και της πυκνότητας της διαμοριακής επαφής, η οποία αποτελεί ένα δίκτυο. Στις περιοχές συχνότητας, όπου διαμορφώνεται το ακινητοποιημένο στρώμα, η παρούσα εργασία περιλαμβάνει μόνο την κινητή φάση.

Η διεπιφάνεια επαφής από πλαστισόλη, που αποτελείται από λεπτά και χονδροειδή μόρια, αντιμετωπίζεται όπως υφίσταται στα τρία είδη των προαναφερθέντων επαφών. Για τα μόρια που συμμετέχουν στο σχηματισμό δικτύων, ο αριθμός σημείων επαφής ανά μόριο αξιολογείται και για τα τρία είδη των επαφών. Επίσης, αξιολογήθηκαν σχετικοί αριθμοί μορίων που συμμετέχουν σε έκαστο από τους τρεις τύπους των επαφών.

Στη χαμηλότερη συχνότητα λιγότερα μόρια περιλαμβάνονται στο δίκτυο αλλά εκείνα που περιλαμβάνονται έχουν περισσότερα σημεία επαφής ανά μόριο. Στην υψηλότερη συχνότητα πολλά περισσότερα μόρια περιλαμβάνονται στο δίκτυο, με λιγότερα σημεία επαφής ανά μόριο. Υπάρχουν περισσότερα σημεία επαφής ανά λεπτό μόριο απ' ότι ανά χονδροειδές μόριο. Εντούτοις, ένα χονδροειδές μόριο σε ένα δίκτυο επηρεάζει περισσότερο το μέγεθος του συντελεστή αποθήκευσης.

4.4 Διαμόρφωση του εύρους της μεταβλητής κόπωσης των σύνθετων υλικών: μια αναθεώρηση και αξιολόγηση της κατάστασης προόδου για τη φασματική φόρτιση

Σ' αυτό το άρθρο, αναθεωρούμε την πειραματική έρευνα και τη διαμόρφωση ενισχυμένων ινών σύνθετων πολυμερών υλικών που υποβάλλονται στο εύρος της μεταβλητής κόπωσης. Γενικά, αυτά τα πρότυπα είναι εμπειρικά ή φαινομενολογικά και περιέχουν τις παραμέτρους που πρέπει να καθοριστούν χρησιμοποιώντας σταθερές, και σε μερικές περιπτώσεις μεταβλητές, πληροφορίες εύρους κόπωσης για το εν λόγω υλικό σύστημα. Σε πολλές περιπτώσεις, οι συντάκτες που πρότειναν αυτά τα πρότυπα απλά τα ταίριαζαν στα πειραματικά μεταβλητά αποτελέσματα εύρους κόπωσης και έτσι η προγνωστική τους ικανότητα παρέμεινε αβέβαιη. Η προγνωστική ακρίβεια των προτύπων κόπωσης που εξετάστηκαν σε αυτό το άρθρο συγκρίθηκαν με την εφαρμογή τους σε τέσσερα υλικά συστήματα για τα οποία ήταν διαθέσιμες εκτενείς πληροφορίες κόπωσης. Αρκετές προσεγγίσεις απορρίπτονται επειδή τα στοιχεία που απαιτούνται για να τις εγκαταστήσουν δεν είναι διαθέσιμα ή η διατύπωσή τους αποτρέπει την απλή εφαρμογή σε μια φασματική φόρτιση με τους φραγμούς ενός κύκλου στο μήκος. Τέσσερις κανόνες συσσώρευσης ζημιών και οκτώ υπόλοιπες προσεγγίσεις δύναμης είναι κατάλληλες στο στατικό, σταθερό εύρος κόπωσης, υπόλοιπης δύναμης, και δύο μπλοκαρισμένοι φραγμοί φόρτισης κόπωσης για κάθε σύνολο στοιχείων. Κατόπιν τα πρότυπα χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τη ζωή κόπωσης υπό από τις παραλλαγές **WISPER, WISPERX,** και του διανεμημένου φάσματος φορτίων κόπωσης **Rayleigh**, που εφαρμόστηκαν πειραματικά. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο κανόνας του **Palmgren-Miner** δεν είναι συντηρητικός σε κάθε περίπτωση και κέρδη ακριβείας είναι δυνατά με τη χρησιμοποίηση ενός απλού νόμου υπόλοιπου δύναμης, όπως αυτόν που προτείνεται από το πρότυπο των **Broutman και Sahu**. Οι πιο σύνθετες προσεγγίσεις υπολοίπων δύναμης έδωσαν ακριβέστερα αποτελέσματα σε μερικές περιπτώσεις, αλλά συνολικά δεν παρείχαν σημαντική βελτίωση σχετικά με το πρότυπο των **Broutman και Sahu**.

- Αποτελέσματα και Συζήτηση

Η πρόβλεψη προκύπτει από κάθε πρότυπο για μια επιλογή περιπτώσεων φασματικής φόρτισης από τα σύνολα στοιχείων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 6-8. Γενικά, χαμηλότερη πίεση και πιο μακροχρόνιες πειραματικές περιπτώσεις διάρκειας ζωής επιλέχτηκαν για τη διαμόρφωση επειδή αυτό είναι το πλησιέστερο καθεστώς στην πραγματική χρήση σχεδίου αυτών των υλικών. Η εξίσωση

$$\text{Model Error} = M_e = \log\left(\frac{N_{\text{model}}}{N_{\text{experiment}}}\right)$$

χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το M_e για κάθε πρότυπο αποτέλεσμα βασισμένο στο μέσο πειραματικό αποτέλεσμα για εκείνη την περίπτωση. Μια τιμή $M_e=0$ δείχνει ότι το πρότυπο ταίριαξε με το πειραματικό αποτέλεσμα, ενώ $M_e=1$ δείχνει μια προβλεφθείσα ζωή 10 φορές την πειραματική ζωή, και $M_e=-1$ δείχνει ότι η προβλεφθείσα ζωή ήταν το 1/10 της πειραματικής ζωής. Ο αριθμός των πειραματικών αντιγραφών ποίκιλε από 4 έως 11 για κάθε περίπτωση φόρτισης και σε μερικές περιπτώσεις η διασπορά στις πειραματικές φασματικές αστοχίες κόπωσης εκτείνεται μια δεκαετία ή περισσότερο έτσι ώστε η εμπιστοσύνη στις πειραματικές μέσες τιμές να είναι περιορισμένη. Ένα $-0,3<M_e<0,7$ δείχνει ένα καλό αποτέλεσμα όπου η προβλεφθείσα ζωή κόπωσης ήταν μέσα στην έκταση μιας δεκαετίας περιλαμβάνοντας την πειραματική ζωή.

Για το υλικό DD16 (Πίνακας 6), όλα τα πρότυπα εκτός από το Y1 έδωσαν μη συντηρητικά αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση φόρτισης. Για τα ελαττωματικά πρότυπα συσσώρευσης, το πρότυπο OH παρείχε ελαφρώς καλύτερες προβλέψεις από το PM ενώ το BF ήταν γενικώς το χειρότερο πρότυπο (το λιγότερο συντηρητικό). Από τα γενικά πρότυπα δύναμης υπολοίπων, το RS5 έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα, αλλά ήταν μόνο ελαφρώς καλύτερα από την πολύ απλούστερη έκδοση BS του προτύπου. Το πρότυπο INT έδωσε τις καλύτερες προβλέψεις γι' αυτό το σύνολο στοιχείων με λάθη που κυμαίνονται από 117% ως 192% της πραγματικής μέσης ζωής κόπωσης. Το πρότυπο Y1 ήταν υπερβολικά συντηρητικό προβλέποντας μόνο περίπου 26% της πραγματικής ζωής κόπωσης σε μερικές περιπτώσεις. Το μεγαλύτερο γενικά σφάλμα για τα φάσματα **WISPERX** από το όλα τα πρότυπα μπορούν ενδεχομένως να αποδοθούν στο γεγονός ότι οι παράμετροι ήταν κατάλληλες χρησιμοποιώντας μόνο το στοιχείο R=0.1 ακόμα κι αν αυτό το φάσμα περιέχει ένα ευρύ φάσμα του P και το N_i αξιολογήθηκε για κάθε κύκλο του **WISPERX** βασισμένο στην παρεμβολή του γραφήματος σταθερής ζωής. Εντούτοις, μεγαλύτερα λάθη βρέθηκαν για τις προβλέψεις **WISPERX** τόσο από τα πρότυπα PM όσο και BS επίσης, κανένα από τα οποία δεν περιέλαβε οποιαδήποτε συναρμολόγηση πέρα από το N_i.

Table 6
Comparison of model predictions for mean fatigue life of DOE/MSU DD16 material under spectrum loading

Material	DD16	DD16	DD16	DD16
Spectrum	WISPERX	WISPK	WISXR01	WISXR01
max(|σ|) (MPa)	259.5	255.3	237.2	203.5
# Replicates	6	8	9	6
Average exp. N	915,000	532,000	204,000	1,380,000
# Spectrum repeats	71.3	41.5	16.0	109
Model	M_e			
PM	0.40	0.26	0.26	0.10
OH	0.37	0.23	0.24	0.07
BF	0.57	0.44	0.44	0.28
HR	0.39	0.26	0.26	0.10
BS	0.32	0.19	0.24	0.08
RS1	0.40	0.26	0.27	0.10
RS2	–	–	–	–
RS3	0.31	0.18	0.24	0.07
RS4	–	–	–	–
RS5	0.30	0.18	0.24	0.07
Y1	−0.58	−0.31	−0.13	−0.57
INT	0.28	0.16	0.23	0.07

Στο σύνολο στοιχείων του υλικού MD2 (Πίνακας 7), όλα τα πρότυπα διενεργήθηκαν πολύ καλά, ειδικά για τη διαμόρφωση των πλήρων φασμάτων **WISPER**. Αυτό ίσχυε ακόμη και για εκείνα τα πρότυπα που περιέχουν τις παραμέτρους συναρμολογήσεων με βάση μόνο το στοιχείο P=0.1. Εντούτοις, οι προβλέψεις δεν ήταν σχεδόν τόσο καλές για το ομοιοκατευθυνόμενο υλικό UD2 με προβλεφθείσα διάρκεια ζωής χαρακτηριστικά περίπου 3.5 φορές το πειραματικό αποτέλεσμα. Πάλι το Y1 έδωσε συντηρητικά αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση. Άλλα πρότυπα ήταν σωστά ή ελαφρώς συντηρητικά για το φάσμα **WISPER** που εφαρμόζεται σε φύλλο πλαστικού MD2. Το BS έδωσε πιο συντηρητικά αποτελέσματα από το PM σε όλες τις περιπτώσεις. Το πρότυπο INT έδωσε επίσης καλά αποτελέσματα για το φύλλο πλαστικού MD2 και ήταν παρόμοιο με τα άλλα υπόλοιπα πρότυπα δύναμης για την UD2 περίπτωση. Στο UD2 φύλλο πλαστικού, τα RS2 και RS4 έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα από άλλα γενικευμένα υπόλοιπα πρότυπα δύναμης, που δείχνουν ότι έχοντας τις παράμετρους A και Γ ως συνάρτηση της πίεσης είναι χρήσιμο για την ομοιοκατευθυνόμενη φυλλόμορφη συμπεριφορά. Στο UD2 φύλλο πλαστικού, οι παράμετροι A και C των RS2 και RS4 προτύπων αυξήθηκαν με την πίεση ενώ στα άλλα φύλλα πλαστικού μειώθηκαν ή ήταν σχετικά σταθερά. Αυτό μπορεί να εξηγήσει γιατί το φύλλο πλαστικού UD2 είναι η μόνη περίπτωση όπου τα RS2 και RS4 διενεργήθηκαν καλύτερα από τα άλλα υπόλοιπα πρότυπα δύναμης. Το πρότυπο BF έδωσε κατά πολύ τα χειρότερα αποτελέσματα για το φύλλο πλαστικού UD2 , υπερπροβλέποντας τη ζωή έως 6 φορές, ενώ το πρότυπο Y1 υποπροέβλεψε τη ζωή κατά περίπου 50%.

Table 7
Comparison of model predictions for mean fatigue life of OPTIMAT database materials under spectrum loading

Data set	MD2	MD2	MD2	UD2	UD2
Spectrum	WISPER	WISPER	WISPERX	WISPER	WISPER
max(σ_x) (MPa)	355	284	248	375	350
# Replicates	4	4	3	7	5
Average exp. N	673,173	5,544,292	2,735,250	4,787,267	9,118,844
# of blocks	5.1	44.8	213.2	36.1	69.3
Model	M_e				
PM	0.02	0.07	0.23	0.60	0.59
OH	−0.20	−0.15	0.02	–	–
BF	0.08	0.13	0.29	0.80	0.80
HR	0.01	0.06	0.23	0.60	0.59
BS	−0.09	−0.05	0.15	0.50	0.50
RS1	0.08	0.07	0.23	0.60	0.59
RS2	−0.10	−0.04	0.17	0.46	0.47
RS3	0.00	0.06	0.23	0.50	0.50
RS4	0.00	0.06	0.23	0.47	0.48
RS5	0.02	0.07	0.23	0.55	0.55
Y1	−0.03	−0.78	−0.43	−0.30	−0.33
INT	−0.04	0.02	0.21	0.55	0.55

Το στοιχείο VT8084 του φάσματος RAY95 ήταν η μόνη συμπίεση που κυριαρχούσαν τα δεδομένα κόπωσης φάσματος διαθέσιμα γι’ αυτήν τη μελέτη. Σ’ αυτήν την περίπτωση, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 8, τα περισσότερα πρότυπα διενεργήθηκαν πολύ καλά με εξαίρεση το BF που κατέδειξε μη αποδεκτό σφάλμα. Τα πρότυπα PM, RS3 και RS5 έδωσαν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα και τα πρότυπα HR, BS, RS1 και INT απέδωσαν επίσης εξίσου καλά δίνοντας ελαφρώς πιο συντηρητικές προβλέψεις της ζωής κόπωσης από τα πρώτα τρία. Το Y1 πρότυπο, μαζί με τα RS2 και RS4 πρότυπα ήταν υπερβολικά συντηρητικά στη σύγκριση. Υπό την εκτατή έκδοση αυτής της φόρτισης, RAY95R01, τα περισσότερα πρότυπα παρήγαγαν μη-συντηρητικά αποτελέσματα με εξαίρεση τα RS1 και Y1. Το RS1 έδωσε τα καλύτερα γενικά αποτελέσματα στο υλικό σύστημα VT8084 με -0,03< M_e< 0,04 που περιλαμβάνει τόσο τη συμπίεση όσο και την ένταση που κυριαρχεί η κόπωση.

Table 8
Comparison of model predictions for mean fatigue life under spectrum loading of VT8084 material

Material	VT8084	VT8084	VT8084
Spectrum	RAY95	RAY95	RAY95R01
max(‖σ‖) (MPa)	127.2	107.7	183.3
# Replicates	10	10	5
Average exp. N	265,000	916,000	150,000
# Spectrum repeats	53.1	183	30.1
Model	M_e		
PM	0.00	0.06	0.27
OH	–	–	–
BF	1.85	1.92	0.26
HR	−0.01	0.06	0.27
BS	−0.07	0.01	0.17
RS1	−0.03	0.04	−0.01
RS2	−0.22	−0.23	–
RS3	0.00	0.06	0.17
RS4	−0.19	−0.11	–
RS5	0.00	0.06	0.20
Y1	−0.12	−0.05	−0.32
INT	−0.06	0.02	0.17

Και στα τέσσερα συστήματα υλικών και εφαρμόζοντας το εύρος της φασματικής φόρτισης (Πίνακας 9), είναι προφανές ότι το μοντέλο BF είναι το λιγότερο αξιόπιστο στην παραγωγή αποδεκτών αποτελεσμάτων, γενικά υπερπροβλέπει τη ζωή κόπωσης περισσότερο από τα άλλα μοντέλα και στην περίπτωση της συμπιεσμένης φόρτισης (VT8084 RAY95) αποτυγχάνει εντελώς. Αυτό για το σύνολό, δεν αποτελεί έκπληξη δεδομένου ότι οι **Bond** και **Farrow** ανέπτυξαν την προσέγγιση που βασίζεται στους πίνακες που κυριαρχούν σύνθετα και σ’ όλα τα υλικά που εξετάστηκαν εκεί κυριαρχούσαν οι ίνες. Ενώ το σενάριο του να είναι σε θέση να καθορίσει κάποιος τις παραμέτρους κόπωσης από ιδιότητες στατικών μοντέλων είναι ελκυστικό, αυτή η προσέγγιση είναι πιθανό να μην είναι πρακτική για ένα γενικό μοντέλο όπου κυριαρχούν τα υλικά από ίνες εκτός από πολύ ειδικές περιπτώσεις.

Table 9
Comparison of model predictions statistics compiled for all data sets and spectrum loads

Model	max(M_e)	min(M_e)	mean(M_e)	median(M_e)
PM	0.60	0.00	0.24	0.24
OH[a]	0.37	−0.20	0.08	0.07
BF	1.92	0.08	0.65	0.44
HR	0.60	−0.01	0.23	0.24
BS	0.50	−0.09	0.16	0.16
RS1	0.60	−0.03	0.22	0.17
RS2[a]	0.47	−0.23	0.07	−0.04
RS3	0.50	0.00	0.19	0.17
RS4[a]	0.48	−0.19	0.13	0.06
RS5	0.55	0.00	0.21	0.19
Y1	−0.03	−0.78	−0.33	−0.31
INT	0.55	−0.06	0.18	0.17

Λαμβάνοντας υπόψη την κακή φήμη του PM που βασίζεται σε δύο εμπόδια φόρτισης κόπωσης, το μοντέλο αποδίδει καλά υπό την επαναλαμβανόμενη φασματική φόρτιση που θεωρείται εδώ με τη χειρότερη πρόβλεψη να είναι περίπου 4 φορές η πειραματική ζωή κόπωσης στο μονοκατευθυνόμενο υλικό UD2 και κατ ΄άλλον τρόπο δίνοντας προβλέψεις 2,5 φορές την πειραματική ζωή. Το μοντέλο OH έδωσε πιο συντηρητικά (και γενικά καλύτερα συνολικά) αποτελέσματα απ’ ότι το PM για τις περιπτώσεις όπου στοιχεία εμπόδιων φόρτισης υπήρχαν διαθέσιμα για να χωρέσουν στην παράμετρο A. Το μοντέλο HR παρήγαγε σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα με το μοντέλο PM σε όλες τις περιπτώσεις, πράγμα που δείχνει ότι τίποτα δεν αποκτήθηκε από την εφαρμογή αυτής της πιο περίπλοκης νομοθεσίας συσσώρευσης ζημιών.

Το απλό πρότυπο δύναμης υπολοίπων που εισήγαγε ο **Broutman** και **Sahu**, BS, έδωσε πιο συντηρητική πρόβλεψη της ζωής κόπωσης από το PM σε όλες τις περιπτώσεις εξαιτίας της αστοχίας που εμφανίζεται στην υψηλότερη παρούσα τάση στο φάσμα. Αφότου η PM γενικά υπερπροέβλεψε τη ζωή κόπωσης, τα αποτελέσματα της BS ήταν γενικά καλύτερα. Η RS1 εκτελέσθηκε καλύτερα από τη BS στο υλικό VT8084, ιδιαίτερα για τη φόρτιση σε εφελκυσμό, αλλά είχε χειρότερη παρουσία στα υλικά DD16, MD2 και UD2 υπό φάσματα τύπου **WISPER** σε σχέση με το BS. Τα δύο πρότυπα υπολοίπων δύναμης, RS2 και RS4, όπου οι παράμετροι ποικίλλουν ως συνάρτηση της μέγιστης τάσης παρείχαν καλύτερες προβλέψεις στο υλικό UD2 από το αντίστοιχο μοντέλο με σταθερή παράμετρο (RS1 και RS3 αντίστοιχα), αλλά ήταν σημαντικά λιγότερο αποτελεσματικές σε άλλες περιπτώσεις. Αυτό μπορεί να προκληθεί από τον περιορισμό του απλού γραμμικού μοντέλου, με μια τιμή αποκοπής που επελέγη για την εξάρτηση της τάσης από τις παραμέτρους και η στενή περιοχή τιμών πίεσης επί των οποίων τα στοιχεία δύναμης υπολοίπων ήταν διαθέσιμα να χωρέσουν. Το μοντέλο RS2 παρείχε τις καλύτερες προβλέψεις στο σύνολο δεδομένων UD2 και ως εκ τούτου, η προσέγγιση αυτή δεν πρέπει να απορριφθεί, ιδίως όταν μελετούμε μονοκατευθυνόμενο υλικό ή για την εφαρμογή σε μια θεώρηση κρίσιμου στοιχείου. Το μοντέλο των δύο παραμέτρων RS5 παρείχε καλύτερα αποτελέσματα απ’ ότι οι άλλες γενικευμένες προσεγγίσεις εξίσωσης κόπωσης για τα στοιχεία DD16 και το συνολικό φάσμα των $0.0 < M_e < 0.30$, με εξαίρεση τα στοιχεία UD2, όπου $M_e=0.55$ είναι πολύ καλό.
Το πρότυπο αλληλεπίδρασης από τους **Adam** και λοιπούς, το INT, απέδωσε πολύ καλά με $0,06 < M_e < 0.28$ σε όλα τα πολυκατευθυνόμενα φύλλα πλαστικού ενώ υπερπροέβλεπε τη ζωή κόπωσης στο ομοιοκατευθυνόμενο φύλλο πλαστικού ($M_e=0.55$). Η προσέγγιση διαμόρφωσης **Yang** και **Liu**, η οποία πρέπει να σημειώσουμε ότι είναι το μόνο πρότυπο που δεν χρησιμοποίησε N_i που βρίσκεται από τη γραμμική παρεμβολή του διαγράμματος σταθερής ζωής και αντ’ αυτού βάσισε τις παραμέτρους ζωής μόνο στο R=0,1 ή R=-1, είχε συνεπώς συντηρητικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις φασματικής φόρτισης που επιχειρήθηκαν σ’ αυτήν την μελέτη. Αποτελέσματα για το Y1 κυμαίνονταν από $-0.78<M_e<0.02$ και με τα δύο άκρα που εμφανίζονται στο υλικό MD2 υπό τη φόρτιση WISPER. Για το υλικό UD2 υπό τη WISPER η φόρτιση Y1 υποεκτίμησε τη ζωή κόπωσης κατά περίπου 50% συγκρινόμενη με τα άλλα πρότυπα που όλα υποεκτίμησαν την προβλεφθείσα ζωή κατά 200% ή περισσότερο.

Είναι δύσκολο να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για τη σχετική επίδοση των 12 αυτών μοντέλων μεταξύ των στοιχείων των τεσσάρων υλικών, γιατί κάθε μοντέλο διαθέτει περιπτώσεις όπου απέδωσε καλύτερα και περιπτώσεις όπου ήταν λιγότερο από το ιδανικό. Αν και είναι δελεαστικό να επιλέξουμε το πρότυπο Y1 εξαιτίας του συντηρητισμού του, μερικές φορές είναι υπερβολικό έτσι και γενικά έδωσε αντιφατικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, το πρότυπο Y1 έδωσε ζωή μόνο 17% του πειραματικού αποτελέσματος υπό χαμηλή εφαρμογή τάσης της WISPER στο υλικό MD2, ενώ προβλεπόταν 83% της πειραματικής ζωής κόπωσης σε ένα υψηλότερο επίπεδο τάσης. Με σύγκριση, τα περισσότερα από τα άλλα μοντέλα είχαν μια παραλλαγή περίπου 14% της πειραματικής ζωής μεταξύ των δύο αυτών περιπτώσεων. Έτσι, η ακρίβεια της Y1 εμφανίζεται να είναι συνάρτηση του επιπέδου τάσης. Είναι δυνατόν οι βελτιωμένες προβλέψεις να μπορούσαν να επιτευχθούν με το Y1, εάν οι παράμετροι του προτύπου είχαν θεωρηθεί συναρτήσεις του R και του σρ, ωστόσο αυτό θα απαιτούσε πολύ περισσότερη προσπάθεια για να ερευνηθεί. Το πρότυπο BS έδωσε μερικές από τις καλύτερες προβλέψεις συνολικά, ιδίως αν ληφθεί υπόψη ότι μόνο το στοιχείο της σταθερής ζωής ήταν απαραίτητο να ταιριάξει. Το πρότυπο BS παρέχει μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις προβλέψεις του PM σε ορισμένες περιπτώσεις και ήταν σε γενικές γραμμές σύμφωνο με τα άλλα πιο σύνθετα πρότυπα. Η μόνη περίπτωση όπου το BS δεν απέδωσε στο ίδιο επίπεδο με τις πιο σύνθετες εκδόσεις του γενικευμένου δύναμης υπολοίπων ήταν το φάσμα RAY95R01 στο VT8084 υλικό όπου το RS1 ήταν σε θέση να προβλέψει την διάρκεια ζωής σε κόπωση πολύ πιο στενά απ’ ότι οποιοδήποτε από τα άλλα πρότυπα.

- Συμπεράσματα

Αυτό το άρθρο παρέχει μια συνολική αναθεώρηση των προσεγγίσεων μοντελοποίησης για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς κόπωσης των σύνθετων υλικών υπό μεταβλητό πλάτος φασματικής φόρτισης. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα διαθέσιμων προσεγγίσεων στη βιβλιογραφία που κυμαίνεται από διάφορες νομοθεσίες συσσώρευσης βλαβών, μοντέλα για την εναπομένουσα αντοχή ή την υποβάθμιση της ακαμψίας και μοντέλα που βασίζονται στην μικρομηχανική ή στις ιδιότητες του επίπεδου ελάσματος του σύνθετου υλικού. Η εστίαση αυτού του άρθρου ήταν η μονοαξονική φόρτιση κόπωσης των μη-οδοντωτών δειγμάτων. Αυτό είναι ένα σημαντικό βήμα που χαρακτηρίζει αυτά τα σύνθετα FRP, ωστόσο, κατανοώντας τη συμπεριφορά του υλικού υπό διαξονικές τάσεις, στο πέριξ των συγκεντρώσεων τάσεων, και για ορισμένες εφαρμογές εκτός των επίπεδων φορτίων, είναι επίσης σημαντικές πτυχές που πρέπει να γίνουν κατανοητές κατά τη χρήση σύνθετων υλικών σε δομικές εφαρμογές.

Η εφαρμογή των προτύπων κόπωσης σε πραγματικά σύνολα δεδομένων αναδεικνύει πολλά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων προσεγγίσεων. Η πλειονότητα των μοντέλων που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία έχουν εφαρμοστεί μόνο σε σταθερό πλάτος φόρτισης και εμπόδια φόρτισης με λίγα επίπεδα τάσεων. Η συγκριτική μελέτη που παρουσιάστηκε σ’ αυτό το άρθρο αξιολογεί αυτά τα μοντέλα όσον αφορά την προβλεπτική τους δυνατότητα με βάση πιο ρεαλιστικές περιπτώσεις φασματικής φόρτισης με ενδιαφέρον στην ανεμογεννήτρια και τις ναυτικές αρχιτεκτονικές βιομηχανίες. Επιλέχθηκαν τα δεδομένα σε τέσσερα συστήματα υλικών που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πολυμερών σύνθετων υλικών από γυαλί Ε. Για τα σύνολα δεδομένων που επιλέχθηκαν, ο συντελεστής κόπωσης και τα στοιχεία μικρομηχανικής δεν ήταν διαθέσιμα και αυτό περιόρισε τα εφαρμόσιμα μοντέλα για συσσώρευση ζημιών και προσεγγίσεις παραμένουσας αντοχής. Επιπρόσθετα, οι απαιτήσεις το μοντέλο να εφαρμοστεί σε εμπόδια μήκους του ενός κύκλου και οι ισοδύναμοι κύκλοι να υπολογιστούν σε κλειστή μορφή εξάλειψαν διάφορα μοντέλα από την εξέταση. Η υπόλοιπη συσσώρευση ζημιών των τεσσάρων και οκτώ προβλέψεις προτύπων υπόλοιπων δύναμης συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα ζωής κόπωσης για 12 περιπτώσεις φασμάτων από τέσσερα υλικά συστήματα συνόλου δεδομένων.

Τα περισσότερα από τα μοντέλα εκτελούνται επαρκώς πάνω από το εύρος υλικών και φασμάτων. Το χειρότερο σενάριο είναι το μονοκατευθυνόμενο έλασμα UD2, όπου τα περισσότερα μοντέλα υπερεκτιμούν τη ζωή κόπωσης ως 3-4 φορές την πειραματική ζωή. Ενώ τα συντηρητικά αποτελέσματα που παράγονται από το πρότυπο Y1 είναι παρήγορα για το μηχανικό σχεδιασμό, ο στόχος της πρόβλεψης φασματικής ζωής κόπωσης θα πρέπει να είναι ακριβείς προβλέψεις. Μόνο με ακριβείς προβλέψεις μπορεί ένα κατάλληλο επίπεδο του συντηρητισμού να ενσωματωθεί στο σχεδιασμό για την εξασφάλιση αποδεκτής αξιοπιστίας χωρίς υπερβολικό υπερσχεδιασμό ενός μέρους. Υπερβολικά συντηρητικά μοντέλα (ή αυτά χωρίς ένα γνωστό επίπεδο συντηρητισμού) θα οδηγήσουν σε προσχεδιασμένες δομές υπερβολικού βάρους και κόστους. Το Y1 ήταν αρκετά συντηρητικό σε ορισμένες περιπτώσεις, ειδικά για περιπτώσεις χαμηλότερης τάσης - μακρύτερης ζωής, αλλά το επίπεδο του συντηρητισμού δεν ήταν συνεπές έτσι ρυθμίζοντας την μέθοδο της προσαρμογής παραμέτρων δε θα βελτιώσει τα συνολικά αποτελέσματα. Αυτή η συμπεριφορά, σε συνδυασμό με τη δυσκολία στην τοποθέτηση του Y1 χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SLERA σημαίνει ότι η προσέγγιση αυτή δεν είναι ιδανική γι’ αυτό το είδος της μοντελοποίησης.

Συνολικά, η απλότητα και η σχετικά καλή ακρίβεια και συνοχή των προβλέψεων που παράγονται από το μοντέλο των **Broutman** και **Sahu** υποδηλώνουν ότι μπορεί να είναι ένας καλός υποψήφιος να αντικαταστήσει το PM στη σχεδιαστική πρακτική. Μόνο μικρά κέρδη βρέθηκαν για την πιο σύνθετη νομοθεσία υπολειμματικής δύναμης RS1-RS5 και INT, τα οποία απαιτούν σημαντικά περισσότερα πειραματικά δεδομένα κόπωσης, και κανένα από αυτά τα μοντέλα δεν ήταν σταθερά καλύτερο από το BS σε όλα τα σύνολα δεδομένων και φάσματα. Το μοντέλο OH ήταν σταθερά πιο συντηρητικό από ότι το PM, αλλά δεν έδειξε μια γενική βελτίωση στην ακρίβεια, και η απαίτηση των επαναλαμβανόμενων στοιχείων φόρτισης των δύο εμποδίων να χωρέσουν την παράμετρο του μοντέλου είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα. Η αναγκαιότητα του προσδιορισμού της αποτυχίας λειτουργίας (τάσης έναντι συμπίεσης) εκ των προτέρων για το BS, ή οποιοδήποτε από τα άλλα πρότυπα εναπομένουσας αντοχής, είναι ένα ευδιάκριτο μειονέκτημα του PM και θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά, εάν η προσέγγιση υπολοίπου δύναμης χρησιμοποιείται σε μια αξιόπιστη τεχνική σχεδιασμού. Από την άλλη πλευρά, η πρόβλεψη της εναπομένουσας αντοχής με την πάροδο του χρόνου έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει σύγκριση με ακραία γεγονότα τάσεων και έτσι ίσως γίνει ακριβέστερα εκτίμηση της ασφάλειας μιας δομής από ότι είναι δυνατόν εξετάζοντας μόνο τη ζωή κόπωσης.

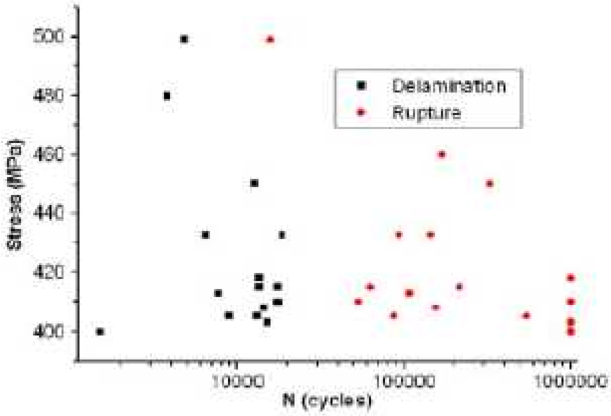
Μέχρι οι μηχανισμοί κόπωσης σε ινώδη σύνθετα υλικά να είναι πλήρως κατανοητοί από το μικροσκοπικό επίπεδο μέχρι το μακροσκοπικό επίπεδο, η εφαρμογή των υλικών αυτών στις δομές, όπου πρέπει να υπομένουν υψηλό εύρος μεταβλητών κύκλων, θα συνεχίσει να βασίζεται σε εμπειρικά ή φαινομενολογικά μοντέλα που ταιριάζουν με τα πειραματικά δεδομένα. Ενώ το γραμμικό μοντέλο συσσώρευσης ζημιών των **Broutman** και **Sahu** εμφανίζεται να είναι η βέλτιστη ισορροπία της ακρίβειας και να τοποθετεί τα απαιτούμενα στοιχεία στην παρούσα ανάλυση, η επέκταση προς την πρόβλεψη των κατανομών δύναμης υπολοίπων, θα πρέπει πραγματικά να αξιολογήσει τη σχετική απόδοση αυτών των μοντέλων για φασματική φόρτιση. Επιπλέον, συνιστάται η ανάπτυξη μιας προσέγγισης δύναμης υπολοίπων που να μπορεί να χειριστεί τρόπους αστοχίας τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη ταυτόχρονα.

4.5 Ανθρακικές ίνες με μη πτυχωμένη πολυαξονική ενίσχυση και μονοσυστατική εποξική σύνθετου συστήματος: συμπεριφορά κόπωσης

Τα σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν εφαρμοστεί ευρέως στο πεδίο της αεροναυπηγικής. Ωστόσο, η σύνθετη επεξεργασία, η οποία χρησιμοποιεί ξεκλείδωτα καλούπια, πρέπει να αποφεύγεται εν όψει των σφιγκτών απαιτήσεων και επίσης λόγω πιθανής μόλυνσης του περιβάλλοντος. Για την παραγωγή υψηλής απόδοσης δομικών σκελετών που συναντά αεροναυτική αναπαραγωγιμότητα και κριτήρια χαμηλού κόστους, η βραζιλιάνικη βιομηχανία έχει δείξει ενδιαφέρον για την εξερεύνηση της διαδικασίας χύτευσης της μεταφοράς ρητίνης (RTM) λαμβάνοντας υπόψη ένα σύστημα ενέσιμης πίεσης κλειστού εκμαγείου το οποίο επιτρέπει την ταχύτερη επίτευξη και φορές θεραπείας. Λόγω των ανισοτροπικών και μη ομογενών χαρακτηριστικών του σύνθετου ινώδους, η συμπεριφορά κόπωσης είναι ένα σύνθετο φαινόμενο αρκετά διαφορετικό από τα μεταλλικά υλικά ζωτικής σημασίας για να διερευνηθούν λαμβάνοντας υπόψη την αεροναυτική εφαρμογή. Τα δείγματα υποκλίμακας κόπωσης των ενδιάμεσων ανθρακικών ινών με μη πτυχωμένη πολυαξονική ενίσχυση και μονοσυστατικό εποξικό σύστημα στο σύνθετο παρήχθησαν σύμφωνα με το ASTM 3039 D. Οι αξονικές δοκιμές κόπωσης έγιναν σύμφωνα με το ASTM D 3479. Ένα ημιτονοειδές φορτίο συχνότητας 10 Hz και αναλογία φορτίου R = 0.1. Παρατηρήθηκε υψηλή κόπωση για διάστημα που λαμβάνεται για NCF/RTM6 σύνθετα. Η στατιστική ανάλυση **Weibull** εφαρμόστηκε για να περιγράψει την πιθανότητα αστοχίας για υλικά υπό κυκλικά φορτία και το μοτίβο θραύσεων παρατηρήθηκε με μικροσκοπία σάρωσης ηλεκτρονίων.

- Αποτελέσματα και συζήτηση

Τα αποτελέσματα δοκιμών αξονικής κόπωσης για NC2/RTM6 σύνθετα φαίνονται στην καμπύλη S-N που υποδεικνύεται στο παρακάτω γράφημα. Το γράφημα αυτό παρουσιάζει κανονικοποιημένες καμπύλες S*N με τον αριθμό των κύκλων κόπωσης να αντιπροσωπεύουν μία συνάρτηση αναλογίας μεταξύ της μέγιστης εφαρμοσμένης τάσης και της τελικής αντοχής σε εφελκυσμό των εξεταζόμενων υλικών.



Είναι απολύτως σαφής η υψηλή αντοχή σε κόπωση για τα NC2/RTM6 σύνθετα. Γι ᾽αυτό το σύνθετο η αναλογία της εφαρμόσιμης τάσης ανήκει στο διάστημα 72-60% κατά την κόπωση. Το γράφημα S*N δείχνει τις χρησιμοποιούμενες τιμές μέγιστης τάσης μεταξύ 499 και 400 MPa. Μία σημαντική διασπορά δεδομένων παρατηρείται επίσης στην περίπτωση αυτή, ειδικά στην περιοχή από 400 έως 420 MPα, διεργασία πλευρικής διαστρωμάτωσης παρατηρήθηκε για τα δείγματα. Αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα όταν η ενέργεια υπερβαίνει την ικανότητα απορρόφησης του μητρώου και η διαδικασία αποκόλλησης προσαρμόζεται στο νέο σύστημα, το οποίο ελαχιστοποιεί τη συσσωρευμένη τάση μέχρι την θραύση, το φαινόμενο αυτό συνδέεται με τη χαμηλή χαρακτηριστική ακαμψία του μητρώου.

Table 1. Weibull parameters of specimen IR 384 A

Stress (MPa)	%UTS	Cycles (N)	Shape Parameter, β	Scale Parameter, α (N), 63,2%
		110639		
410	57	216389	0,86	2.082.204
		575016		
		1593		
482	67	5676	0,82	41.425
		8933		
518	72	2410	0,63	101.653

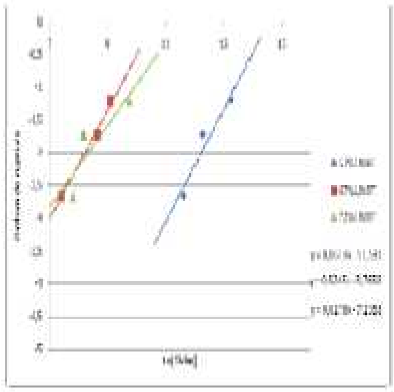


Fig. 4. Weibull parameters Curve – different tension

Τα αποτελέσματα των παραμέτρων σχήματος έδειξαν τιμές μικρότερες του 1, πράγμα που σημαίνει μαθηματικώς ότι το υλικό αυτό παρουσιάζει μια μειούμενη αναλογία αστοχίας και θα πρέπει να συνδεθεί με την αυξανόμενη τάση του υλικού να αστοχήσει κατά το φαινόμενο στην αρχική ζωή κόπωσης που ονομάζεται burn-in, τυπική ανάπτυξη της πρόωρης νέκρωσης υλικών. Οι χαμηλές τιμές της παραμέτρου σχήματος που υπεισέρχεται μαρτυρά την υψηλή διασπορά των αποτελεσμάτων σε επίπτωση της ετερογένειας των υλικών.

Table 2. Weibull parameters of specimen IR 386 A

Stress (MPa)	%UTS	Cycles (N)	Shape Parameter, β	Scale Parameter, α (N), 63,2%
412	57	217363 256366 1006370	0,73	4.874.500
445	67	25321 36672 38713	0,42	4.595.000
479	72	17348	3,11	60.030

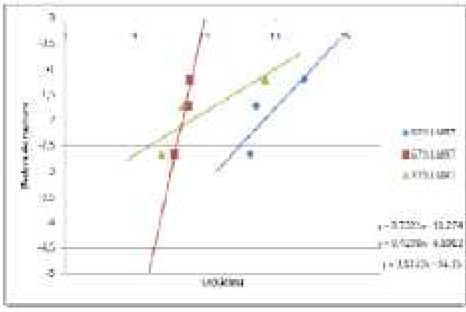


Fig. 5. Weibull parameters Curve – different tension

Table 3. Weibull parameters of specimen IR 388 A

Stress (MPa)	%UTS	Cycles (N)	Shape Parameter, β	Scale Parameter, α (N), 63,2%
410	57	110639 216389 575016	0,86	2.082.204
482	67	1593 5676 8933	0,82	41.425
518	72	2410	0,63	101.653

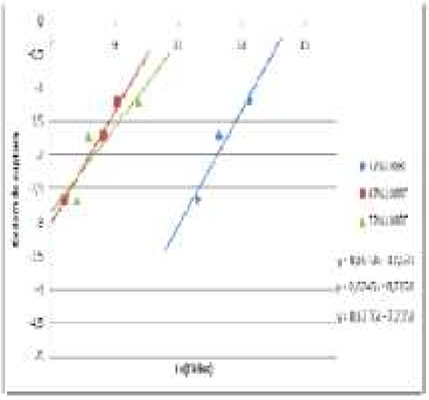


Fig. 6. Weibull parameters Curve – different tension

Table 3. Weibull parameters of specimen IR 390

Stress (MPa)	%UTS	Cycles (N)	Shape Parameter, β	Scale Parameter, α (N), 63,2%
390	62	71405 85341 93544	5,40	116.000
420	67	17663 31135 48370	1,46	107.500
450	72	16800	0,41	3.583.000

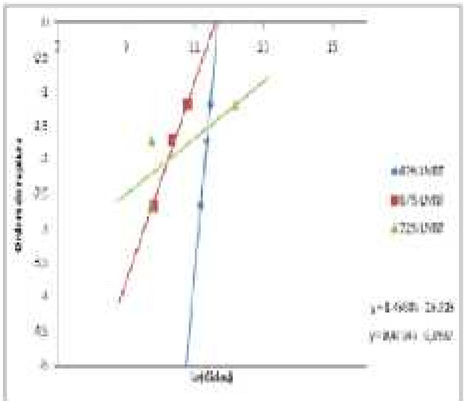
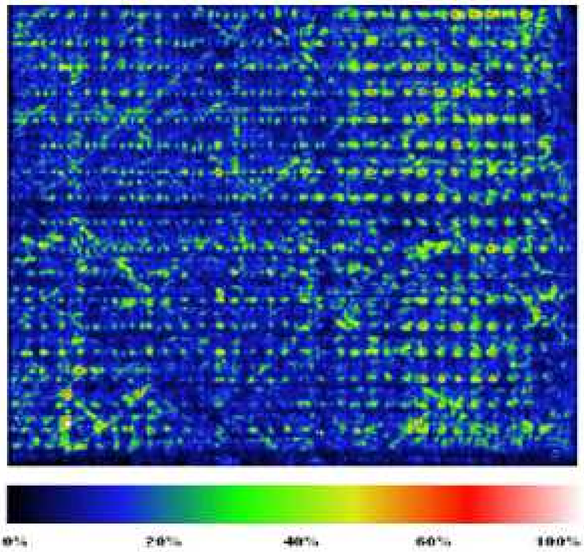
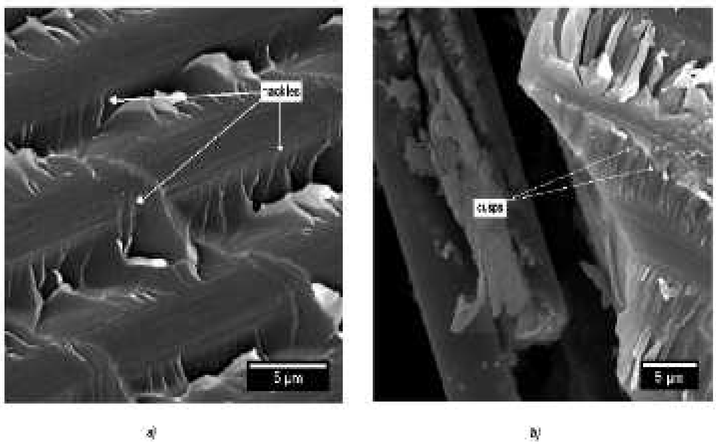


Fig. 7. Weibull parameters Curve – different tension

Μερικά δείγματα παρουσίασαν επίσης δείκτη β μεγαλύτερο από 1, το οποίο χαρακτηρίζεται σαν μια ιδανική συμπεριφορά για τα υλικά. Το σχήμα αντιπροσωπεύει το χάρτη εμποτισμού από σύνθετο υλικό που λαμβάνεται από το υπερηχογράφημα C-scan. Ο εμποτισμός είναι αποδεκτός δεδομένου ότι στο αεροναυτικό πεδίο το όριο είναι 12% της εξασθένησης. Μπορεί να παρατηρηθεί, επίσης, η ετερογένεια των υλικών που συνδέονται με τα κόκκινα και κίτρινα σημεία, εμπόδια για το κύμα κατά το πέρασμα μέσω των σύνθετων ελασμάτων. Οι μπλε περιοχές σχετίζονται με την ικανοποιητική απορρόφηση και διάθλαση κυμάτων.



Οι τρόποι αστοχίας των πολυμερών συνδέονται με τη μοριακή δομή, τη γεωμετρία δείγματος, τις μεθόδους επεξεργασίας, τις δοκιμές θερμοκρασίας, την αναλογία φόρτισης, την κατάσταση τάσης, την ενίσχυση και το βαθμό πλαστικοποίησης. Όσον αφορά τα μητρώα των πολυμερών σύνθετων ελασμάτων, η συμπεριφορά των μητρώων δείχνει επίσης εξάρτηση από φόρτιση. Φορτίο εφελκυσμού κατά την εγκάρσια κατεύθυνση παράγει ρήξεις όπως παρατηρείται στο Σχήμα 9α και διατμητικό φορτίο εισάγει ζώνες σαν γλωχίνες που παρατηρούνται στο Σχήμα 9β.



Το Σχήμα 9α δείχνει επίσης υψηλή πρόσφυση ινών / μήτρας και, την ίδια στιγμή, αστοχία συνεκτικής ρητίνης, που σχετίζεται με τη χαμηλή ακαμψία της μήτρας. Το Σχήμα 9β δεικνύει παραμόρφωση της μήτρας και την παρουσία των γλωχίνων, οι οποίες αποδίδονται στο διατμητικό φορτίο που ενεργεί στα σύνθετα κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης.

- Συμπεράσματα

Για μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση στην κλίμακα από 405 MPa έως 480 MPa, η αναλογία κύκλοι διαστρωμάτωσης/κύκλοι θραύσης παρουσίασε τιμές από 2 έως 6%, με τη μέγιστη να εφαρμόζεται ίση με 8% για 415 MPa.
Παρά την εμφάνιση διαστρωμάτωσης, ο αριθμός των κύκλων σε θραύση είναι, για κάθε επίπεδο τάσης, σημαντικά υψηλότερος από εκείνον που συνδέεται με τη διαστρωμάτωση.

Οι παράμετροι **Weibull** δείχνουν την τάση της πρόωρης αστοχίας του NC2/RTM6 σύνθετου υλικού, όπως επιβεβαιώνεται από την ετερογένεια του υλικού στο χάρτη εμποτισμού.
Θραύση κόπωσης από την ανάλυση σάρωσης ηλεκτρονίων στο μικροσκόπιο έδειξε τυπικές εκδηλώσεις όπως η αποσύνδεση των ινών / μήτρας, το ξάσιμο και το οξύ άκρο των χαρακτηριστικών του κυκλικά φορτισμένου πολυμερούς. Παρατηρήθηκε επίσης συνεκτική αστοχία της ρητίνης που συνδέεται με τη χαμηλή ακαμψία της μήτρας.

4.6 Επιρροή της διαμόρφωσης διαγράμματος σταθερής ζωης στην πρόβλεψη κόπωσης των σύνθετων υλικών

Εξετάστηκε η επιρροή της διαμόρφωσης του διαγράμματος σταθερής ζωής (ΔΣΖ) στην πρόβλεψη της ζωής κόπωσης των σύνθετων υλικών. Παρουσιάζονται ΔΣΖ που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα και πρόσφατα προτάθηκαν ΔΣΖ που εφαρμόζονται σε σύνθετα υλικά και που παρουσιάζουν κόπωση και αποδεικνύεται η δυνατότητα εφαρμογής τους σε μια σειρά από σύνολα δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κόπωσης σύνθετων υλικών από έναν αριθμό καλά τεκμηριωμένων βάσεων δεδομένων. Αξιολογείται η επίδραση της επιλεγμένης διαμόρφωσης των ΔΣΖ για την πρόβλεψη ζωής κόπωσης του σύνθετου υλικού υπό φασματική φόρτιση από την ικανότητά του να προβλέψει με ακρίβεια άγνωστες καμπύλες S-N για αυθαίρετη φόρτιση. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι η απλή τμηματικά γραμμική σύνθεση συγκρίνεται ευνοϊκά με άλλες πιο εξεζητημένα και πολύπλοκα σενάρια. Για τις περισσότερες από τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, οι προβλέψεις S-N που βασίζονται στο αυτοτελές γραμμικό ΔΣΖ είναι οι πιο ακριβείς.

❖ *Κριτήρια Αξιολόγησης*

Τα ακόλουθα κριτήρια εξετάζονται με σκοπό να αξιολογηθεί η εφαρμογή των εξεταζόμενων μοντέλων ΔΣΖ και να εκτιμηθεί η επιρροή τους στην πρόβλεψη ζωής κόπωσης των εξεταζόμενων σύνθετων υλικών:

- Ακρίβεια των προβλέψεων: ποσοτικά από την ακρίβεια της πρόβλεψης νέων S-N καμπύλων.
- Ανάγκη για πειραματικά δεδομένα: ποσοτικά από τον αριθμό των S-N καμπύλων που απαιτούνται για να σχηματίσουν κάθε μοντέλο ΔΣΖ.
- Δυσκολία εφαρμογής: ποιοτικό κριτήριο.
- Εφαρμογές παραδοχής: ποιοτικό κριτήριο.

Όλα τα μοντέλα που περιγράφονται εφαρμόστηκαν στα διαθέσιμα στοιχεία κόπωσης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Για την εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη R=-1. Για την κατασκευή του Kawai CFL, μας απασχόλησαν η καμπύλη R =-1 μαζί με τις στατικές δυνάμεις. Επιπλέον, η καμπύλη R =0,5 χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του υλικού #3, δεδομένου ότι για την περίπτωση αυτή η κρίσιμη αναλογία ήταν R=0,63. Για την εφαρμογή των υπολοίπων μοντέλων - αυτοτελή γραμμικά των **Harris** και **Boerstra** - τρεις έως πέντε S-N καμπύλες, υπό R = 0.1, R =1, R =10 και επιπρόσθετα R = 0.5 και R =2 (για υλικό #3) μαζί με τις στατικές αντοχές χρησιμοποιήθηκαν για να περιγράψουμε όλες τις περιοχές των ΔΣΖ. Το μοντέλο **Kassapoglou** εφαρμόστηκε μόνο για τη βάση δεδομένων του υλικού #3, δεδομένου ότι ήταν το μόνο για το οποίο ήταν διαθέσιμος ένας στατιστικά σημαντικός πληθυσμός των δεδομένων στατικής αντοχής.

❖ *Μοντελοποίηση των τυπικών GFRP στοιχείων κόπωσης*

❖ Υλικό #1

Τρεις από τις τέσσερις υπάρχουσες S-N καμπύλες και οι τιμές στατικής αντοχής αυτών χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου. Η S-N καμπύλη για R =-1 χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του γραμμικού ΔΣΖ και του Kawai CFL. Η αναλογία στατικής αντοχής για το εξεταζόμενο υλικό σύμφωνα με το Kawai είναι -0,76, αλλά καμία καμπύλη S-N στο πλαίσιο της παρούσας αναλογίας R δεν είναι διαθέσιμη. Η ισχύς προσαρμογής της καμπύλης εκτελέσθηκε επί όλων των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων κόπωσης για να προσδιοριστούν οι S-N καμπύλες. Αυτές οι καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις διαμορφώσεις, ώστε να έχουμε την ίδια βάση για τις συγκρίσεις. Για το μοντέλο που προτάθηκε από τον **Boerstra**, αυτό δεν είναι αναγκαίο, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και για αραιά στοιχεία κόπωσης στο χώρο (σ_a-σ_m-N). Ωστόσο, σχεδιάστηκε επίσης η CLD της εντοιχισμένης S-N καμπύλης. Προ-επεξεργασία των δεδομένων αποκάλυψε ότι η εξίσωση κόπωσης $f = Ac^{-p}$ είναι πιο κατάλληλη για τον προσδιορισμό της παραμέτρου f, όπως προβλέπεται από το μοντέλο **Harris**. Η εξίσωση

$$f = A_1 \log N + B_1$$
$$u = A_2 \log N + B_2$$
$$v = A_3 \log N + B_3$$

χρησιμοποιήθηκε για τις παραμέτρους u και v. Το προκύπτον CLD με βάση την εκτίμηση όλων των παραμέτρων χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση καθορίστηκε επίσης για τις συγκρίσεις.

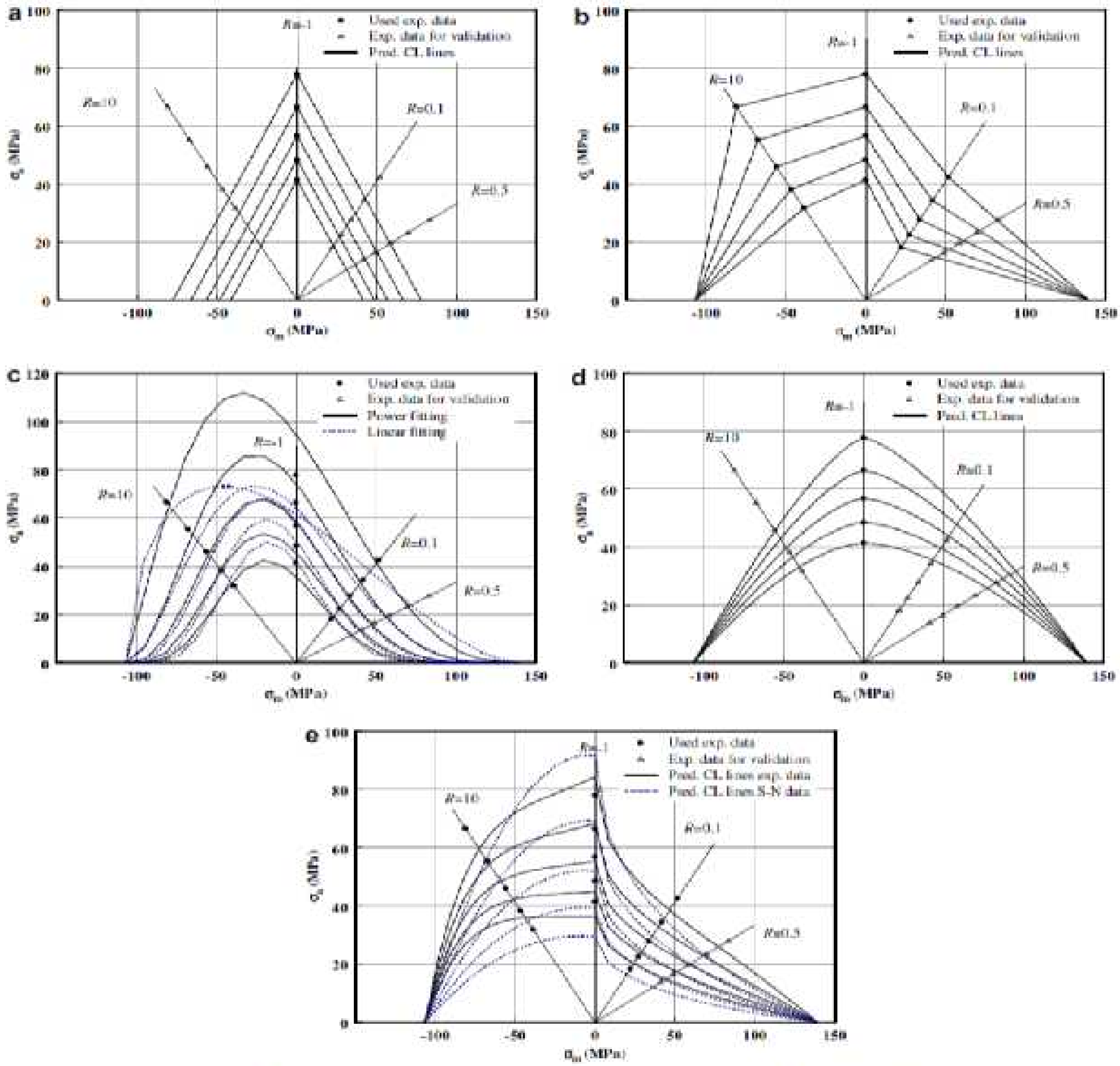
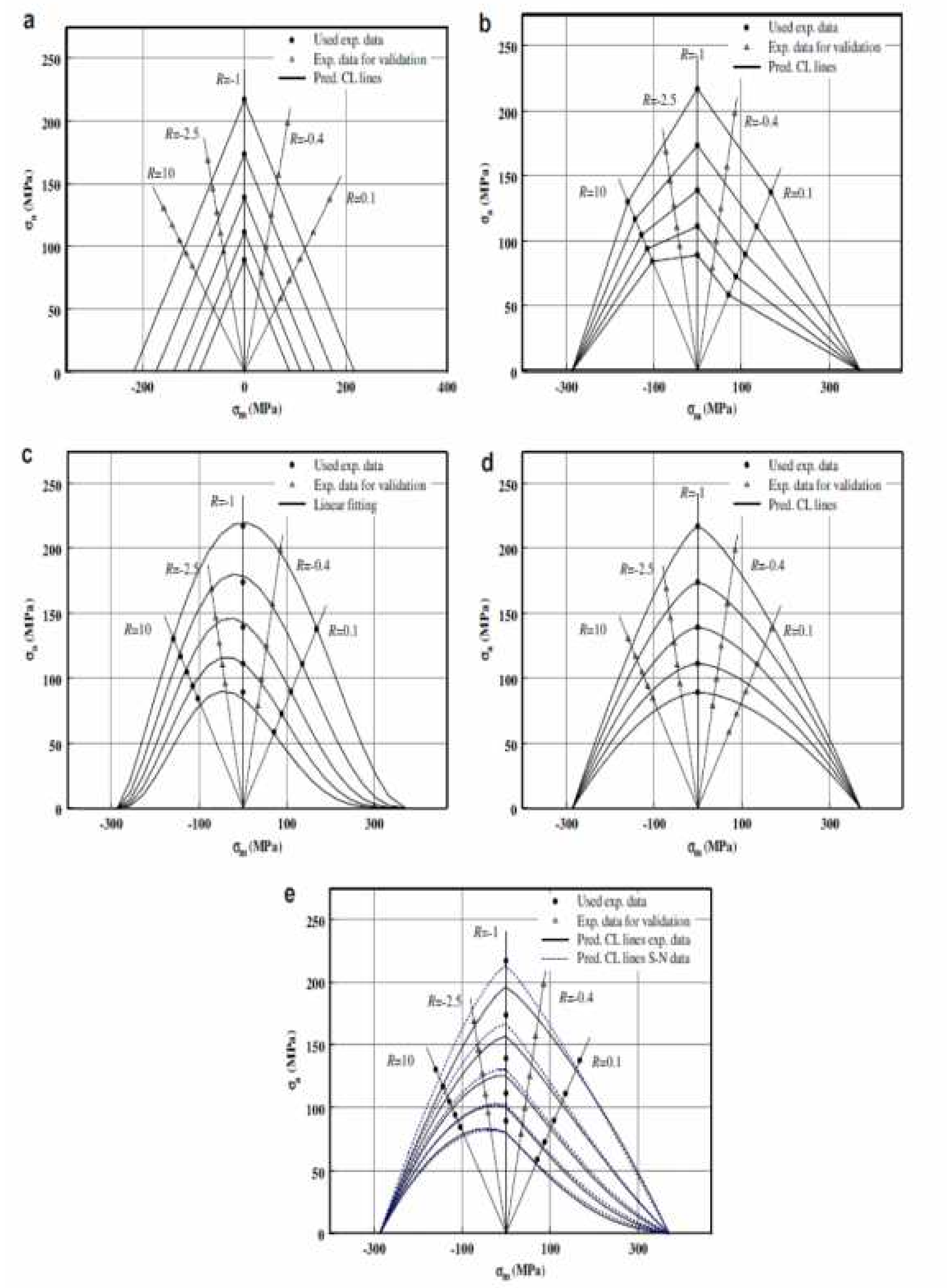


Fig. 2. Constant life diagrams for $N = 10^3 - 10^7$, material #1 (linear-a, piecewise linear-b, Harris-c, Kawai-d, Boerstra-e).

Παρουσιάζονται στο σχήμα διαφορετικές CLD με βάση τις διαφορετικές προσεγγίσεις. Γραμμικά CLD και Kawai CLD είναι ανακριβή για τα εξεταζόμενα υλικά, ενώ η πρόβλεψη του τμηματικά γραμμικού διαγράμματος των S-N σε αναλογία τάσης, R=0,5 είναι ακριβής (R^2 = 0,89). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η S-N καμπύλη που έχει χρησιμοποιηθεί ως την κρίσιμη είναι διαφορετική από αυτή που συνιστάται από το μοντέλο του **Kawai**. Αυτή η διαφορά θα μπορούσε να είναι ο λόγος για τα ανακριβή αποτελέσματα. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα, η επιρροή της παραμέτρου f με το σχήμα του προβλεπόμενου CLD με βάση το μοντέλο **Harris** είναι πολύ σημαντική. Ανεπαρκής μοντελοποίηση της σχέσης του με τη ζωή κόπωσης μπορεί να εισάγει σημαντικά σφάλματα. Ωστόσο, η χρήση και των δύο εξισώσεων εφαρμογής παρουσίασαν σφάλματα, ειδικά κοντά στην περιοχή κόπωσης χαμηλού κύκλου. Η εφαρμογή του μοντέλου **Boerstra** που βασίζεται στα πειραματικά αποτελέσματα, αντί να τοποθετήσει S-N καμπύλες οδήγησε σε μια λιγότερο συντηρητική CLD για το εξεταζόμενο υλικό. Η ακρίβεια όμως δεν επηρεάζεται σημαντικά από την επιλογή αυτή.



❖ Υλικό #2

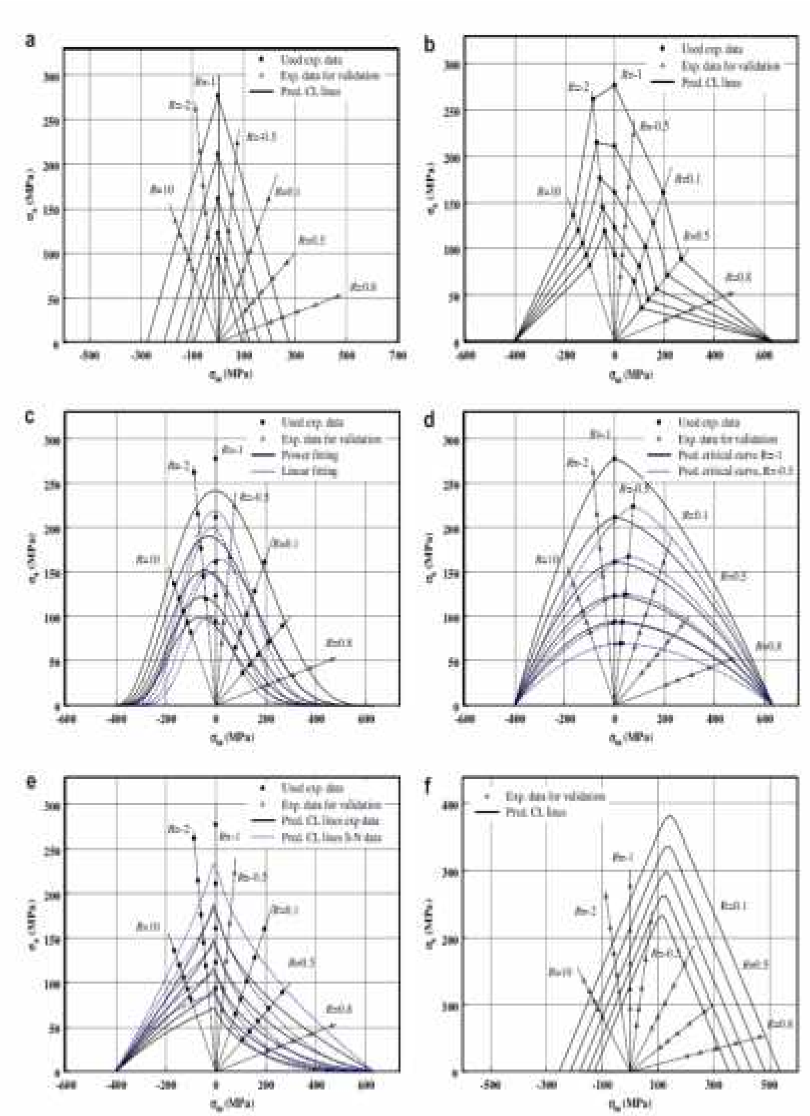
Τρεις από τις πέντε υφιστάμενες S-N καμπύλες συν τις στατικές τιμές αντοχής χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου. Οι υπόλοιπες δύο χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθεί η ακρίβεια προσομοίωσης των προτεινόμενων μεθόδων. Όσον αφορά το υλικό #1, το R =-1 της S-N καμπύλης χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των γραμμικών μοντέλων και το μοντέλου **Kawai**. Στην προκειμένη περίπτωση, (υλικό #2), η αναλογία αντοχής ισούται με -0,77. Η καμπύλη R=-1 είναι το πιο κοντινό. Με βάση την προ-επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, όλες οι παραμέτροι του μοντέλου Harris θεωρήθηκαν ως γραμμικές συναρτήσεις του logN και υπολογίστηκαν μέσω της εξίσωσης

$$f = A_1 \log N + B_1$$
$$u = A_2 \log N + B_2$$
$$v = A_3 \log N + B_3$$

.

Οι καμπύλες log-log S-N προέκυψαν με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για όλες τις μαθηματικές εφαρμογές.

Τα διαγράμματα σταθερής ζωής σύμφωνα με τα περιγραφόμενα μοντέλα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Όλα όσα προέρχονται από CLD, εκτός από το ότι προβλέπεται από το γραμμικό μοντέλο, είναι ακριβή για την πρόβλεψη της S-N καμπύλης για R =- 0,4 και R =-2.5. Όπως μπορεί να φανεί στο Σχήμα, η χρήση των πειραματικών δεδομένων ή τοποθετημένα S-N δεδομένα δεν επηρεάζουν σημαντικά τις προβλέψεις με βάση το μοντέλο του **Boerstra**. Η διαφορά είναι ακόμη μικρότερη όταν εκτιμάται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.



- ❖ Υλικό #3

Πέντε από τις επτά υφιστάμενες S-N καμπύλες συν οι τιμές της στατικής αντοχής χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για όλες τις CLD, εκτός από τα γραμμικά μοντέλα και τα μοντέλα του Kawai που απαιτούν μόνο μία S-N καμπύλη. Οι υπόλοιπες δύο χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθεί η ακρίβεια μοντελοποίησης των προτεινόμενων μεθόδων. Για το υλικό DD16, η αναλογία αντοχής σύμφωνα με τον Kawai είναι -0,63. Συνεπώς, η S-N καμπύλη για R =-0.5 χρησιμοποιήθηκε επίσης για την εξαγωγή του CFL που βασίζεται στις οδηγίες του Kawai. Προ-επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων έδειξε ότι η συμπεριφορά της παραμέτρου f στο μοντέλο του Harris μπορεί να ταιριάξει καλύτερα από το νόμο ισχύος που δίνεται από την εξίσωση $f = Ac^{-r}$. Η εξίσωση

$$f = A_1 \log N + B_1$$
$$u = A_2 \log N + B_2$$
$$v = A_3 \log N + B_3$$

χρησιμοποιείται για τις άλλες δύο παραμέτρους του μοντέλου. Ωστόσο, εκτελέσθηκε επίσης η εφαρμογή του μοντέλου με βάση τη γραμμική τοποθέτηση και των τριών παραμέτρων. Οι καμπύλες ισχύος S-N χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση όλων των μοντέλων, αλλά πάλι, το CLD του **Boerstra** κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας επίσης τα μη επεξεργασμένα πειραματικά δεδομένα.

Τα σταθερά διαγράμματα ζωής σύμφωνα με τα περιγραφόμενα μοντέλα παρουσιάζονται στο σχήμα. Το γραμμικό διάγραμμα είναι ακριβές μόνο για την πρόβλεψη της καμπύλης σε αναλογία τάσεως, R =-0.5, (R^2 = 0,93), αλλά απέτυχε να προβλέψει με ακρίβεια την καμπύλη για R = 0.8. Οι προβλέψεις του τμηματικά γραμμικού διαγράμματος ήταν καλύτερες και στις δύο περιπτώσεις. Η επίδραση της επιλογής της ισχύος ή της γραμμικής προσαρμογής για την εκτίμηση της παράμετρου f στο μοντέλο **Harris** είναι σημαντική για το εξεταζόμενο υλικό, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η κακή ποιότητα τοποθέτησης της εξίσωσης για την εξαγωγή της σχέσης μεταξύ της παραμέτρου f και του αριθμού των κύκλων φόρτισης καταλήγει στην ανακριβή CLD που παρουσιάζεται στο σχήμα. Από την άλλη πλευρά, η χρήση της S-N καμπύλης στο R =-0,5, κοντά στην S-N καμπύλη που προσδιορίζεται ως ζωτικής σημασίας από τον **Kawai**, φαίνεται να βελτιώνει την ακρίβεια μοντελοποίησης, αν και όχι κατά ένα συνεπή τρόπο. Επιπλέον, η εφαρμογή της στο μοντέλο του **Boerstra** που βασίζεται σε ταιριαστά S-N δεδομένα βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια, ειδικά για την καμπύλη S-N για R =-0.5. Το μοντέλο που προτείνεται από τον **Kassapoglou** έδωσε πολύ φτωχά αποτελέσματα, αν και συμβίβασε το πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των διαφορετικών στατικών αντοχών για διαφορετικούς κύκλους φόρτισης.

- ➢ *Εκτίμηση*

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι τα αυτοτελή γραμμικά μοντέλα των **Harris, Kawai** και **Boerstra** μπορεί να είναι επαρκώς ακριβή υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Το γραμμικό μοντέλο και το προτεινόμενο από τον **Kassapoglou** αποδείχθηκαν ανακριβή για τα δεδομένα κόπωσης του συγκεκριμένου υλικού. Η σύγκριση των CLD από τα επιλέξιμα τέσσερα μοντέλα αποκαλύπτει ότι η τμηματικά γραμμική είναι περισσότερο σταθερή ότι οι άλλες δεδομένου ότι δεν στηρίζεται σε καμία παραδοχή. Κατασκευάζεται με γραμμική παρεμβολή από τα διαθέσιμα στοιχεία κόπωσης και ως εκ τούτου η ακρίβεια απεικονίζει τη συμπεριφορά τους. Τα άλλα τρία διαγράμματα είναι πολύ ευαίσθητα στην επιλογή των δεδομένων εισόδου, ιδιαίτερα του **Kawai**, και στην εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, π.χ του **Harris**.

Μια απόπειρα για μια άμεση ποσοτική και ποιοτική σύγκριση των κατασκευασμένων από CLD φαίνεται στο σχήμα για 10^5 κύκλους και υλικό #3. Στο σχήμα αυτό, τονίζεται η ανωτερότητα του αυτοτελούς γραμμικού μοντέλου του **Harris**, και του μοντέλου της **Boerstra** στην πρόβλεψη των επιλεγμένων σημείων για R = 0,8 και R =-0,5 σε αντίθεση με το γραμμικό μοντέλο του **Kawai** και το μοντέλο του **Kassapoglou**. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό του αποτελέσματος, οι προβλεπόμενες S-N καμπύλες από τα διάφορα μοντέλα παρουσιάζονται στα σχήματα και συγκρίνονται με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για αυθαίρετα επιλεγμένες περιπτώσεις. Το γραμμικό μοντέλο υποτιμά την αντοχή σε κόπωση του εξεταζομένου υλικού σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, οδηγώντας σε συντηρητικές προβλέψεις της ζωής κόπωσης. Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο **Kawai** υπερεκτιμά γενικά τη συμπεριφορά, γεγονός που συνεπάγεται μια αισιόδοξη εκτίμηση της ζωής κόπωσης και έτσι ένα μη-συντηρητικό σχεδιασμό κόπωσης.

Πραγματοποιήθηκε μία ποσοτικοποίηση της προβλεπόμενης ικανότητας του κάθε εφαρμοζόμενου μοντέλου. Ο Πίνακας 1 δείχνει τις τιμές του R^2 μεταξύ των προβλεπόμενων καμπύλων και των πειραματικών δεδομένων για επιβεβαίωση.

Table 1
Comparison of predicting ability of the applied models in terms of the coefficient of multiple determination (R^2).

	Material #1	Material #2		Material #3		
	$R = 0.5$	$R = -0.4$	$R = -2.5$	$R = -1$	$R = -0.5$	$R = 0.8$
Linear	0.37	0.72	0.61	–	0.93	0.35
Piecewise linear	0.89	0.91	0.84	–	0.88	0.93
Harris-f: linear	0.63	0.95	0.71	–	0.77	0.51
Harris-f: power law	0.64	0.94	0.64	–	0.94	0.80
Kawai ($R = -1$)	0.15	0.94	0.83	–	0.87	0.31
Kawai ($R = -0.5$)	–	–	–	0.76	–	0.43
Boerstra-experimental data	0.65	0.86	0.83	–	0.60	0.85
Boerstra-S-N data	0.69	0.89	0.84	–	0.84	0.91
Kassapoglou	–	–	–	0.93	0.41	0.48

Γενικά υψηλότερες τιμές εκτίθενται από το αυτοτελές γραμμικό μοντέλο. Αυτό το μοντέλο φαίνεται να είναι το πλέον αξιόπιστο για ολόκληρο το σύνολο των δεδομένων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Άλλα CLD σκευάσματα ωστόσο μπορούν επίσης να είναι ακριβή, αν και όχι τόσο σταθερά. Η ακρίβειά τους εξαρτάται από την ποιότητα των εξετασθέντων στοιχείων κόπωσης, τα επιλεγμένα δεδομένα εισόδου (π.χ **γραμμικό, Kawai**) και την ποιότητα του εξαρτήματος και /ή την βελτιστοποίηση για την εκτίμηση των παραμέτρων (**Harris και Boerstra**).

Από την άποψη της ανάγκης για πειραματικά δεδομένα, είναι προφανές ότι το μοντέλο που προτείνεται από **Kassapoglou** είναι το λιγότερο απαιτητικό, ακολουθούμενο από το γραμμικό μοντέλο και του **Kawai**. Ωστόσο, όπως ήδη συζητήθηκε, ο συμβιβασμός αυτός εμποδίζει την ακρίβεια των προβλέψεων. Τμηματικά γραμμική μπορεί επίσης να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια απλή S-N καμπύλη, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει το διάγραμμα **Goodman**, αλλά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε αυτή την περίπτωση η δυνατότητα πρόβλεψης αυτών είναι επίσης μειωμένη.

Όσον αφορά την ευκολία της εφαρμογής, η μόνη δυσκολία παρουσιάζεται στα μοντέλα **Harris** και **Boerstra**. Σύμφωνα με το πρώτο, μια μη-γραμμική παλινδρόμηση θα πρέπει να εκτελείται για την παραγωγή των μοντέλων των τριών παραμέτρων, ενώ για το τελευταίο, πέντε παράμετροι βελτιστοποίησης του προβλήματος πρέπει να επιλυθούν για την εκτίμηση επιθυμητής σταθερής ζωής.

Εκτός από την αυτοτελή γραμμική, όλα τα άλλα μοντέλα εξαρτώνται από τον αριθμό των υποθέσεων. Οι υποθέσεις αυτές προέρχονται είτε από την εμπειρία και τις πειραματικές αποδείξεις, π.χ στα γραμμικά μοντέλα Harris, Kawai και Boerstra, ή είναι καθαρά θεωρητικές υποθέσεις όπως αυτή που εισάγεται στον Kassapoglou. Όπως φάνηκε προηγουμένως, η έγκριση οποιασδήποτε υπόθεσης μπορεί να δώσει απλότητα στα μοντέλα, τα οποία, υπό ορισμένες συνθήκες, μπορεί να παράγουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Ωστόσο, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι αυτά τα μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικά υλικά ή ακόμα και για διαφορετικά μοτίβα φόρτισης.

Όλα όσα προέρχονται από CLD με βάση την υπόθεση ότι η καμπύλη ισχύος (log-logS-N) είναι κατάλληλη για την τοποθέτηση των στοιχείων κόπωσης. Εάν μια διαφορετική διαμόρφωση χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των δεδομένων κόπωσης, τα αποτελέσματα θα είναι διαφορετικά. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των στοιχείων κόπωσης, δηλαδή, οι «μέσες» καμπύλες S-N χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των CLD. Οποιαδήποτε άλλη διατύπωση μπορεί προφανώς να χρησιμοποιηθεί για την ερμηνεία των δεδομένων κόπωσης, π.χ. μια μαθηματική έκφραση που είναι στατιστικά βασισμένη στις S-N καμπύλες ή ακόμη S-N καμπύλες που εκτιμώνται χρησιμοποιώντας υπολογιστικά εργαλεία όπως γενετικό προγραμματισμό ή νευρωνικά δίκτυα. Η τμηματικά γραμμική

CLD για το υλικό #2 θα φαίνεται όπως στο σχήμα, εάν οι S-N καμπύλες για 50% και 95% των επιπέδων αξιοπιστίας όπως προκύπτει με βάση την μέθοδο που περιγράφεται χρησιμοποιούνται για ερμηνεία των δεδομένων κόπωσης.

Όπως μπορεί να φανεί, η χρήση μιας διαφορετικής S-N διατύπωσης έχει μια περιορισμένη επίδραση στο σχήμα των LCD, ειδικά για τους αριθμούς των κύκλων μεταξύ 10^3 και 10^7. Όπως φαίνεται, στην περιοχή αυτή οι περισσότερες διατυπώσεις των S-N παρέχουν παρόμοια μοντέλα κόπωσης. Υψηλότερη αξιοπιστία επιβάλλει όμως πιο συντηρητικά διαγράμματα.

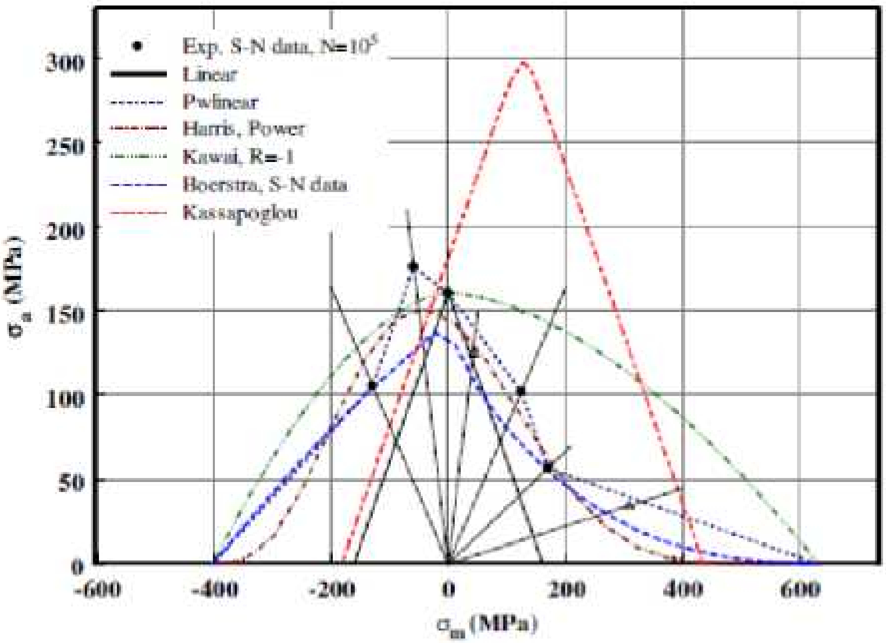


Fig. 5. Comparison of CL lines for 10^5 cycles, material #3.

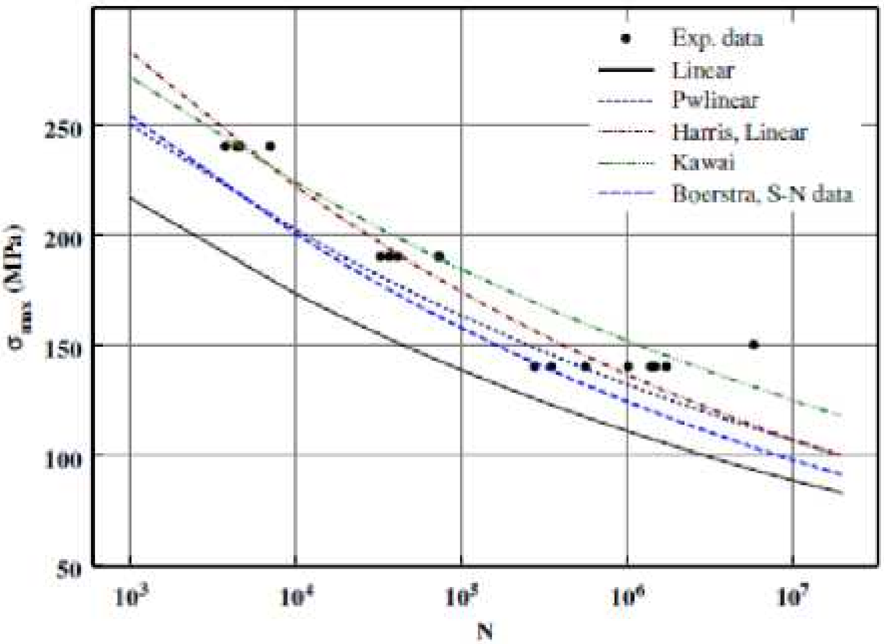


Fig. 7. Predicted S–N curves for $R = -0.4$, material #2.

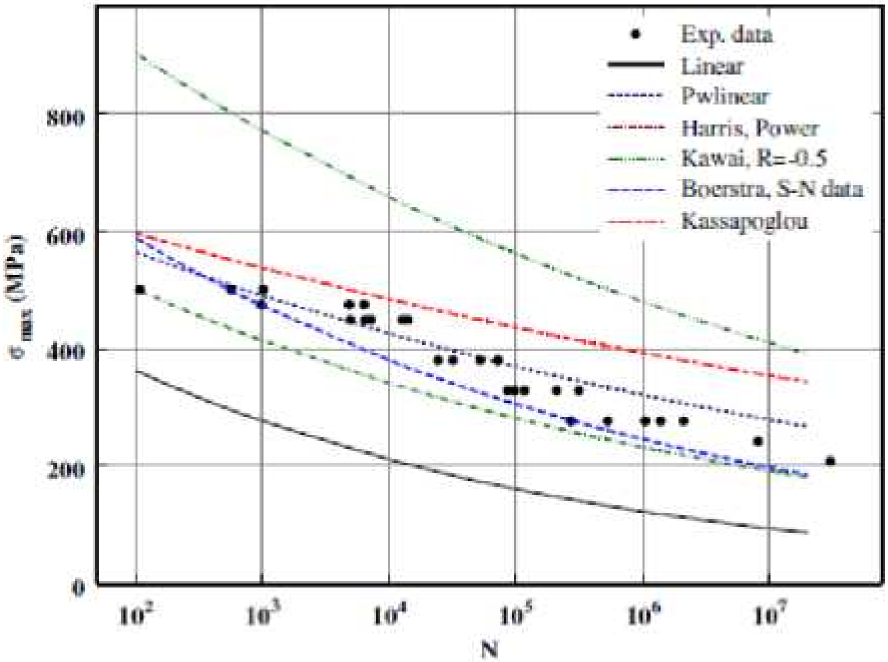


Fig. 8. Predicted S–N curves for $R = 0.8$, material #3.

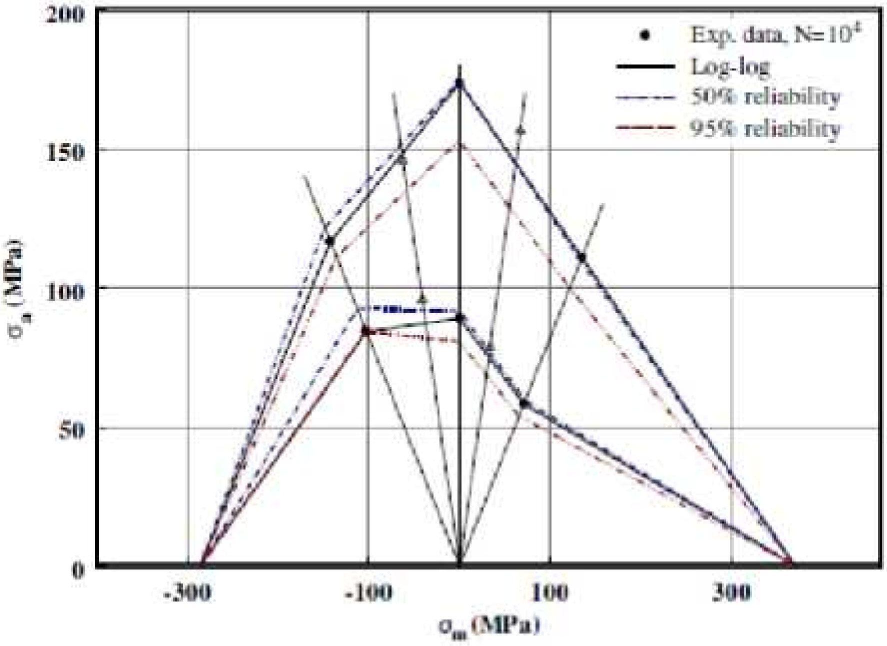


Fig. 9. Comparison of CLDs based on different S–N formulations and different reliability levels, material #2.

- Συμπεράσματα

Μια σύγκριση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων και προσφάτως αναπτυχθέντων μοντέλων για την παραγωγή των διαγραμμάτων σταθερής ζωής για τα σύνθετα υλικά διεξήχθη στο παρόν άρθρο. Έξι μέθοδοι περιγράφονται, και η ακρίβεια πρόβλεψής τους αξιολογήθηκε σε μία ευρεία ποικιλία των δεδομένων κόπωσης σταθερού πλάτους από υλικά GFRP. Προσδιορίστηκε ποσοτικά η επίδραση της επιλογής της μεθόδου CLD στην πρόβλεψη της διάρκειας ζωής σε κόπωση των σύνθετων υλικών. Εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η επιλογή μιας ακριβούς CLD φόρμουλας είναι απαραίτητη για τη συνολική ακρίβεια μιας μεθοδολογίας πρόβλεψης ζωής κόπωσης. Όπως φαίνεται, η «λάθος» επιλογή μπορεί να παράγει πολύ συντηρητικές ή πολύ αισιόδοξες S-N καμπύλες, πράγμα το οποίο αντικατοπτρίζεται άμεσα στην αντίστοιχη εκτίμησης ζωής.
- Όλες οι μέθοδοι συνεπάγονται το πρόβλημα της ανάμειξης στατικών στοιχείων και στοιχείων κόπωσης. Η ακρίβειά τους μειώνεται όταν οι καμπύλες κοντά στο R = 1 (σε εφελκυσμό ή θλίψη), πρέπει να προβλεφθούν. Επιπλέον, το ίδιο εφαρμόζεται για την εξαγωγή των ακριβών S-N καμπύλων για να περιγράψουμε το καθεστώς πολύ χαμηλού κύκλου κόπωσης, δηλαδή N <100. Η ενοποιημένη εξίσωση που χρησιμοποιείται στο μοντέλο του **Harris** για να περιγράψει τη συμπεριφορά κόπωσης τόσο για την ένταση όσο και για τη συμπίεση φόρτισης συνδυάζει επίσης την επιρροή των μηχανισμών βλάβης που αναπτύχθηκαν υπό διαφορετικά μοτίβα φόρτισης. Όλα τα άλλα μοντέλα λειτουργούν χωριστά για ένταση και συμπίεση φόρτισης. βασίζονται σε διαφορετικές εξισώσεις για την περιγραφή των διαφόρων τμημάτων του διαγράμματος σταθερής ζωής.
- Η απλότητα που προσφέρεται από μερικά από τα μοντέλα, π.χ **γραμμικό, Kassapoglou, Kawai**, στις περισσότερες περιπτώσεις, παρέχουν ακρίβεια. Επιπλέον, παρόλο που τα μοντέλα αυτά αναπτύχθηκαν με στόχο την ελαχιστοποίηση της ποσότητας των απαιτούμενων πειραματικών δεδομένων, δεν προσφέρουν τη δυνατότητα χρήσης περισσοτέρων στοιχείων όταν είναι διαθέσιμη μια εκτεταμένη βάση δεδομένων π.χ το γραμμικό μοντέλο και το μοντέλο του **Kawai** βασίζονται στην κρίσιμη S-N καμπύλη και δεν μπορούν να φιλοξενήσουν οποιαδήποτε άλλη S-N καμπύλη προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια των προβλέψεων. Μία άλλη έλλειψη των μοντέλων όπως αυτά τα δύο είναι ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναλύσουν το πλάτος φόρτισης σε κόπωση τυχαίας μεταβλητής με συνεχώς μεταβαλλόμενη μέση τιμή και πλάτος, δεδομένου ότι είναι ακριβείς μόνο για S-N καμπύλες κοντά στην κρίσιμη (για τη γραμμική) και μόνο εάν η κρίσιμη (ανάλογα με το υλικό) μπορεί να εξάγεται πειραματικά (Kawai). Θα πρέπει να αναφερθεί, ωστόσο, ότι ο Kawai εισήγαγε το μοντέλο του για την περιγραφή της συμπεριφοράς του CFRP υλικού που είναι διαφορετικό από τα υλικά GFRP που εξετάστηκαν στην μελέτη αυτή.
- Η ακρίβεια του μοντέλου **Harris** είναι αποδεκτή μόνο όταν η συμπεριφορά των παραμέτρων του μοντέλου μπορεί αποτελεσματικά να ταιριάξει έναντι της ζωής σε κόπωση. Ωστόσο, οι μεθόδοι τοποθέτησης που προτείνονται από τον **Harris** δεν οδηγούν πάντα σε ακριβή αποτελέσματα.
- Το μοντέλο του **Boerstra** μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς την ανάγκη να συμβαδίζει με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα με μια S-N καμπύλη. Αυτό είναι προσόν αφού μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει δεδομένα μεταβλητού πλάτους με συνεχείς μεταβαλλόμενες μέσες τιμές και πλάτη. Ωστόσο, αποδείχθηκε ότι η χρήση των προσαρμοσμένων δεδομένων S-N αντ' αυτών βελτιώνει την ακρίβεια προσομοίωσης του μοντέλου **Boerstra**.
- Η σχετικά απλή τμηματικά γραμμική αποδείχθηκε η πιο ακριβής από τις συγκρινόμενες των συνθέσεων, όταν ένας λογικός αριθμός των S-N καμπύλων (> 3) είναι διαθέσιμος. Μια πιο πολύπλοκη, μη γραμμική παρεμβολή μεταξύ των γνωστών S-N τιμών και μια πιο ρεαλιστική περιγραφή της συμπεριφοράς κοντά στο R = 1 θα βελτίωνε τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου.

4.7 Προβλέψεις ζωής κόπωσης των πορώδων σύνθετων επικαλύψεων χαρτιού

Διεξήχθησαν χαμηλού κύκλου-ελεγχόμενες δοκιμές κόπωσης για να προσδιοριστεί η επίδραση του πορώδους, ο όγκος και ο τύπος του συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται εντός ενός ανθρακικού ασβεστίου που βασίζεται σε σύνθετο υλικό. Αναλύθηκαν η ζωή κόπωσης, ο βαθμός πλαστικής παραμόρφωσης, οι μέγιστες κυκλικές τάσεις και οι βρόγχοι υστέρησης.

Το πορώδες που επηρεάζεται απ' τον όγκο του συνδετικού υλικού ταυτοποιήθηκε ως ο κύριος παράγοντας για να επιτελεσθεί μία αλλαγή στη διάρκεια ζωής κόπωσης. Αυξάνοντας το περιεχόμενο του πολυμερούς κατά δέκα φορές οδηγήσε σε παρόμοια διάρκεια ζωής 30 φορές το πλάτος. Χαμηλότερο συνδετικό υλικό από πολυμερές T_g βελτίωσε τη διάρκεια ζωής για υψηλό ποσοστό συνδετικού όγκου 2-5 φορές, αλλά τα αποτελέσματά του δεν ήταν αισθητά σε μικρότερες ποσότητες. Υπήρχε μικρή υποβάθμιση της αντοχής σε θλίψη ως συνάρτηση του αριθμού των κύκλων, αλλά το φορτίο εφελκυσμού φέρουσας αντίστασης υποτιμήθηκε αισθητά καθ ʼόλη τη δοκιμή, λόγω περιοχών με χαμηλό συνδετικό υλικό που οδηγεί σε εκτεταμένες περιοχές διάδοσης ρωγμών. Βρόχοι υστέρησης δείχνουν ότι για χαμηλές συγκεντρώσεις πολυμερών εμφανίζεται μικρή πλαστική ζημιά εντός του τμήματος συμπιέσεως των κύκλων κόπωσης. Αυτό οφειλόταν στα σκληρά σωματίδια χρωστικής που κυριαρχούν στη συμπιεστική συμπεριφορά.

Αποτελέσματα και συζήτηση

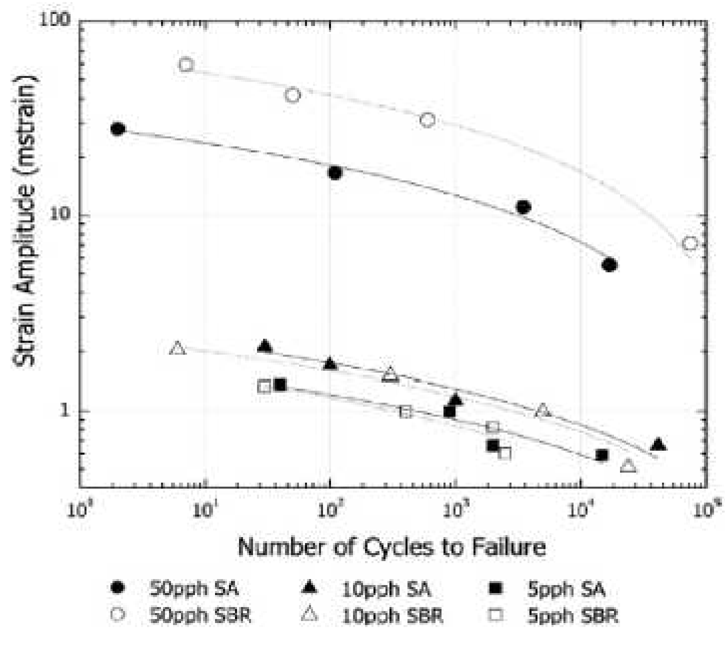
- *Διάρκεια Ζωής*

Όπως φαίνεται στην εικόνα, στέλεχος πλάτους (ε_α) μειώνεται ως συνάρτηση του αριθμού των κύκλων μέχρι την αστοχία (N_f). Σύνθετα με ένα πολυμερές χαμηλότερου κλάσματος όγκου (PV_F) απέτυχαν γρήγορα σε θραύση. Υψηλότερα σύνθετα PV_F επέδειξαν έναν πιο όλκιμο τρόπο αστοχίας. Καθώς η συγκέντρωση του πολυμερούς αυξάνει στο σύνθετο, η συνέχεια της στερεάς κατάστασης αυξάνεται, οι πόροι /ελαττώματα εξαφανίζονται, τα σωματίδια περιβάλλονται από πολυμερή και το πολυμερές σώμα της μήτρας τείνει να διατηρηθεί και παραμορφώνεται περισσότερο υπό φόρτιση, όπως οι διεπαφές των σωματίδιων-πολυμερών γίνονται λιγότερο καθοριστικές του τρόπου αστοχίας. Κατά συνέπεια, η μήτρα του πολυμερούς που είναι ένα όλκιμο υλικό έχει μεγαλύτερη επιρροή στην τελική μορφή αστοχίας του σύνθετου. Η συχνότητα των 1 Hz επιλέχτηκε για να μετριάσει την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών με τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας του πολυμερούς που εξαρτώνται από τη θερμοκρασίας. Σε ένα τυχαίο δείγμα από δοκιμές κόπωσης η θερμοκρασία του σύνθετου παρακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής χρησιμοποιώντας ένα όπλο με υπέρυθρες. Δεν παρατηρήθηκε διακριτή αύξηση της θερμοκρασίας με αυτά τα δοκιμαστικά δείγματα.

Υψηλότερα επίπεδα του συνδετικού πολυμερούς αύξησε σημαντικά τη ζωή κόπωσης. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο σημαντικά χαμηλότερο επίπεδο πορώδους στο πλαίσιο του συνθέτου και καλύτερη συνδεσιμότητα με το δίκτυο. Ο σχηματισμός μικρορωγμής μέσα στη δομή που ενθαρρύνεται από την παρουσία των πόρων, τελικά, οδηγεί σε γρήγορη θραύση. Μειώνοντας το πορώδες κατά έναν παράγοντα εκατοντάδας επιτρέπει στο σύνθετο να αντέχει στελέχη έως 45 φορές μεγαλύτερα για τον ίδιο αριθμό κύκλων. Η αυξημένη στράγγιση είναι μία συνάρτηση της αυξανόμενης θραύσης του συνδετικού πολυμερούς σε σχέση με την χρωστική ουσία. Το πορώδες μπορεί επίσης να μειωθεί χρησιμοποιώντας μια χρωστική με καλύτερη διαμόρφωση συσκευασίας ή ενσωματώνοντας νανοσωματίδια GCC για να μειώσει το μέγεθος των κενών πριν να χρησιμοποιηθεί το συνδετικό υλικό. Η προσθήκη περισσότερου οπλισμού, ωστόσο, μπορεί να απαιτήσει πρόσθετο λατέξ για να επιτευχθεί ένα συνεχές δίκτυο σωματιδίων. Αποτυχία στην επικάλυψη, ειδικά σε μια κατάσταση κάμψεως, μπορεί να συμβεί στην επικάλυψη, στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ της επίστρωσης και του χαρτιού ή, στο χαρτί. Το που θα συμβεί η βλάβη εξαρτάται από τις αποκλίνουσες ιδιότητες των υλικών και τις διεπαφές και δεν είναι ασήμαντο να προβλεφθεί. Σ' αυτή την περίπτωση έχει ερευνηθεί αστοχία μόνο σε ένα από τα υλικά (επίστρωση) σε μια προσπάθεια να κατανοήσουμε καλύτερα τα ειδικά χαρακτηριστικά του επιχρίσματος υπό την επίδραση των μεταβλητών όγκων υλικού και τις ιδιότητες του λατέξ.

Κατά τη σύγκριση μεταξύ σύνθετων υλικών της ίδιας συγκέντρωσης συνδετικού υλικού αλλά με διαφορετικούς τύπους πολυμερών, ένα κατώτερο T_g λατέξ βελτιώνει τη διάρκεια ζωής κόπωσης περισσότερο από ένα υψηλότερο T_g λατέξ. Ο σχηματισμός ταινίας λατέξ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το T_g. Ωστόσο, δεδομένου ότι υπάρχει πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των μικροδομών, ο πιθανότερος λόγος για τη διαφορά μεταξύ των δύο τύπων λατέξ θα ήταν ότι τα υψηλότερα T_g λάτεξ προκαλούν υψηλότερες καταπονήσεις στις διεπιφάνειες σωματίδιων-πολυμερών, με αποτέλεσμα νωρίτερες μεσεπιφανειακές αστοχίες. Το σχήμα 3 παρουσιάζει ειδικά τις μικροδομές και δομές πόρων για (α) 10 pph SBR και (β) 10 pph SA λατέξ δεσμευμένων επιστρώσεων. Οι μέσες παράμετροι για την κυκλικότητα του πόρου είναι 0,75 και 0,76 αντίστοιχα, υποδηλώνοντας μια πολύ μικρή διαφορά από την άποψη εξάπλωσης μεμβράνης, αφού εξάπλωση της μεμβράνης θα επηρεάσει σε ένα βαθμό, το σχήμα και ως εκ τούτου την κυκλικότητα ή τις δομές των πόρων.

Έχει συζητηθεί ότι διεπιφανειακή αντοχή του δεσμού μεταξύ του υλικού πληρώσεως και της μήτρας έχει μια σύνθετη επίδραση επί της ζωής κόπωσης. Σε πλήρως γεμάτα συστήματα, οι ισχυροί διεπιφανειακοί δεσμοί μεταξύ πλήρωσης και μήτρας μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλή ένταση με τοπικές τάσεις στη μικροδομή του σύνθετου υλικού και μειωμένη διάρκεια ζωής κόπωσης. Μια σημαντική διάκριση μπορεί να γίνει στο σχήμα. 2, μεταξύ δειγμάτων 5 pph, 10 pph και 50 pph τόσο για SA όσο και SBR λατέξ. Έχει αναφερθεί ότι τα χαμηλότερα Tg λατέξ εξαπλώνονται και έτσι συνδέουν σωματίδια πιο αποτελεσματικά απ’ ότι τα υψηλότερα Tg λατέξ. Επιπλέον, ένα κατώτερο Tg λατέξ παραμορφώνεται πιο εύκολα από ένα υψηλότερο Tg (άκαμπτο) λατέξ και αναμένεται ότι αυτό θα προωθήσει την πλαστιμότητα και θα ενισχύσει τη διάρκεια ζωής. Κατά τη σύγκριση των καμπύλων για δείγματα SA 50 pph έναντι δειγμάτων SBR 50 pph, το SBR, το οποίο είναι ένα κατώτερο Tg λατέξ, επιδεικνύει ανώτερα χαρακτηριστικά ζωής. Αυτό είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα και δηλώνει ότι η διάρκεια ζωής καθορίζεται από τις ιδιότητες όγκου του λατέξ. Αντίθετα, όταν τα σύνθετα SA και SBR των 5 pph συγκρίνονται, η ακριβώς αντίθετη τάση παρατηρείται σ’ αυτό, η αστοχία των σύνθετων SA λατέξ σε ένα αυξανόμενο αριθμό των κύκλων από τα σύνθετα με βάση SBR στο ίδιο στέλεχος πλάτους. Δύο υποθέσεις εκδηλώνονται μέσω αυτής της παρατήρησης. Η πρώτη είναι ότι η διάρκεια ζωής στα σύνθετα χαμηλότερης λατέξ θραύσης διέπεται από τις διεπιφανειακές (κολλώδεις) ιδιότητες μεταξύ των επιφανειών των σωματιδίων λάτεξ. ενώ σε σύνθετα υψηλότερης θραύσης, η διάρκεια ζωής διέπεται περισσότερο από τις χονδρικές ιδιότητες του ίδιου του λατέξ. Συνεπώς, για τη βελτίωση της ζωής σε χαμηλή περιεκτικότητα σε λατέξ των σύνθετα υλικών, οι ιδιότητες πρόσφυσης πρέπει να βελτιστοποιηθούν. Η δεύτερη είναι ότι το SA λατέξ προσδένεται σ’ αυτή την περίπτωση, καλύτερα με την ουσία διασποράς στις επιφάνειες των σωματιδίων από το SBR λατέξ. Κατά τη σύγκριση χαμηλών (5 pph) και υψηλότερων (30 pph) συστημάτων περιεχομένων λατέξ, είναι σαφές ότι υπάρχει μια σημαντική διαφορά στο σχήμα, το μέγεθος και την κανονικότητα των πόρων εντός των δομών επικάλυψης. Τα επίπεδα της συγκόλλησης είναι σημαντικά υψηλότερα και ο όγκος του υλικού που αντιστέκεται στο φορτίο είναι περισσότερος. Ως εκ τούτου, όπως φαίνεται στο σχήμα, υπάρχει μεγαλύτερη αντοχή για φόρτιση δεδομένου ότι υπάρχουν λιγότερες περιοχές ενάρξης θραύσης (πόρων) και το πλάτος του στελέχους μπορεί να είναι υψηλότερο για δείγματα με περισσότερα λατέξ.



- Μέγιστη πίεση ανά κύκλο

Ο Πίνακας που ακολουθεί δείχνει την μέγιστη τάση (σ_{max}) για κάθε πείραμα κόπωσης που διεξάγεται. Η σ_{max} είναι ένα μέτρο της αντοχής του υλικού και σχετίζεται με το φορτίο που ένα υλικό μπορεί να υποστηρίξει σε τάση. Η αναγωγή του σ_{max} είναι ένας συνδυασμός ενός αριθμού παραγόντων συμπεριλαμβανομένης της διάδοσης ρωγμών, της αστοχίας στη διεπαφή σωματιδίων-συνδετικού και της απόδοσης του όγκου των πολυμερών. Η διάδοση των ρωγμών επηρεάζει τη μέγιστη πίεση ανά κύκλο, καθώς μόνο η πρώτη τάση Piola-Kirchhoff μετρήθηκε σ’ αυτή τη μελέτη. Η αποτελεσματική περιοχή εγκάρσιας διατομής μειώνεται από διάδοση ρωγμών, απ’ το μεγάλο αριθμό των κενών εντός της δομής και από οποιοδήποτε αποτέλεσμα Poisson κατά τη διάρκεια της στράγγισης.

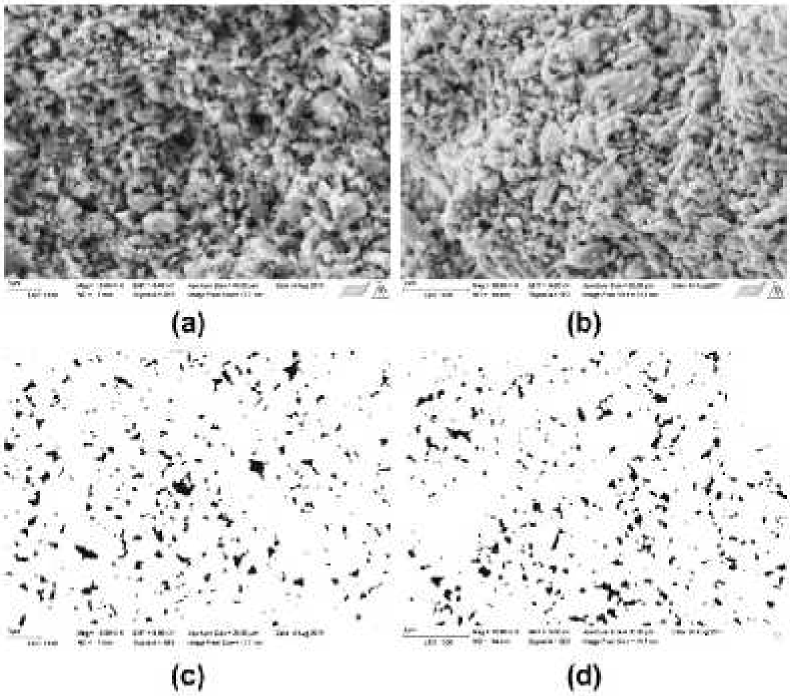
Είναι αξιοσημείωτο ότι το 50 pph SA δε θα μπορούσε να τεντωθεί σε τιμές εr τόσο ψηλά όπως κάθε ένα από τα άλλα σύνθετα για πολλαπλούς κύκλους πριν από την αστοχία. Σε σύγκριση με τις τιμές εα για 50 pph SBR, το σύνθετο SA ήταν μόνο σε θέση να αντέξει τη μισή ποσότητα του στελέχους. Σε θερμοκρασία δωματίου το μέτρο ελαστικότητας του Young για SA είναι υψηλότερο από ότι το SBR, λόγω της υψηλότερης Tg. Μια ένδειξη της αρχικής δυσκαμψίας δίνεται από το g1 που δείχνει το σύνθετο SA είναι πολύ πιο σκληρό από ότι το ομόλογό του SBR. Αυτό είναι επίσης αλήθεια για τα υπό δοκιμή σύνθετα των 5 pph. Θεωρείται ότι για το σύνθετο SA των 50 pph, υπάρχουν περιοχές υψηλής έντασης στις οποίες το SA πολυμερές θα αποδώσει και αστοχήσει νωρίτερα απ’ ό τι το πιο όλκιμο SBR πολυμερές. Είναι αξιοσημείωτο ότι στον Πίνακα 1, το εUT για το SA σύνθετο πολυμερές των 50 pph είναι σημαντικά χαμηλότερο από το σύνθετο πολυμερές SBR.

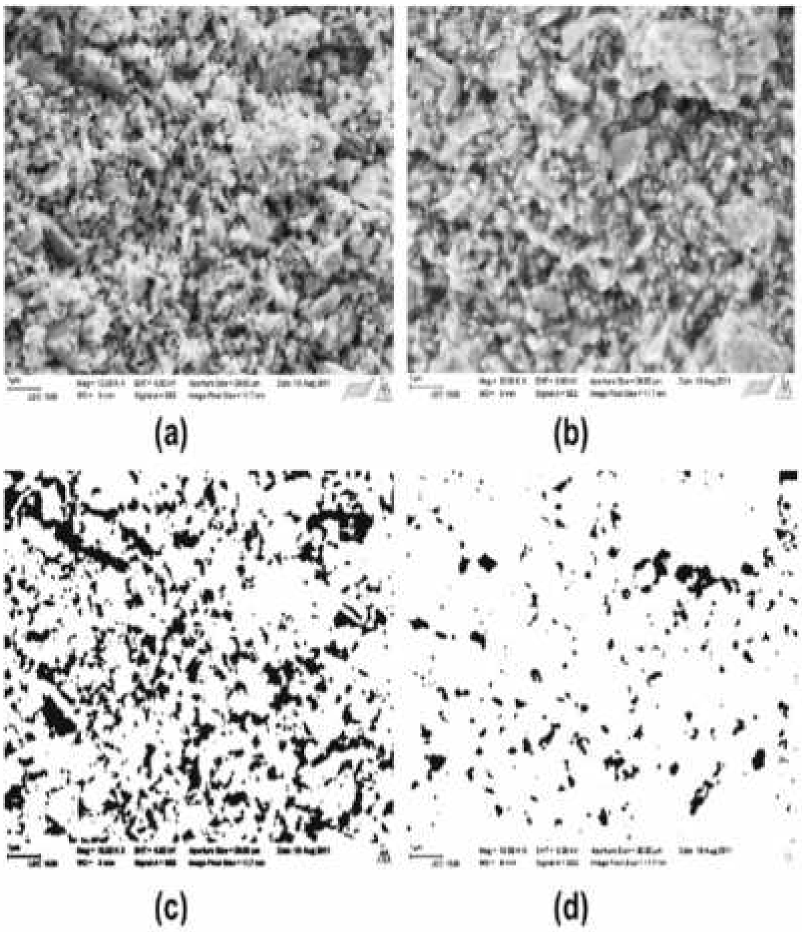
Η κρίσιμη συγκέντρωση όγκου χρωστικής για ακαμψία (CPVC) είναι η συγκέντρωση όγκου χρωστικής (PVC) πάνω και κάτω απ’ όπου οι μηχανικές ιδιότητες μιας σωματιδιακής χρωστικής συμπλήρωσαν τη γρήγορη υποβάθμιση του πολυμερούς σύνθετου. Το CPVC εξαρτάται από τη χρωστική μικροδομή, διασπορά και το βαθμός συσσωμάτωσης μέσα στο σύνθετο σύστημα. Στην περίπτωση αυτή το CPVC σχετίζεται με το βέλτιστο PVC για ακαμψία. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακαμψία για παράδειγμα τα συστατικά κλασμάτων όγκου, τα χαρακτηριστικά της συσκευασίας της χρωστικής ουσίας και η κατανομή των πόρων. Αξιολογώντας τις τιμές του g1 δείχνει ότι και τα δύο SA και SBR σύνθετα των 10 pph έχουν την υψηλότερη αρχική ακαμψία. Αυτό θα υποστηρίζε τη θεωρία ότι τα 10 pph είναι πλησιέστερα προς το CPVC.

Table 2
Summary of fatigue life behaviour for each composite tested. The gradient of the logarithmic maximum cyclic stress plots is denoted by m. Numbered subscripts for σ, P and m relate to the cycles upon which this data is based.

Polymer	SA											
pph	50				10				5			
ε_a (mstrain)	28.0	16.6	11.1	5.5	2.1	1.7	1.1	0.7	1.4	1.0	0.7	0.6
ε_f (%)	28.6	17.0	11.3	5.6	42.4	34.2	22.9	13.2	42.4	31.4	20.9	18.7
N_f	2	110	3500	17,000	30	100	1000	41,500	40	900	2000	15,000
σ_{max} (MPa)	24.39	34.21	31.68	20.74	11.36	12.29	8.08	4.69	8.03	6.07	4.62	4.13
σ_{10} (MPa)	–	15.88	16.37	12.92	8.72	9.92	7.25	4.47	6.37	5.15	4.00	3.74
σ_{100} (MPa)	–	7.01	8.21	7.89	–	–	6.97	4.21	–	4.79	3.92	3.51
m_{2-100}	–	−4.56	−3.8	−2.25	−0.54	−0.41	−0.17	−0.09	−0.36	−0.2	−0.11	−0.1
g_1 (GPa)	–	2.06	2.85	3.77	5.41	7.23	7.35	6.7	5.73	6.07	6.6	6.88
P_2	–	0.44	0.24	0.23	0.22	0.18	0.09	0.07	0.17	0.11	0.08	0.10
P_{10}	–	0.50	0.42	0.31	0.27	0.23	0.09	0.07	0.20	0.17	0.11	0.09
P_{100}	–	0.54	0.48	0.35	–	–	0.11	0.08	–	0.18	0.11	0.10

Polymer	SBR											
pph	50				10				5			
ε_a (mstrain)	59.5	41.6	31.1	15.0	2.0	1.5	1.0	0.5	1.3	1.0	0.8	0.6
ε_f (%)	41.0	28.6	21.5	10.3	45.1	33.2	22.1	11.2	50.1	37.5	31.1	22.5
N_f	7	50	600	18,000	6	300	3500	24,000	30	400	2000	2500
σ_{max} (MPa)	13.55	6.70	10.73	8.84	12.75	11.41	8.07	4.79	5.84	4.56	3.56	1.07
σ_{10} (MPa)	–	3.11	5.23	5.53	–	9.63	7.14	4.42	4.49	3.93	3.06	0.66
σ_{100} (MPa)	–	–	2.76	3.39	–	8.88	6.67	4.33	–	3.62	2.97	0.31
m_{2-100}	−2.87	−0.86	−1.20	−0.94	−2.1	−0.37	−0.23	−0.06	−0.22	−0.13	−0.07	−0.14
g_1 (GPa)	0.23	0.16	0.35	0.59	6.38	7.61	8.07	9.58	4.49	4.56	4.45	1.78
P_2	0.70	0.71	0.71	0.70	0.18	0.13	0.11	0.07	0.16	0.11	0.11	0.14
P_{10}	–	0.69	0.70	0.69	–	0.15	0.11	0.08	0.17	0.13	0.12	0.12
P_{100}	–	–	0.64	0.66	–	0.15	0.12	0.09	–	0.14	0.12	0.09


(a)
(b)
(c)
(d)


(a)
(b)
(c)
(d)

- Πλαστικό στέλεχος & υπολειμματική τάση

Το διάνυσμα κλίσης του αριθμού $σ_{max}$ σε αντίθεση με τον αριθμό των κύκλων (m) είναι μία αναπαράσταση απώλειας αντοχής με την πάροδο του χρόνου. Επιδράσεις στην m περιλαμβάνουν υπολειμματική δύναμη, έναρξη των πολύ μικρών ρωγμών και μη ανακτήσιμη πλαστική παραμόρφωση.

Εξαιτίας της θέρμανσης, ψήξης και ξήρανσης του λατέξ του δείγματος, θα υπάρχουν παραμένουσες τάσεις εντός της σύνθετης μικροδομής. Οι διαφορές μεταξύ του βαθμού της παραμένουσας τάσης εντός της επίστρωσης μικροδομής, που επηρεάζεται από τη μετανάστευση του λατέξ και το ποσοστό της ξήρανσης, οδηγεί σε ετερογενείς ιδιότητες του υλικού στη μακροκλίμακα. Μια υπολειμματική εφελκυστική τάση εντός μιας σύνθετης δομής ενθαρρύνει τη διάδοση ρωγμών και τις γέφυρες λατέξ μεταξύ των σωματιδίων που είναι πιο επιρρεπή σε αστοχία. Μια πιο ταχεία απώλεια της αντοχής μπορεί να είναι ένας δείκτης της υψηλής υπολειμματικής τάσης.

Τα SA σύνθετα πολυμερή δείχνουν γενικά υψηλότερες $m_{2\text{-}100}$ τιμές από τα αντίστοιχα δείγματα SBR. Αυτή η ταχύτερη υποβάθμιση της εγγενούς αντοχής και ακαμψίας είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται στον υψηλότερο βαθμό συσσωμάτωσης συνδετικού στο σύνθετο, προκαλώντας το σχηματισμό μεγαλύτερων μικρορωγμών απ’ ότι θα συνέβαινε σε SBR. Η διάδοση των ρωγμών είναι έτσι αρκετά αργή, στη συνέχεια μέσω αυτών των περιοχών υψηλότερου λατέξ.

Οι τιμές της P που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 δίνουν την εικόνα μέσα στη πλαστική ζημία κάτω από κάθε κύκλο τάσεων. Η προοδευτική συσσώρευση της $ε_{PL}$ βλάβης συμβαίνει στις γέφυρες πολυμερούς, στη διεπαφή μεταξύ του πολυμερούς και της χρωστικής και τελικά οδηγεί στην αστοχία. Στα δείγματα με χαμηλότερο PVF, το $ε_{PL}$ παραμένει σχετικά παρόμοιο σε όλες τις δοκιμές κόπωσης και σε χαμηλό βαθμό σε σύγκριση με τα δείγματα υψηλότερου PV_F. Αυτό θα αναμενόταν λόγω της κυριαρχίας της εύθραυστης χρωστικής ουσίας όπου δε δημιουργούνται πλαστικές βλάβες.

Σε SA σύνθετα των 50 pph η ποσότητα του $ε_{pl}$ αυξάνει σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων, ωστόσο, στα SBR των 50 pph συμβαίνει το αντίστροφο. Ο βαθμός του $ε_{pl}$ είναι εξαιρετικά υψηλός για τα δύο αυτά σύνθετα, αλλά κυρίως για το σύνθετο SBR. Η ελαστική πλαστικοποιημένη φύση του πολυμερούς SBR προκαλεί έναν υψηλό βαθμό μηχανικής απόσβεσης εντός της δομής που είναι η κύρια αιτία υψηλού $ε_{PL}$. Μπορεί να υποτεθεί ότι κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων των δοκιμών κόπωσης, πολυμερείς αλυσίδες αρχίζουν να αυτοπροσανατολίζονται στην κατεύθυνση της φόρτισης. Περισσότερη απόσβεση θα εμφανιστεί αρχικά στα SBR σύνθετα πολυμερή όσο οι αλυσίδες του πολυμερούς είναι σε θέση να κινούνται πιο ελεύθερα και να ευθυγραμμίζονται πιο γρήγορα απ’ ότι οι αλυσίδες SA εξαιτίας της διαφοράς τους στο T_g. Αυτό μπορεί να εξηγήσει τη μείωση στη συμπεριφορά του $ε_{pl}$ στα SBR σύνθετα όσο οι αλυσίδες επιτυγχάνουν μια βέλτιστη θέση γρήγορα. Ο υψηλός βαθμός της βλάβης πλαστικών ήταν επίσης μερικός λόγω της υψηλής ολκιμότητας των δειγμάτων δοκιμής, που οδήγησε σε χαμηλό βαθμό λυγισμού στη θλιπτική περιοχή κάθε κύκλου κόπωσης.

Καθώς τα σύνθετα των 50 pph είναι συμβατικά συστήματα πλήρως γεμάτα, οι κλασικοί νόμοι για τα σύνθετα ισχύουν γενικά για τη συμπεριφορά τους. Το χαμηλότερο PV_f των δοκιμασμένων σύνθετων δείχνει πολύ διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά τους και βασίζεται έντονα στη σταθερότητα του δικτύου των γεφυρών από πολυμερή εντός του όγκου της δομής τους. Έχει αναφερθεί ότι το SBR λάτεξ είναι διασυνδεδεμένο. Αυτό σημαίνει ότι η αστοχία θα τείνει να συμβαίνει στις διεπιφάνειες μεταξύ GCC και SBR λόγω της φύσης των οξέων-βάσεως του διεπιφανειακού δεσμού . Αυτός ο δευτερεύον δεσμός στη διαχωριστική επιφάνεια είναι σημαντικά ασθενέστερος από τις ομοιοπολικά συνδεδεμένες διασυνδέσεις μεταξύ πολυμερών αλυσίδων. Η δυσκαμψία του όγκου της πολυμερούς γέφυρας οδηγεί σε συγκεντρώσεις τάσεων στις διεπαφές, αυξάνοντας περαιτέρω τη μεσεπιφανειακή ζημία. Έχει ήδη παρατηρηθεί ότι χαμηλότερα T_g λατέξ έχουν ισχυρότερους διεπιφανειακούς δεσμούς με τα GCC, έτσι η διεπιφανειακή σύνδεση των υψηλότερων T_g των SA λατέξ με GCC θα είναι ασθενέστερη από εκείνη των SBR πολυμερών.

Το SA πολυμερές δεν είναι διασυνδεδεμένο. Η σχετική ευκολία της κίνησης της πολυμερούς αλυσίδας, λόγω της έλλειψης της διασταύρωσης οδηγεί σε βλάβες που συμβαίνουν τόσο στις γέφυρες όσο και στις διεπαφές. Είναι απίθανο οι ρωγμές να διαδοθούν γρήγορα μέσα από γέφυρες από λάτεξ σε SA σύνθετο λόγω της επικάλυψης των πολυμερικών αλυσίδων που επιβραδύνουν την ανάπτυξη των ρωγμών. Λόγω της ολισθήσεως των αλυσίδων πολυμερών στην πολυμερή γέφυρα, η συγκέντρωση των τάσεων στη διεπαφή μεταξύ του GCC και του πολυμερούς είναι χαμηλή. Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση του ασθενέστερου διεπιφανειακού δεσμού μειώνεται.

Πιστεύεται ότι η έλλειψη της διασταύρωσης οδηγεί σε μια πιο ελαστική συμπεριφορά στις χαμηλότερες PV_F τιμές στα SA σύνθετα σε χαμηλότερα πλάτη εντάσεων. Σε υψηλότερα πλάτη εντάσεων, τα σύνθετα SA δείχνουν μια πιο πλαστική συμπεριφορά από ότι τα σύνθετα SBR. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε μια κρίσιμη τάση που επιτεύχθηκε κατά την οποία οι διεπιφανειακοί δεσμοί μεταξύ SA και SBR σπάνε πιο εύκολα. Τα σύνθετα SA επηρεάζονται λιγότερο λόγω των υψηλότερων δεσμών διεπιφανειακών αντοχών. Αφότου η έρευνα αυτή επικεντρώνεται στο υλικό επικάλυψης, δεν είναι ακόμα γνωστό πόσο οι παραμένουσες τάσεις στην επικάλυψη όπως δοκιμάστηκε σχετίζονται με την εναπομένουσα καταπόνηση της επικάλυψης επί του υποστρώματος βάσης χαρτιού.

Table 3
Summary of results.

Polymer	pph	Maximum ε_a tested			Minimum ε_a tested		
		ε_f (%)	N_f	P_{10}	ε_f (%)	N_f	P_{10}
SA	50	28.6	2	–	5.6	17,000	0.31
	10	42.4	30	0.27	13.2	41,500	0.07
	5	42.4	40	0.20	18.7	15,000	0.09
SBR	50	41	7	–	10.3	18,000	0.69
	10	45.1	6	–	11.2	24,000	0.08
	5	50.1	30	0.17	22.5	2500	0.12

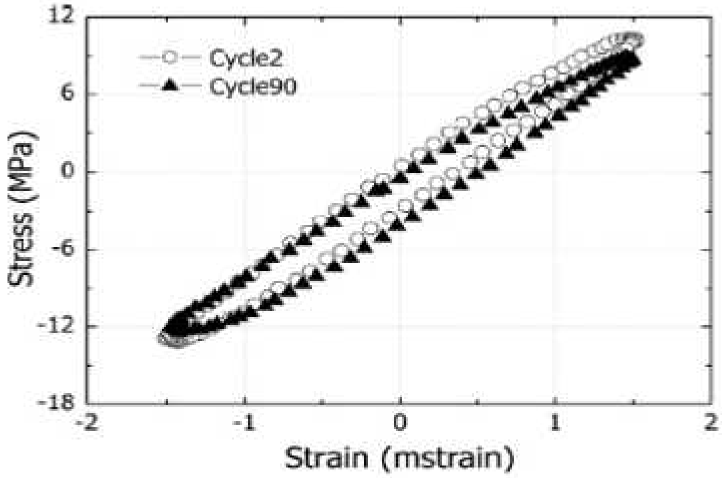


Fig. 5. Hysteresis loops from 10 pph SBR polymer–pigment composite at 1.0 mstrain amplitude.

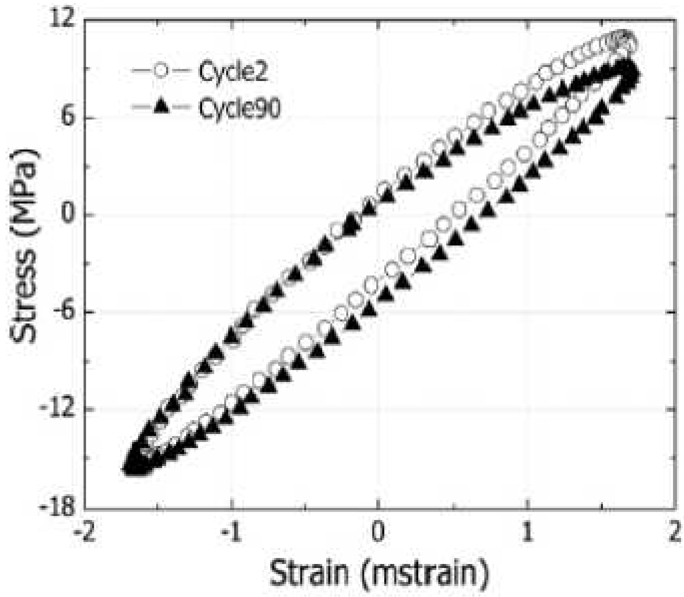


Fig. 6. Hysteresis loops from 10 pph SA polymer-pigment composite at 1.1 mstrain amplitude.

- Βρόχοι υστέρησης

Σε κόπωση, η περιοχή ενός βρόχου υστερήσεως τάσης-παραμόρφωσης είναι ένα μέτρο της μηχανικής ενέργειας που χάνεται λόγω ιξωδοελαστικής απόσβεσης κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου επέκτασης και συμπίεσης. Οι βρόγχοι υστέρησης των ιξωδοελαστικών υλικών είναι εμφανώς δύσκολο να αναλυθούν, αλλά μπορούν να αποκαλύψουν μια ενδιαφέρουσα εικόνα για τη συμπεριφορά του κάθε επιμέρους συστατικού ενός σύνθετου κατά τις δοκιμές κόπωσης.

Τα σχήματα 5 και 6 δείχνουν βρόγχους υστέρησης σε δύο διαφορετικά σημεία της δοκιμής κόπωσης για σύνθετα SBR και SA των 10pph. Και τα δύο σύνθετα έχουν χαμηλότερη σ_{max} και το SBR σύνθετο αρχίζει να δείχνει πολύ ελάχιστη κάμψη. Αυτή η διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τάσης οφείλεται στους διαφορετικούς μηχανισμούς του φορτίου που φέρουν τα σύνθετα εκθέματα. Θεωρείται ότι στη συμπίεση τα σκληρά σωματίδια χρωστικών κυριαρχούν στη συμπεριφορά, και αυτοί οι βρόγχοι υστέρησης στηρίζουν αυτή τη θεωρία. Μέσα στο εφελκυστικό τμήμα του βρόχου σημαντική ε_{pl} και ενέργεια διάδοσης ρωγμών χάνεται όσο η τομή διαμέσου της γραμμής μηδενικής τάσης είναι μία θετική τιμή της παραμόρφωσης. Κατά τη διάρκεια της συμπιέσεως η τομή της μηδενικής γραμμής τάσης είναι πολύ κοντά στο μηδέν, πράγμα που σημαίνει μικρή ε_{pl}. Σε ένα ομογενές υλικό, θα πρέπει να αναμένεται ότι ο άξονας στελέχους των σημείων τομής θα είναι συμμετρικός γύρω από τον άξονα τάσης. Η συμπεριφορά αυτού του υλικού σε συμπίεση μειώνει το ποσό της ενέργειας που χάνεται ανά κύκλο. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι οι φέρουσες ικανότητες των συνθέτων είναι πολύ υψηλότερες σε συμπίεση, όσο τα σωματίδια της χρωστικής αυξάνουν την ακαμψία του σύνθετου σ΄αυτή την κατεύθυνση. Το σύνθετο SA παρουσιάζει χαμηλότερη ελάχιστη τάση από το σύνθετο SBR. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι υπάρχει και κάποια συνεισφορά στην ενίσχυση από τη μήτρα του πολυμερούς, ειδικά όταν υπάρχει μεγαλύτερη σημαντική απώλεια ε_{pl} στη συμπίεση στους βρόχους υστέρησης του σύνθετου SA από τους σύνθετους βρόχους του SBR .

- Συμπεράσματα

Σύνθετη συμπεριφορά κόπωσης των ορυκτών σωματιδίων-πολυμερών βρέθηκε να είναι εξαρτώμενη τόσο από το επίπεδο όσο και τον τύπο του συνδετικού που χρησιμοποιείται. Το επίπεδο του χρησιμοποιούμενου συνδετικού επηρεάζει το πορώδες του σύνθετου, το οποίο είναι ο κύριος παράγοντας για τη μείωση της ζωής κόπωσης. Το πορώδες επιδεινώνεται από τη μετανάστευση συνδετικού κατά την ξήρανση του σύνθετου, που οδηγεί σε εύκολη έναρξη ρωγμής. Πιστεύεται ότι χρησιμοποιώντας μια χαμηλότερη T_g του πολυμερούς, οι τάσεις στις διεπαφές μειώνονται με αποτέλεσμα την αύξηση διάρκειας ζωής του σύνθετου και μειωμένη διεπιφανειακή θραύση. Μια περίληψη των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

Η διάρκεια ζωής στα σύνθετα χαμηλής περιεκτικότητας σε λατέξ (5 pph) καθορίζεται από τις ιδιότητες των διεπαφών σωματιδίου-λατέξ. Στα σύνθετα υψηλής περιεκτικότητας σε λατέξ (50 pph) αντιστρόφως, οι ιδιότητες όγκου του λατέξ καθορίζουν τη διάρκεια ζωής. Συνεπώς, για τη βελτίωση της ζωής σε σύνθετα χαμηλής περιεκτικότητας σε λατέξ, οι συγκολλητικές ιδιότητες πρέπει να βελτιστοποιηθούν.

Τα σύνθετα των 10 pph κατέδειξαν την υψηλότερη ακαμψία και είναι τα πλησιέστερα προς τη βέλτιστη ισορροπία συνδετικού-οπλισμού για ακαμψία. Αυτό δε σχετίζεται με το αν βελτιώθηκε ή επιδεινώθηκε η συμπεριφορά κόπωσης. Η ακαμψία ήταν αισθητά διαφορετική σε εφελκυσμό και θλίψη για τα χαμηλότερα πολυμερή σύνθετα PV_F. Αυτό οφείλεται στην υψηλή σχέση όγκου των σωματιδίων σκληρής χρωστικής που είναι πιο επηρεασμένα στη συμπεριφορά συμπίεσης, ενώ στα όλκιμα ελαστομερή πολυμερή κυριαρχούν χαρακτηριστικά παραμόρφωσης εφελκυσμού. Υπάρχουν πολύ μικρή μείωση της αντοχής σε θλίψη ως συνάρτηση του αριθμού των κύκλων. Η φέρουσα φόρτιση που φέρει αντίσταση υποτιμάται αισθητά σε όλη τη δοκιμή και είναι ταχύτερη στα σύνθετα SA. Αυτό πιστεύεται να οφείλεται σε περιοχές με χαμηλό λατέξ που δεν είναι σε θέση να υποστηρίξουν πολύ φορτίο και ραγίσματα σε όλη την δομή.

Οι βρόχοι υστέρησης δείχνουν για συγκεντρώσεις πολυμερούς 10 pph ότι συμβαίνει μικρή πλαστική βλάβη εντός της περιοχής συμπίεσης των κύκλων κόπωσης. Όσο περισσότερο πολυμερές περιλαμβάνει ένα σύνθετο, τόσο πιο πολύ χρησιμοποιείται σε φόρτιση συμπίεσης καθώς και εφελκυσμό, οδηγώντας σε πιο μεγάλες αποσβέσεις και απώλεια ενέργειας.

4.8 Επίδραση της θερμοκρασίας και μετα-σκλήρυνση στη συμπεριφορά κόπωσης θραύσεως του γυαλιού/σύνθετο απο φαινόλη

Εδώ παρουσιάζεται επίδραση της θερμοκρασίας και μετά-σκλήρυνση στη συμπεριφορά κόπωσης θραύσεως σε ένα ενισχυμένο με ίνες γυαλιού σύνθετο φαινολικής ρητίνης.
Πρώτον, έγιναν μονοδιάστατες δοκιμές εφελκυσμού για τη μέτρηση των καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων και τη συμπεριφορά ακουστικής εκπομπής (AE). Δεύτερον, έγιναν δοκιμές κόπωσης σε θερμοκρασία δωματίου για τα παρθένα και δύο είδη μετά-σκληρυντικών δειγμάτων. Τρίτον, οι S-N καμπύλες μετρώνται για τα δείγματα με και χωρίς οπή σε διάφορες θερμοκρασίες. Τέταρτον, διεξήχθησαν δοκιμές διάδοσης ρωγμών κόπωσης (ΔΡΚ) και επιτόπια μικροσκοπική παρατήρηση υπό εφελκυστική φόρτιση χρησιμοποιώντας οδοντωτά δείγματα για να διερευνήσουμε τη συμπεριφορά διάδοσης ρωγμών. Τέλος, οι επιφάνειες θραύσης μετά τις δοκιμές παρατηρήθηκαν με τη βοήθεια σαρώσεως ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (ΣΗΜ). Έχει βρεθεί ότι η τελική αστοχία συμβαίνει απότομα για τις μονοδιάστατες δοκιμές και τις δοκιμές κόπωσης, χωρίς να παρουσιάζεται ορατή ζημιά στην επιφάνεια των δειγμάτων, ενώ η μόνιμη παραμόρφωση και τα γεγονότα σωρευτικών AE αυξάνονται λίγο πριν τη θραύση. Η βραχυπρόθεσμη θεραπεία μετά τη διαδικασία σκλήρυνσης αυξάνει την αντοχή σε κόπωση όπως επίσης και τη στατική αντοχή, ενώ η μακράς διαρκείας μετασκληρυντική διεργασία υποβαθμίζει τη στατική αντοχή και τη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Η αντοχή κόπωσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας για τα παρθένα δείγματα χωρίς τρύπα. Η ζωή κόπωσης των δειγμάτων με ανοιχτή τρύπα μειώνεται ελαφρά με την αύξηση της θερμοκρασία του περιβάλλοντος έως 200^{o}C. Οι δοκιμές ΔΡΚ και η επιτόπια παρατήρηση υπό φόρτιση αποκάλυψαν ότι η θραύση συμβαίνει με ένα εύθραυστο τρόπο, αν και η σταθερή διάδοση ρωγμών παρατηρείται σε μερικά δείγματα. Η ΣΗΜ θραυσιγραφία δείχνει ότι ο «εφελκυσμός-διάτμηση» των ινών παρατηρήθηκε σε όλα τα δείγματα και ότι μικρά σωματίδια ρητίνης παρήχθησαν επί των επιφανειών των ινών των δειγμάτων μετά τις δοκιμές κόπωσης.

➢ Πειραματικά αποτελέσματα

Το Σχήμα 1 δείχνει μια φόρτιση / αποφόρτιση καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης. Μη γραμμικότητα και μόνιμη παραμόρφωση εμφανίζονται μετά την πλήρη αποφόρτιση στην παραμόρφωση μεγαλύτερες από το γραμμικά ελαστικό όριο (περίπου 2500 με). Το Σχήμα 2 δείχνει μόνιμη παραμόρφωση και αθροιστικά γεγονότα ΑΕ ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης κανονικοποιημένα με την αντοχή αστοχίας (περίπου 85 MPa). Τόσο η μόνιμη επιμήκυνση όσο και τα σωρευτικά γεγονότα ΑΕ αυξάνονται απότομα στην τάση που αντιστοιχεί έως περίπου 85% της αντοχής της αστοχίας. Κάθε μικροσκοπική ζημία δεν οπτικά παρατηρήσιμη στην επιφάνεια πριν από την τελική αστοχία.

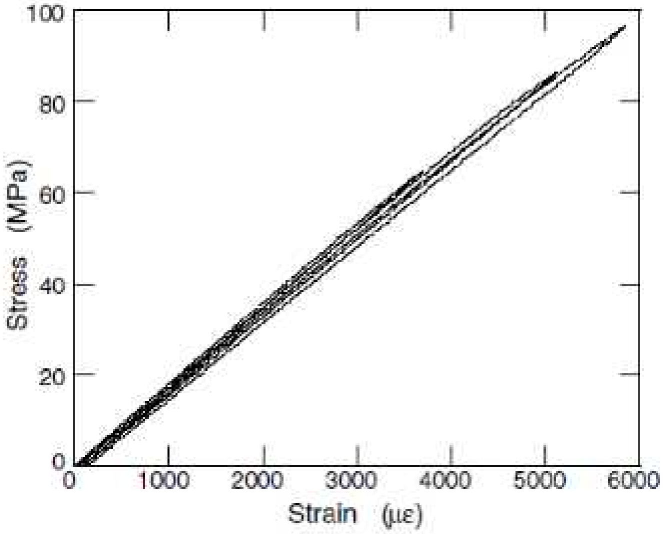


Fig. 1. Loading/unloading stress–strain curve of a GF/phenol composite.

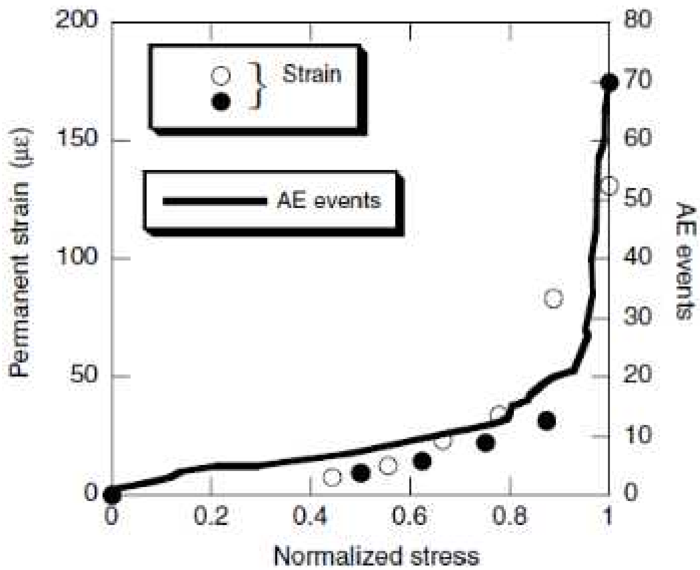


Fig. 2. Permanent strain and cumulative AE events during tensile loading.

Το Σχήμα 3 δείχνει S-N καμπύλες για παρθένα και μετά-σκληρυντικά δείγματα. Η δύναμη κόπωσης προσεγγίζεται από την ακόλουθη εξίσωση για τις τρεις καμπύλες:

S= α-blog N,

όπου a και b είναι σταθερές του υλικού ανάλογα με την κατάσταση θερμοκρασίας μετά την σκλήρυνση.

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις παραμέτρους α και b και το μέσο μέτρο ελαστικότητας του Young. Έχει αποδειχθεί ότι η βραχυπρόθεσμη μεταθεραπεία αυξάνει την αντοχή κόπωσης, καθώς και τη μονοδιάστατη αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ η μακροπρόθεσμη μειώνει και τις δύο δυνάμεις.

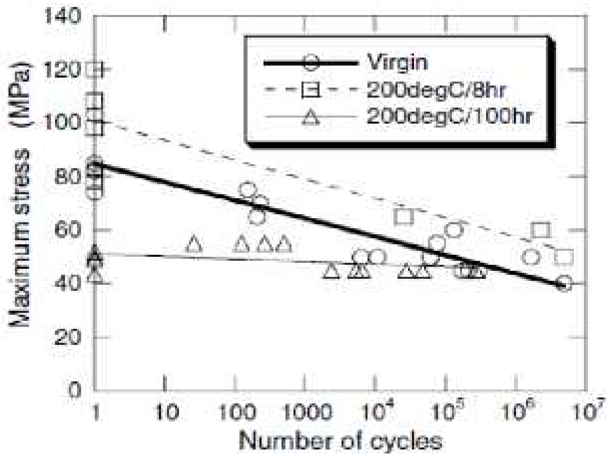


Fig. 3. *S–N* curves for virgin and after-cured GF/phenol specimens.

Table 1
Parameters of *S–N* curves and Young's modulus for virgin and after-cured specimens

	a (MPa)	*b* (MPa)	Young's modulus (GPa)
Virgin	84.7	6.79	17.7
200 °C/8 h	100.7	7.22	18.6
200 °C/100 h	51.3	0.98	17.8

Το Σχήμα 4(α) δείχνει τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης της παραμόρφωσης του παρθένου δείγματος κατά τη διάρκεια της φόρτισης σε κόπωση στη μέγιστη καταπόνηση των 40 MPa. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης μετατοπίζονται προς τα δεξιά, όσο ο αριθμός των κύκλων N αυξάνει.

Το Σχήμα 4(β) απεικονίζει την αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσης στη μέγιστη τάση και την αύξηση της μόνιμης παραμόρφωσης στη μηδενική τάση συναρτήσει του αριθμού των κύκλων για τα παρθένα και μακροπρόθεσμα μετά-σκληρυντικά δείγματα. Αμφότερα τα στελέχη του παρθένου δείγματος ξαφνικά αυξάνονται κατά περίπου 5 *10^5 κύκλους, ενώ η αύξηση πριν από τη θραύση του μετά-σκληρυντικού δείγματος είναι μικρότερη από εκείνη του παρθένου δείγματος. Δεν εμφανίστηκε μικροσκοπική βλάβη στην επιφάνεια μέχρι την τελική αστοχία στις δοκιμές κόπωσης, επίσης.

Το Σχήμα 5 δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για τις S-N καμπύλες των δειγμάτων με και χωρίς οπή. Οι κοίλοι και στερεοί σχεδιασμοί στέκονται ανέπαφοι και τα δείγματα με ανοιχτές οπές, αντιστοίχως. Οι στερεές και διακεκομμένες γραμμές λαμβάνονται με τοποθέτηση των σχεδιασμών σύμφωνα με την εξίσωση S= α-blog N .Η αντοχή σε κόπωση των ανέπαφων δειγμάτων μειώνεται με αυξανόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος ενώ η δύναμη του δείγματος με ανοικτές οπές δεν μειώνεται περισσότερο από 80^oC. Οι κλίσεις των S-N καμπύλων για 10^2 <N <10^7 παρατίθενται στον Πίνακα 2. Είναι ενδιαφέρον ότι η κλίση είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία (εκτός από τα δεδομένα στους 120^oC) και την παρουσία οπής.

Το Σχήμα 6 αναδεικνύει την επίδραση της θερμοκρασίας στον αριθμό των κύκλων μέχρι την αστοχία των δειγμάτων με και χωρίς οπή. Η ζωή κόπωσης των ανέπαφων δειγμάτων μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ τα δείγματα με ανοιχτές οπές μειώνουν ελαφρώς την αντοχή τους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι κλίσεις των καμπυλών είναι σχεδόν οι ίδιες ανάμεσα σε όλα τα ανέπαφα δείγματα.

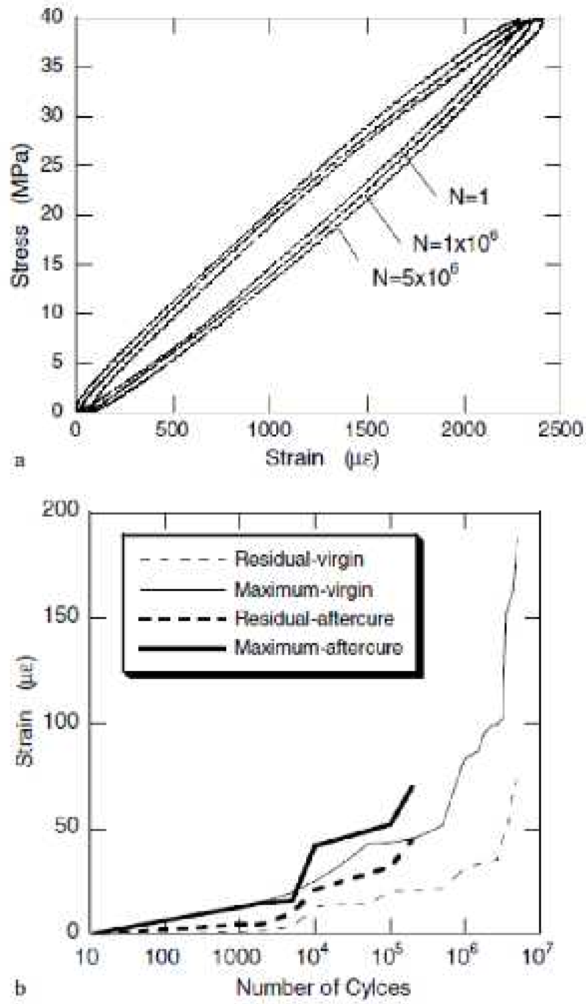


Fig. 4. Change in the: (a) stress–strain curves for the virgin specimen, and (b) maximum and residual strain increments for the virgin and long-term after-cured specimens during fatigue loading at maximum stress of 40 MPa.

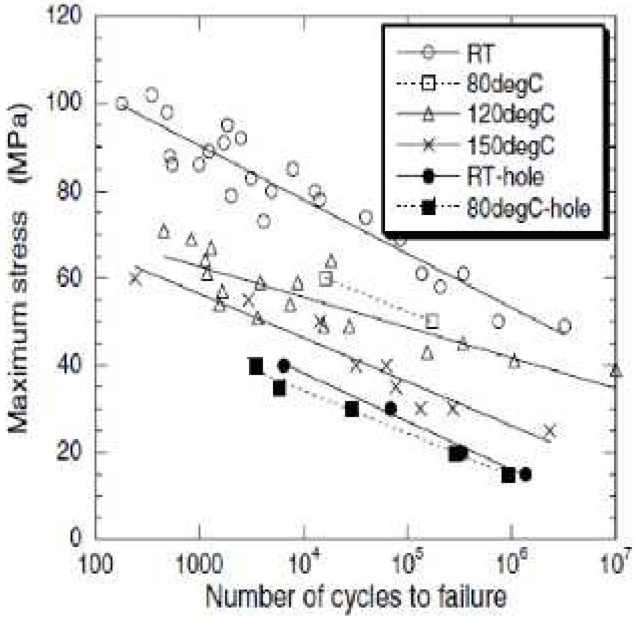


Fig. 5. Effect of temperature on S–N curves of the specimen with and without a hole.

Table 2
The slope of S–N curves b at various temperatures

Temperature (°C)	Hole	b (MPa)
25 (RT)	N	12.36
80	N	9.80
120	N	6.99
150	N	10.10
25 (RT)	Y	11.08
80	Y	9.81

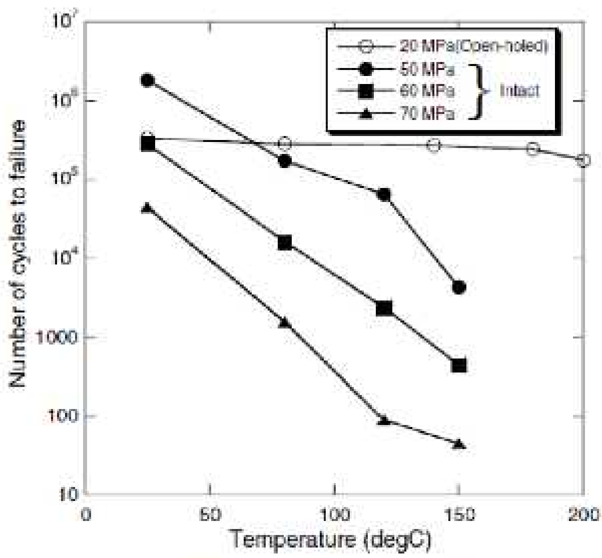


Fig. 6. Effect of temperature on number of cycles to failure of intact and open-holed specimens.

Το Σχήμα 7 απεικονίζει το μήκος της διάδοσης των ρωγμών ως συνάρτηση του αριθμού των κύκλων στις δοκιμές ΔΡΚ. Τα βέλη υποδηλώνουν τελική θραύση. Σχεδόν όλα τα δείγματα έπαθαν θραύση χωρίς σταθερή ανάπτυξη ρωγμών, ενώ μια ρωγμή διαδίδεται μέσα σε λίγα δείγματα.
Το Σχήμα 8 δείχνει επιτόπια οπτικά μικρογραφήματα απεικονίζοντας μια άκρη εγκοπής πριν από τη φόρτιση και λίγο πριν τη θραύση. Καμία μικροσκοπική βλάβη δεν παρατηρήθηκε πριν από την τελική αστοχία.
Το Σχήμα 9 δείχνει επιφάνειες θραύσης (α) του παρθένου δείγματος μετά τη μονοεφελκυστική δοκιμή εφελκυσμού, (β) του παρθένου, και (γ) των μακροπρόθεσμων μετά-σκληρυντικών (200^{o}C/100 h) δείγματων μετά από δοκιμές κόπωσης. Η επιφάνεια θραύσης των βραχυπρόθεσμων μετά-σκληρυντικών δειγμάτων βρέθηκε να είναι παρόμοια με (α). Εξόλκευση των ινών παρατηρήθηκε σε όλα τα δείγματα. Ένας αριθμός των σωματιδίων ρητίνης παρατηρήθηκε επί των ινών στα δείγματα μετά από δοκιμές κόπωσης. Στην παρούσα παρατήρηση, δεν αναγνωρίστηκε χαρακτηριστικό θραυσιγραφίας που δείχνει την προέλευση της θραύσης.
Το Σχήμα 10 δείχνει επιφάνειες θραύσης μετά από δοκιμές κόπωσης δειγμάτων με ανοιχτές οπές σε θερμοκρασία και μέγιστη ονομαστική τάση στα: (α) 20° C, 20MPa, (β) 180° C , 20 MPa, (γ)200° C, 20 MPa, (δ) 20° C, 15 MPa, και (ε) 20° C, 40 MPa. Ο αριθμός των κύκλων μέχρι την αστοχία είναι: (α) 3,33* 10^5, (β) 2,43*10^5, (γ) 1,75*10^5, (δ) 1,37*10^6, και (ε)6,48 * 10^3. Υπήρχε μικρή διαφορά στη μορφολογία θραύσης μεταξύ των δειγμάτων μετά από φόρτιση κόπωσης σε θερμοκρασία κάτω από 180^{o}C. Παρατηρούνται περισσότερα σωματίδια ρητίνης στο (γ) σε σχέση με (α), αν και ο αριθμός των κύκλων μέχρι την αστοχία του (γ) είναι περίπου ίση με εκείνη του (α). Τα σωματίδια ρητίνης που παρατηρήθηκαν στο (ε) είναι λιγότερα απ’ ότι στο (δ) λόγω των λιγότερων κύκλων αστοχίας σε μεγαλύτερη τάση.

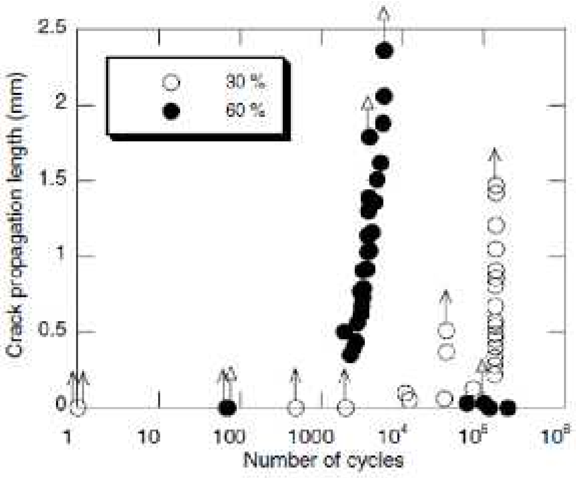


Fig. 7. Crack propagation length in the FCP tests. The arrows denote final fracture.

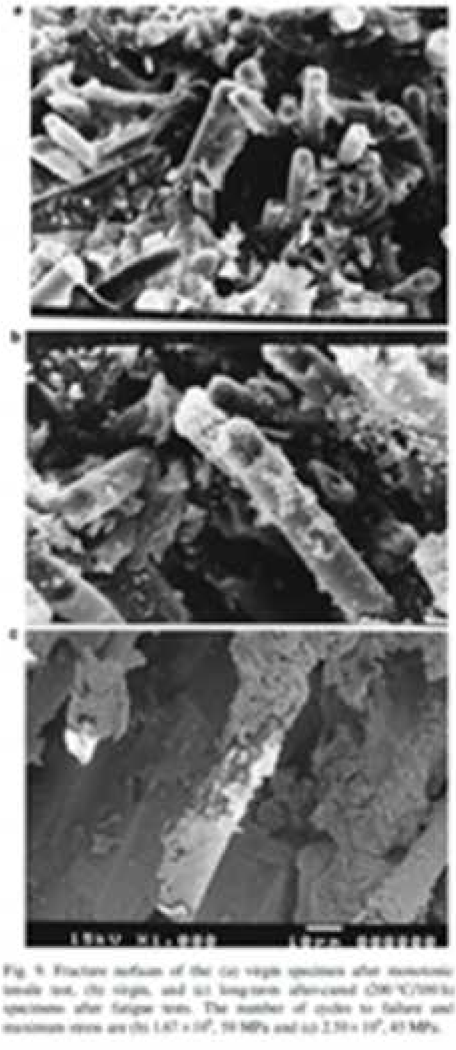
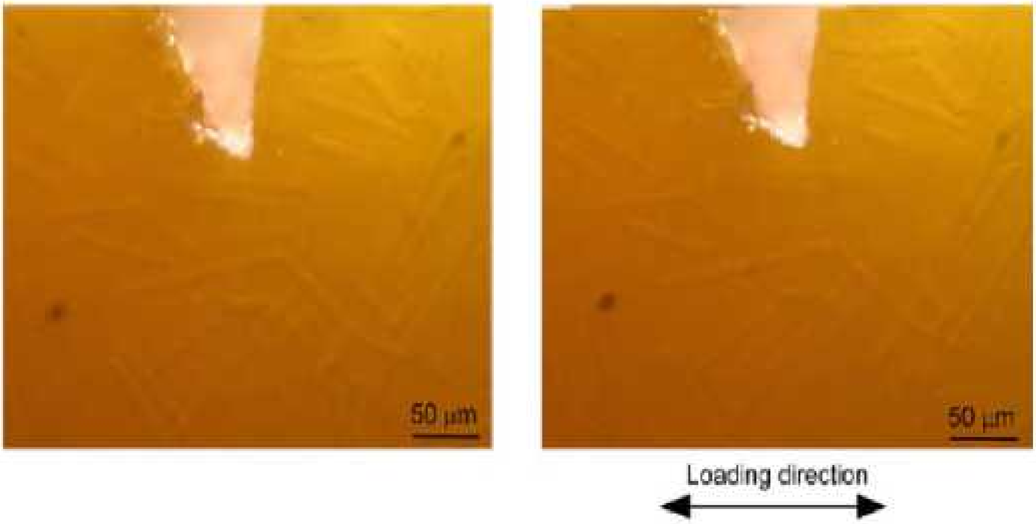


Fig. 9. Fracture surfaces of the (a) virgin specimen after monotonic tensile test, (b) virgin, and (c) long-term aftercured (200 °C/100 h) specimens after fatigue tests. The number of cycles to failure and maximum stress are (b) 1.67 × 10^6, 50 MPa and (c) 2.50 × 10^6, 45 MPa.



a before loading **b** just before fracture

Fig. 8. In situ optical micrographs showing notch tips before loading and just before fracture.

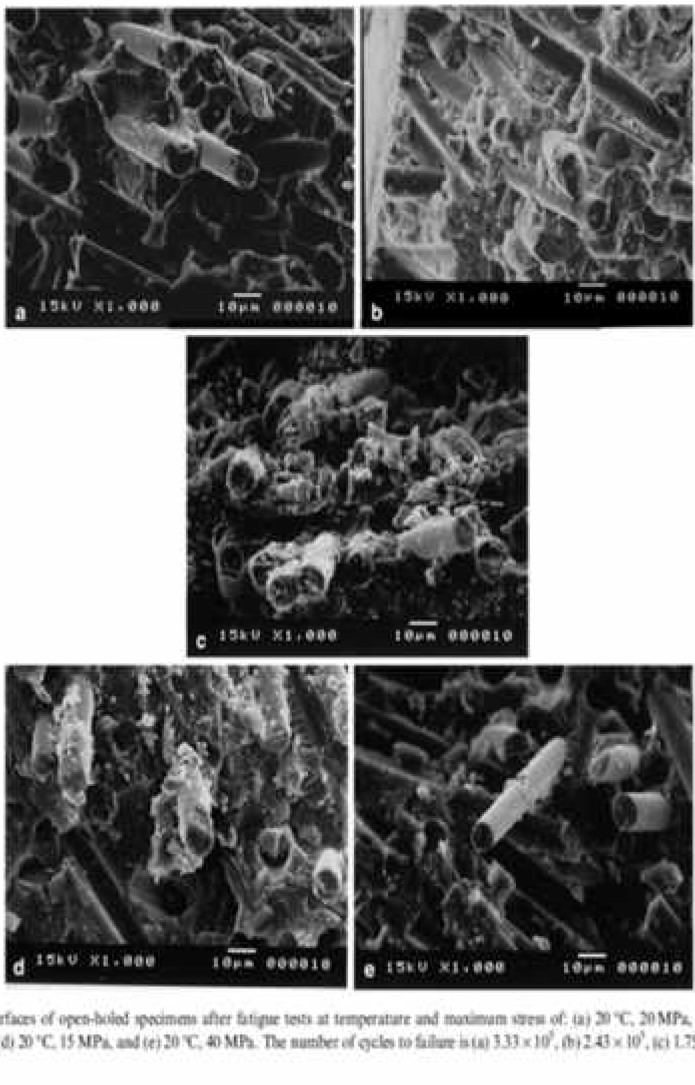


Fig. 10. Fracture surfaces of open-holed specimens after fatigue tests at temperature and maximum stress of: (a) 20 °C, 20 MPa, (b) 180 °C, 20 MPa, (c) 200 °C, 20 MPa, (d) 20 °C, 15 MPa, and (e) 20 °C, 40 MPa. The number of cycles to failure is (a) 3.33×10^5, (b) 2.43×10^5, (c) 1.75×10^5, (d) 1.37×10^6 and (e) 6.48×10^3.

- Μηχανισμός θραύσης

Από τα Σχήματα 2 και 4 (β), έχει βρεθεί ότι η συσσώρευση βλάβης στο πλαίσιο τόσο μονοδιάστατης εφελκυστικής φόρτισης όσο και φόρτισης κόπωσης αρχίζει ξαφνικά λίγο πριν από την τελική θραύση. Η αρχή των ρωγμών που ακολουθείται από σταθερή ανάπτυξη ρωγμών σπάνια παρατηρείται ακόμα και σε δείγματα με εγκοπές (Σχήματα 7 και 8). Επιπλέον, η μορφολογία θραύσεως στη δοκιμή κόπωσης είναι παρόμοια με εκείνη των μονοδιάστατων δοκιμών εφελκυσμού, με εξαίρεση το σχηματισμό των σωματιδίων ρητίνης στις δοκιμές κόπωσης (Σχήμα 9 (α) και (β)). Έτσι, αποδείχθηκε ότι η διαδικασία θραύσης κόπωσης υπό φόρτιση είναι βασικά παρόμοια με εκείνη υπό μονοδιάστατη φόρτιση.

Γενικά, η θραύση ξεκινά από την περιοχή όπου υπάρχει συγκέντρωση τάσης αν και το αρχικό σημείο της θραύσης κόπωσης δεν είχε εντοπιστεί στην παρούσα μελέτη (Σχήμα 8). Έτσι, τα ακόλουθα θεωρούνται η προέλευση της θραύσης σε αυτό το υλικό: (α) πόροι σε προϋπάρχουσες ρητίνες, (β) διεπαφές ινών / μήτρας, και (γ) τα άκρα των ινών. Ειδικά, όταν οι ίνες είναι τυχαία προσανατολισμένες, η θραύση συχνά λαμβάνει χώρα στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ μήτρας και των κάθετων ινών προς την κατεύθυνση φόρτισης.

Από την ανωτέρω συζήτηση, τεκμαίρεται ο ακόλουθος μηχανισμός θραύσης και στα δύο πλαίσια φόρτισης. Πρώτον, μικρορωγμές δημιουργούνται σε κάποια προέλευση που αναφέρθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια, ενώνονται η μία με την άλλη για να αυξηθούν σε μια κύρια ρωγμή. Η διάδοση ρωγμών συνοδεύεται από αποκόλληση της διεπιφάνειας ίνας / μήτρας. Τέλος, η θραύση συμβάινει όταν οι ίνες σπάνε και/ή βγαίνουν. Ειδικά στη δοκιμή κόπωσης, στα σωματίδια ρητίνης υποτίθεται ότι πρέπει να παράγονται από την τριβή στη διαπιφάνεια ινών /μήτρας λόγω της σχετικής μετατόπισης μεταξύ ινών και ρητίνης μετά την αποκόλληση.

Το δείγμα μπορεί να θερμαίνεται κατά τη διάρκεια φόρτισης κόπωσης δεδομένου ότι οι βρόγχοι υστέρησης παρατηρούνται στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 4(α)). Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται από τη διάχυση της ενέργειας λόγω τριβής που σχετίζεται με την ιξωδοελαστικότητα της ρητίνης, την τριβή της κάθε ίνας, την τριβή στη διεπαφή ίνας / ρητίνης και στην τριβή λόγω βλάβης. Έτσι, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη φόρτιση κόπωσης μπορεί να συσχετιστεί με τη συσσώρευση βλάβης πριν τη θραύση και να μετρηθεί στο εγγύς μέλλον.

- Επίδραση της θερμοκρασίας και μετά-σκλήρυνση

Ενώ η εξάρτηση από τη θερμοκρασία για αντοχή σε κόπωση παρατηρήθηκε (Σχήματα 5 και 6), υπάρχει μικρή διαφορά στη θραυσιγραφία μετά από δοκιμές κόπωσης σε θερμοκρασία στην περιοχή από RT έως 180^{o}C. Ωστόσο, πολλά σωματίδια ρητίνης παρατηρούνται μετά από δοκιμές κόπωσης στους 200^{o}C παρά τους λίγους κύκλους (Σχήμα 10(c)). Αυτό σημαίνει ότι η ρητίνη και η διεπιφάνεια ίνας /ρητίνης που υποβλήθηκαν σε υψηλή θερμοκρασία υποβαθμίζονται, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε κόπωση. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αρκετά εύλογο επειδή η θερμοκρασία μεταπτώσεως γυαλιού του παρόντος υλικού είναι περίπου 200-220^{o}C. Στη βιβλιογραφία, η κλίση (παράμετρος b) και τομή (στατική αντοχή, παράμετρος α) μιας S-N καμπύλης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ενώ η κλίση είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία στην παρούσα δημοσίευση (Πίνακας 2). Αναισθησία της κλίσης στη θερμοκρασία σημαίνει ότι η αντοχή σε κόπωση εξαρτάται από τη στατική αντοχή. Ως εκ τούτου, είναι αποτελεσματική η βελτίωση της στατικής αντοχής για εξαιρετικές ιδιότητες κόπωσης ακόμη και σε υψηλή θερμοκρασία.

Εδώ, προτείνεται βάσει της εξίσωσης S= α-blog N, μια πρακτική έκφραση που εφοδιάζει μια ζωή κόπωσης για δεδομένη μέγιστη τάση και θερμοκρασία. Πρώτον, η S-N σχέση σε δεδομένη θερμοκρασία T (RT έως 150^{o}C) προσεγγίζεται από S=σ(T)-blog N, όπου σ(T) δηλώνει στατική αντοχή στο T και το b είναι μια σταθερά που υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητη από T και S. Δεύτερον, η ζωή κόπωσης για αυθαίρετη S (50-70 MPa) σε σταθερή θερμοκρασία T περίπου δίνεται από:

log N= c(S) -dT ,

όπου c είναι μία συνάρτηση του S και το d είναι μία σταθερά που υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητη από T και S. Αντικατάσταση της εξίσωσης log N= c(S) -dT στην εξίσωση S=σ(T)-blog N δίνει μία γραμμική σχέση όπως

logN (S,T)={σ(To)-S}/b –d(T-To),

όπου το σ(T_0) συμβολίζει στατική αντοχή στη θερμοκρασία αναφοράς T_0. Η παραπάνω εξίσωση προσφέρει πρακτική πρόβλεψη της ζωής κόπωσης ως συνάρτηση της μέγιστης πίεσης και θερμοκρασίας. Η φυσική έννοια της εξίσωσης αυτής που σχετίζεται με το μηχανισμό θραύσης και τη μηχανική θα πρέπει να συζητηθούν αλλού.

Το Σχήμα 11 δείχνει σύγκριση των S-N καμπύλων μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και πρόβλεψη χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 20 έως 150^oC. Απασχολούν η θερμοκρασία αναφοράς T_0 = 80^oC και οι σταθερές b = 9.8 MPa, d = 0,022 (^oC-1). Προβλεπόμενες καμπύλες είναι λογικά καλά συμβατές με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η βραχυπρόθεσμη θεραπεία μετά-σκλήρυνσης αυξάνει την αντοχή σε κόπωση λόγω της προώθησης της σκλήρυνσης της ρητίνης, ενώ η μακροπρόθεσμη μειώνει τη δύναμη, αφού θεωρείται ότι υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης και της διεπαφής ινών / ρητίνης. Ψαθυρή θραύση της ρητίνης κοντά στη διασύνδεση (Σχήμα 9(γ)) και μικρότερη επιμήκυνση πριν την αστοχία κοπώσεως (Σχήμα 4(β)) πιθανώς σχετίζεται με επιδείνωση της ρητίνης και επιφάνειας ινών /μήτρας κατά τη διάρκεια της μακροχρόνιας θεραπείας μετά την διαδικασία.

Δεδομένου ότι οι ίνες γυαλιού είναι κατεργασμένες με σιλάνιο σ' αυτό το σύνθετο, μία από τις πιθανές μεταβολές που οφείλονται στη μακροχρόνια θερμική έκθεση είναι θραύση του χημικού δεσμού στη διεπιφάνεια. Άλλη αλλαγή είναι φυσική και χημική γήρανση της φαινολικής ρητίνης σε υψηλή θερμοκρασία. Δεν έχει επιβεβαιωθεί εδώ αν συμβαίνει χημική αντίδραση όπως θερμική αποσύνθεση της φαινολικής ρητίνης. Λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά γήρανσης στο παρόν εύρος θερμοκρασίας δεν έχουν αναφερθεί, αν και μερικά πειραματικά αποτελέσματα για επίδραση της θερμοκρασίας μέχρι και 200^oC στη συμπεριφορά κόπωσης του γυαλιού/σύνθετων από φαινόλη έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία. Πιο λεπτομερή έρευνα είναι απαραίτητη για την κατανόηση της θερμικής αποικοδόμησης του υλικού αυτού.

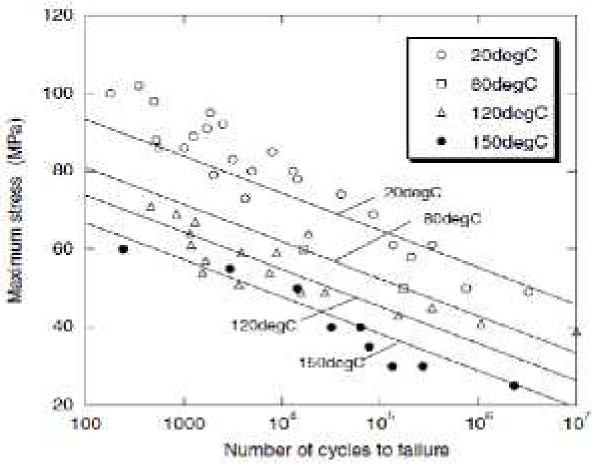


Fig. 11. Comparison of S–N curves between experimental results and prediction.

- Συμπεράσματα

Χαρακτηρίστηκε πειραματικά η επίδραση του θερμικού περιβάλλοντος στη συμπεριφορά κόπωσης θραύσης ενός γυαλιού/σύνθετου φαινόλης. Η θραύση υπό μονοδιάστατο εφελκυσμό και φόρτιση κόπωσης συνέβη απότομα χωρίς να παρουσιάζει εμφανείς ζημιές στην επιφάνεια των δειγμάτων, ενώ κάποιες ενδείξεις συσσώρευσης βλάβης παρατηρήθηκαν πριν τη θραύση. Η βραχυπρόθεσμη μετά-σκλήρυνση αύξησε την αντοχή σε κόπωση, καθώς και τη στατική αντοχή ενώ η μακροπρόθεσμη υποβάθμισε την αντοχή. Η αντοχή κόπωσης μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας αν και η μορφολογία θραύσεως δεν άλλαξε κάτω από 180^oC. Η υποβάθμιση δύναμης σε υψηλή θερμοκρασία και μετά από μακροχρόνια μετά-σκλήρυνση βρέθηκαν να οφείλονται σε αποικοδόμηση της ρητίνης και της διεπαφής.

5. Βιβλιογραφία

1. Ιωάννης Ραυτογιάννης, Σημειώσεις για το μεταπτυχιακό μάθημα «Κατασκευές από Σύνθετα Υλικά», Τομέας Δομοστατικής ΔΠΜΣ, Αθήνα 2009
2. Ever J. Barbedo, «Introduction to Composite Materials Desing»
3. **www.science@direct.com**
4. Forbes Aird, «Fiberglass and Composite Materials»
5. Andrew Marshall, «Composite Basics»
6. John J. Morena, «Advanced Composite Moldmaking»
7. K. Diamanti, C. Soutis and J.M. Hodgkinson, «Non-destructive inspection of sandwich and repaired composite laminated structures » , (Composites Science and Technology, Volume 65, Issue 13, October 2005, Pages 2059-2067)
8. C. Soutis, «Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction» (Materials Science and Engineering: A, In Press, Corrected Proof
9. C. Soutis, «Fibre reinforced composites in aircraft construction», (Progress in Aerospace Sciences, Volume 41, Issue 2, February 2005, Pages 143-151)
10. Maria Kashtalyan and Costas Soutis, «Analysis of composite laminates with intra- and interlaminar damage », (Progress in Aerospace Sciences, Volume 41, Issue 2, February 2005, Pages 152-173)
11. K. Diamanti, C. Soutis and J.M. Hodgkinson, «Lamb waves for the non-destructive inspection of monolithic and sandwich composite beams» (Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 36, Issue 2, February 2005, Pages 189-195)
12. J. Lee and C. Soutis, «Thickness effect on the compressive strength of T800/924C carbon fibre–epoxy laminates » (Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 36, Issue 2, February 2005, Pages 213-227)
13. Koundouros, Brian G. Falzon, Costas Soutis and Steven J. Lord, «Predicting the ultimate load of a CFRP wingbox» (Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 35, Issues 7-8, July 2004, Pages 895-903)
14. Maria Kashtalyan and Costas Soutis, «Analysis of local delaminations in composite laminates with angle-ply matrix cracks» (International Journal of Solids and Structures, Volume 39, Issue 6, March 2002, Pages 1515-1537)
15. Seth S. Kessler, S. Mark Spearing, Mauro J. Atalla, Carlos E. S. Cesnik and Constantinos Soutis, «Damage detection in composite materials using frequency response methods » (Composites Part B: Engineering, Volume 33, Issue 1, January 2002, Pages 87-95)
16. Y. Zhuk, I. Guz and C. Soutis, «Compressive behaviour of thin-skin stiffened composite panels with a stress raiser » (Composites Part B: Engineering, Volume 32, Issue 8, December 2001, Pages 697-709)
17. Costas Soutis and Igor A. Guz, «Predicting fracture of layered composites caused by internal instability», (Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 32, Issue 9, September 2001, Pages 1243-1253)
18. V. J. Hawyes, P. T. Curtis and C. Soutis, «Effect of impact damage on the compressive response of composite laminates», (Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 32, Issue 9, September 2001, Pages 1263-1270)
19. www. fiberglast.com
20. www. mdacomposites.org
21. www. e-composites.com
22. www. reichhold.com
23. www. tencom.com
24. www. fulcrumcomposites.com
25. www.wikipedia.org