



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**Δ.Π.Μ.Σ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»**  
**Σ.Ε.Μ.Φ.Ε- ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΑΠΟ ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΤΑ ΕΞΥΨΗΝΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μαρία Γιαννού**



**Επιβλέπων : Αιμίλιος Σιδερίδης**  
**Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**Δ.Π.Μ.Σ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»**  
**Σ.Ε.Μ.Φ.Ε- ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΑΠΟ ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΤΑ ΕΞΥΨΗΝΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μαρία Γιαννού**



**Επιβλέπων: Αιμίλιος Σιδερίδης**  
**Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012**

## **Από τα σύνθετα στα έξυπνα υλικά και τις εφαρμογές τους**

Γιαννού Μαρία (Επιβλέπων: Σιδερίδης. Α)

### **Περίληψη**

Η μηχανική των σύνθετων και των έξυπνων υλικών αποτελεί σήμερα έναν μεγάλο κλάδο της Μηχανικής ο οποίος συνεχώς διευρύνεται και αναπτύσσεται. Τα σύνθετα υλικά, στην κατηγορία των οποίων ανήκουν τα κοκκώδη, τα ινώδη και τα πολυστρώτα, ευρίσκονται σε συνεχή εξέλιξη την τελευταία τριαντακονταετία και οι ιδιότητες τους επηρεάζονται πλην άλλων και από την πρόσφυση του εγκλείσματος και της μήτρας, όπως επίσης και από την επίδραση των γειτονικών εγκλεισμάτων. Στα έξυπνα υλικά, όπως τα υλικά για έλεγχο ήχων και κραδασμών, τα κράματα με μνήμη σχήματος (shape memory alloys), τα τσιμεντοειδή σύνθετα (engineered cementitious composites) και τα υλικά με ικανότητα «αυτο-ίασης» (self-healing materials), μεγαλύτερη σημασία έχουν οι λειτουργίες/ενέργειες που μπορούν να εκτελέσουν παρά οι ονομαστικές τιμές κάποιων φυσικών ιδιοτήτων ή χαρακτηριστικών τους. Ειδικότερα μπορούν να επιτηρούν τις συνθήκες τους, να ανιχνεύουν επικείμενη αστοχία, να ελέγχουν ή να θεραπεύουν ζημιές, και να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες των ευφυών υλικών μπορούν να σχεδιαστούν κατασκευές που να αξιοποιούνται στα λειτουργικά και δομικά τους όρια χωρίς τον κίνδυνο να τα ξεπεράσουν. Σκοπός αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εις βάθος μελέτη των σύνθετων και κυρίως των έξυπνων υλικών και ιδιαίτερα η αναλυτική διερεύνηση των ολοένα και περισσότερων εφαρμογών των τελευταίων σε κάθε τομέα που μπορεί να χωρέσει ο ανθρώπινος νους.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
Msc “COMPUTATIONAL MECHANICS”  
S.E.M.F.E – MECHANIC SECTOR

DIPLOMA THESIS

**From complex to smart materials and their applications**

Giannou Maria (Supervisor: Sideridis. A)

**Abstract**

Mechanics of composites and smart materials is nowadays a big branch of Engineering which constantly expands and grows. Composite materials, in the category of which are the particulate, fibrous and laminated materials, are in continuous development over the last thirty years and their properties are affected among others by the adhesion of the inclusions and the matrix, as well as the influence of adjacent inclusions. In smart materials, such as materials to control sound and vibration, the shape memory alloys, the engineered cementitious composites and self-healing materials, more important are the functions / actions they can perform than the nominal values of some physical properties or their characteristics. Especially they can monitor their conditions, detect impending failure, control or treat damage and adapt to changing environments. Exploiting the properties of intelligent materials, structures can be designed to be utilized in functional and structural boundaries without risk to overcome them. The purpose of this master thesis is a depth study of complex and mainly of smart materials and especially the detailed investigation of the increasing number of smart materials applications in every sector that the human mind can fit.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία με τίτλο «Από τα σύνθετα στα έξυπνα υλικά και τις εφαρμογές τους» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Υπολογιστική Μηχανική» και στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό, πέρα από την ατομική εργασία, στην ηθική συμπαράσταση και δυνατότητα εκπόνησης που έλαβα από τον επιβλέποντα Καθηγητή μου Κ. Σιδερίδη Αμίλιο, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Μ.Π, Χριστόπουλο Άγγελο, για τις χρήσιμες υποδείξεις του στη διάρθρωση της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και για τη βιβλιογραφική βάση που μου παρείχε.

Τόσο η πολύτιμη επιστημονική βοήθεια αμφότερων, όσο και οι χρήσιμες συμβουλές τους, έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της διπλωματικής μου εργασίας αφενός αλλά και στην αποκόμιση γνώσεων στο ερευνητικό πεδίο των σύνθετων και έξυπνων υλικών αφετέρου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου για την ενθάρρυνση και τη στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω σ' αυτούς που πάντα στέκονται δίπλα μου με αδιάλειπτη συμπαράσταση και υπομονή: τους γονείς μου Κώστα και Σταυρούλα.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	i
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά .....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.1.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη των σύνθετων υλικών .....	1
1.1.2 Η εξέλιξη των πολυμερών .....	3
1.1.3 Βασικές έννοιες.....	4
1.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών.....	9
1.2.1 Ινώδη σύνθετα υλικά (Fibrous composites).....	9
1.2.2 Κοκκώδη σύνθετα υλικά (Particulate composites).....	21
1.2.3 Στρωματικά σύνθετα υλικά (Laminated composites).....	23
1.2.4 Μήτρες.....	23
1.3 Διαδικασία σχεδιασμού .....	32
1.3.1 Σχεδιασμός με κύριες τάσεις .....	33
1.3.2 Περίληψη μεθόδων σχεδιασμού σύνθετων υλικών .....	33
Κεφάλαιο 2: Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες σύνθετων υλικών .....	38
2.1 Φυσικές ιδιότητες.....	38
2.1.1 Ερπυσμός, θερμοκρασία και υγρασία.....	38
2.1.2 Αντοχή σε διάβρωση.....	41
2.1.3 Πυραντοχή .....	43
2.2 Μηχανικές ιδιότητες πολύστρωτων .....	49
2.2.1 Μηχανικές ιδιότητες .....	49
2.2.2 Αστοχίες πολύστρωτων .....	51
2.2.3 Τρόποι και μορφές αστοχίας.....	51
2.2.4 Κριτήρια αστοχίας .....	53
2.2.5 Λυγισμός.....	56
Κεφάλαιο 3: Διαδικασίες παραγωγής.....	58
3.1 Χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης-«hand lay-up» .....	59
3.2 Διαστρωμάτωση με προκατασκευασμένες στρώσεις-«prepreg lay-up» .....	62
3.3 Μόρφωση σύνθετου υλικού μέσω περιβλήματος – «bag molding».....	63
3.4 Διαμόρφωση μέσω κλιβάνου-«autoclave processing» .....	65
3.5 Εκμαγείο συμπίεσης – compression molding.....	67
3.6 Καλούπι ρητινένεσεως - resin transfer molding (rtm).....	68
3.7 Διαδικασία παραγωγής με έλξη - pultrusion .....	71
3.8 Διαδικασία περιέλιξης - filament winding.....	75
3.9 Γενικές παρατηρήσεις – πλεονεκτήματα σύνθετων.....	78
Κεφάλαιο 4: Εισαγωγή στα έξυπνα υλικά .....	83

4.1 Συστήματα ταξινόμησης για προηγμένα και έξυπνα υλικά.....	86
4.2 Διαρθρωτικός έλεγχος υγείας ως ένας τρόπος για να καταστούν έξυπνα τα υλικά και οι κατασκευές .....	87
4.3 Έλεγχος διαδικασίας και προ-παρακολούθησης ως μέρος του ΔΕΥ .....	90
4.4 Παθητικός και ενεργητικός διαρθρωτικός έλεγχος υγείας(ΔΕΥ).....	92
4.5 Ενεργητικά και παθητικά έξυπνα υλικά .....	95
Κεφάλαιο 5: Κατηγορίες έξυπνων υλικών .....	97
5.1 Έξυπνα υλικά για έλεγχο ήχων και κραδασμών .....	97
5.2 Κράματα με μνήμη σχήματος (shape memory alloys) .....	114
5.2.1 Αρχή λειτουργίας των SMA .....	114
5.2.2 Ο βρόχος υστέρησης .....	116
5.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των SMA .....	117
5.2.4 Μέθοδοι ενεργοποίησης των SMA.....	118
5.2.5 Κράματα Ni-Ti.....	119
5.3 Τσιμεντοειδή σύνθετα (engineered cementitious composites) .....	120
5.4 Υλικά με ικανότητα «αυτό-ίασης» (self-healing materials) .....	124
Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές έξυπνων υλικών .....	127
6.1 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία .....	127
6.2 Εφαρμογές στην ναυσιπλοΐα.....	130
6.3 Εφαρμογές στη σιδηροδρομική .....	130
6.4 Εφαρμογές στην αεροπορική βιομηχανία.....	130
6.5 Εφαρμογές στον κατασκευαστικό κλάδο .....	131
6.6 Εφαρμογές στα Ρομποτικά Συστήματα .....	133
6.7 Εφαρμογές στη βιομηχανία παραγωγής σωλήνων .....	136
6.8 Εφαρμογές στον αθλητισμό και τον τομέα αναψυχής.....	136
6.9 Εφαρμογές για στρατιωτικούς σκοπούς .....	138
6.10 Εφαρμογές στην ιατρική και την οδοντιατρική.....	139
6.10.1 Εφαρμογές σε πλατφόρμες οστεογένεσης .....	139
6.10.2 Εφαρμογές των κραμάτων NiTi.....	145
6.11 Το μέλλον των έξυπνων υλικών .....	148
6.11.1 Νέο πολυμερές υλικό με ιδιότητες γυαλιού.....	148
6.11.2 Τα «έξυπνα» υλικά γίνονται έξυπνότερα.....	149
7. Βιβλιογραφία .....	151

# Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

## 1.1 Εισαγωγή

### 1.1.1 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 προϋπήρχαν 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 κατασκευάστηκε 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 γραφίτη. 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 Saab-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 στη 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 περισσότερων υλικών και έχει ιδιότητες διάφορες των αρχικών υλικών που το δημιουργήσαν». 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/βάρους 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 περισσότερων 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.

### **1.1.2 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 σύνθετων 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 σχεδίασεως», 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. Το βαθμό ευθυγραμμίσεως των αλυσίδων αυτών μέσα στο τελικό προϊόν.

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 τεχνητή μετάξα (ραιγιόν) και η κλωστή του μπορεί να κατασκευαστεί πολύ λεπτότερη από τις ίνες φυσικής μετάξας.

### 1.1.3 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

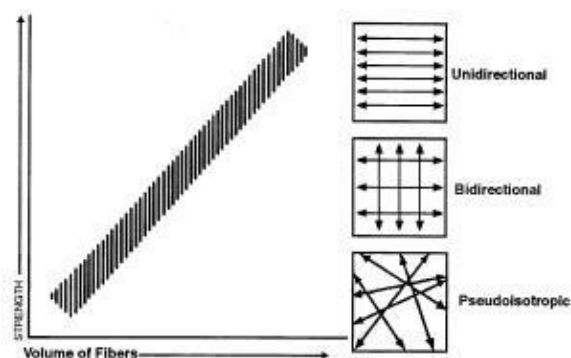
- Ίνες ενιαίου προσανατολισμού
- Ίνες διπλού προσανατολισμού (π.χ. πλεκτές (*woven*), *stitched mat* κ.α.)
- Τυχαίου προσανατολισμού (συνεχείς δέσμες ινών *continuous strand mat*-CSM)

-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



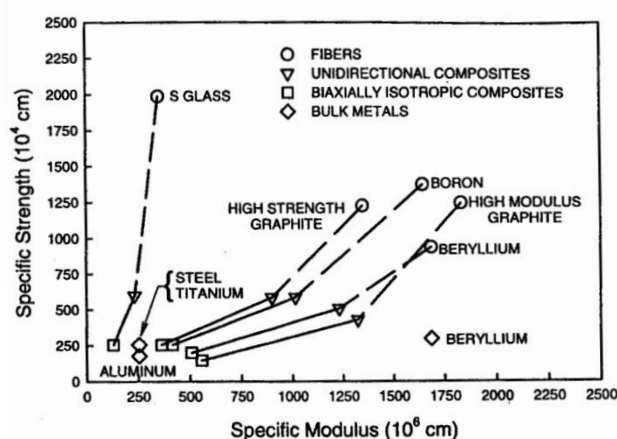
Σχ. 1.1: Σχέση αντοχής και προσανατολισμού των ινών

## 1. 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

## 2. 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*))



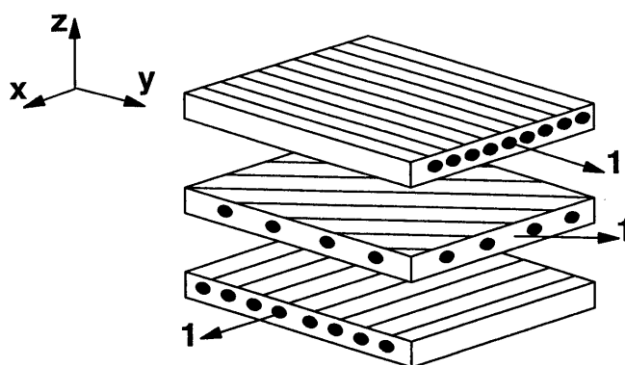
Σχ. 1.2: Σύγκριση αντοχών και δυσκαμψιών σύνθετων υλικών και μετάλλων

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 οξύτερη 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.

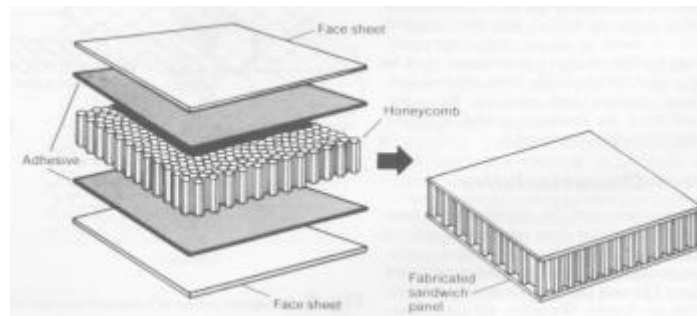
Αφού οι ίνες δεν συνεισφέρουν στην αντοχή κατά την εγκάρσια στην διεύθυνση των ινών έννοια, και με δεδομένο ότι η αντοχή του συνδετικού υλικού είναι πολύ μικρή,

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*) δε 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

## 1.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών

### 1.2.1 Ινώδη σύνθετα υλικά (Fibrous composites)

Τα ινώδη σύνθετα υλικά είναι σύνθετα με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας. Διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Ως προς την ταξινόμηση αυτή, τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- *Μονοδιευθυντικά σύνθετα*, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- *Πολυδιευθυντικά σύνθετα*, στα οποία οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Έχουμε ακόμα την ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών σύνθετων στις ακόλουθες υπο-ομάδες :

- Σύνθετα με ίνες *τυχαίας διεύθυνσης*.
- Σύνθετα με ίνες *σε πλέξη ύφανσης*.
- Σύνθετα με ίνες *σε τρισσορθογώνια ύφανση*.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο ( $l / d$ ) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

- *Συνεχείς ή μεγάλοι μήκους ίνες (continuous fibers)*, όταν είναι  $l / d \geq 100$ .
- *Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers)*, όταν είναι  $l / d < 100$ .
- *Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers)*: Με  $d < 1\mu\text{m}$  και  $l \cong 100\mu\text{m}$  (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).



## ΙΝΕΣ

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.

## ΤΥΠΟΙ ΙΝΩΝ

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 στο 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°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



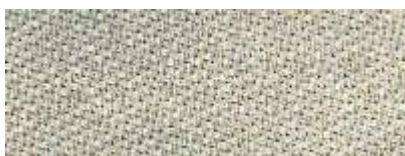
(b) Κοντές ίνες γυαλιού 1/4"



(c) Κοντές ίνες γυαλιού 1/32"



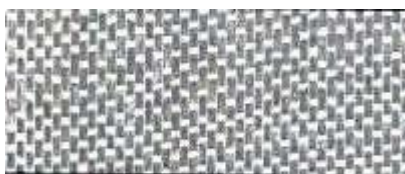
(d) Κοντές ίνες γυαλιού 1/16"



(e) E-Glass τύπος 7781



(f) E-Glass τύπος 120



(g) Ίνες E-Glass ενιαίου προσανατολισμού



(h) Ίνες E-Glass σταυροειδούς πλέξης

**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.

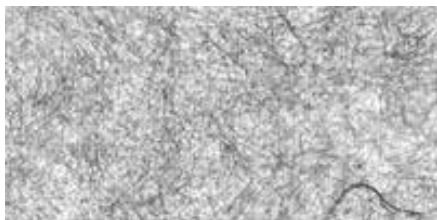
Η ταξινόμηση των ινών άνθρακα γίνεται συνήθως βάσει της δυσκαμψίας και της αντοχής τους, αλλά κατασκευαστικά είναι δυνατόν να δημιουργηθεί οποιοδήποτε συνδυασμός δυσκαμψίας και αντοχής. Σύμφωνα με τον Πιν. 2.1, οι ίνες T300, AS2 και AS4D θεωρούνται υψηλής δυσκαμψίας (*HS=High Stiffness*) ίνες, οι IM6 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 τη 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 το 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 στην 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

**ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΙΝΕΣ:** 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°C 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 θερμοκρασία χειρισμού (120°C). 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)

**ΛΟΙΠΕΣ ΙΝΕΣ:** 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 ασύμφωρες 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 οξειδία 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 την 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 δραστηρικής μείωσης της αντοχής των ινών.

## ΜΟΡΦΕΣ ΙΝΩΝ

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 επιτυγχάνουν 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 επιμήκεις 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.



**ΔΕΣΜΕΣ ΙΝΩΝ (Strand, tow, end, yarn και roving):** 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 που 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.

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

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:

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

όπου  $\rho_f$  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).

**ΔΕΣΜΕΣ ΙΝΩΝ (mat, fabric και veil):** 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.  $\pm\theta$ , δηλ. δέσμες με ίσες ποσότητες  $+\theta$  και  $-\theta$ ), 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 τη διάταξη των ινών τους. Η διάταξη των ινών καθορίζει στο σχεδιαστή τον προσανατολισμό και το βάρος κάθε συνιστώσας του υφάσματος, όπως φαίνεται στον Πιν. 2.3.



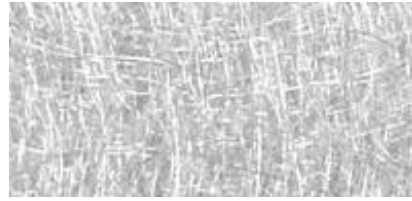
(a) Continuous Strand Veil Surfacing



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



**(b)** (1 1/2 ounce)



**(d)** Continuous Strand Mat



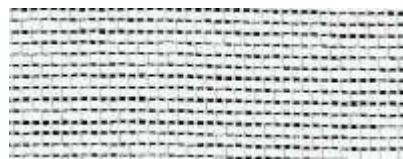
**(e)** Woven Roving



**(f)** 2 Oz. Fabric



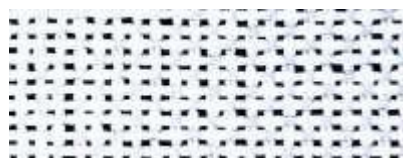
**(g)** 4 Oz. Fabric: 50 inch wide



**(h)** 6 Oz. Fabric: 38 inch wide



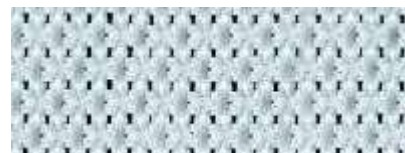
**(i)** 7 1/2 Oz. Fabric



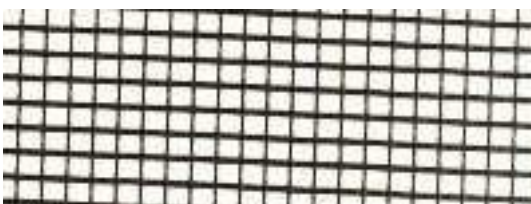
**(g)** 10 Oz. Fabric



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



**(l)** 10 Oz. Fabric



**(m)** Scrim Fabric, Black



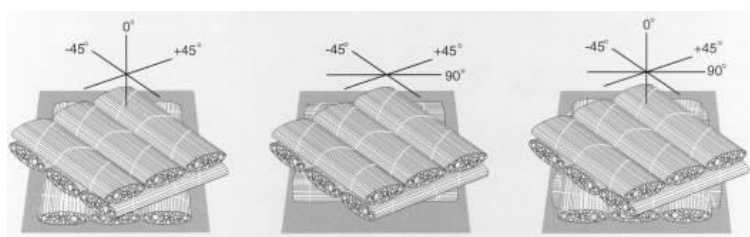
**(n)** Scrim Fabric, White



(o) Woven Fiberglass Tapes



(p) Gun Roving



(q) Diagram of Stitched Triaxial and Quadraxial Fabrics

### 1.2.2 Κοκκώδη σύνθετα υλικά (Particulate composites)

Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά έχουν ως ενίσχυση σωματίδια (κόκκους) τα οποία είναι διασκορπισμένα στο εσωτερικό του υλικού της μήτρας. Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικής φύσεως ή όχι και μπορούν να συνδυαστούν με διαφόρων τύπων μήτρες. Το μέγεθος των κόκκων ποικίλει και μπορεί να είναι από μερικά nm μέχρι κάποια mm, για παράδειγμα μεγάλοι κόκκοι (με διάμετρο έως 300 μm) ή μικροί (με διάμετρο μικρότερη από  $10^{-8}$  m) σε μορφή διασποράς. Οι διάφοροι συνδυασμοί μήτρας/κόκκων που μπορούν να επιτευχθούν, αναφέρονται παρακάτω. Έτσι, από αυτήν την άποψη έχουμε τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς:

1) *Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος εντός μη μεταλλικής μήτρας.*

Το μη οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί το πιο κοινό παράδειγμα ενός τέτοιου υλικού. Το σκυρόδεμα αποτελείται από κόκκους άμμου και πέτρας δεμένους με ένα μείγμα τσιμέντου και νερού, το οποίο έχει αντιδράσει χημικά και έχει σκληρύνει. Η αντοχή του σκυροδέματος αποδίδεται στην ύπαρξη κόκκων πέτρας. Επίσης φλούδες μη μεταλλικών υλικών, όπως η μίκα ή το γυαλί, μπορούν να αποτελέσουν το κοκκώδες εγκλείσμα μιας γυάλινης ή πλαστικής μήτρας αντίστοιχα και με τον τρόπο αυτό να προκύψει, ένα σύνθετο υλικό αυτού του είδους.

2) *Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος εντός μη μεταλλικής μήτρας.*

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το εγκλείσμα χαλκού μέσα σε εποξειδική ρητίνη, που αυξάνει κατά πολύ την ηλεκτρική αγωγιμότητα αυτής. Επίσης είναι συνήθη τα σύνθετα υλικά με εγκλείσμα από το μέταλλο υπό μορφή φλούδας. Σκοπός της παρασκευής πολλών τέτοιων σύνθετων είναι η δημιουργία ενός υλικού με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, όριο

διαρροής), η αύξηση της ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας καθώς και η μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και της φθοράς της μήτρας.

### *3) Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος εντός μεταλλικής μήτρας.*

Τα υλικά αυτού του τύπου δεν είναι κράματα. Το μεταλλικό εγκλείσμα έχει μορφή κόκκων μέσα στη μήτρα και δεν είναι διαλυμένο μέσα σ' αυτήν, όπως είναι στα κράματα. Σαν παράδειγμα γι' αυτήν την κατηγορία μπορούμε να αναφέρουμε τους κόκκους μόλυβδου εντός κραμάτων χαλκού και χάλυβα, που σκοπό έχουν τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του κράματος στις εργαλειομηχανές. Επίσης, πολλά μέταλλα που έχουν πολύτιμες ιδιότητες αλλά είναι εύθραυστα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως είναι το χρώμιο, το βολφράμιο και το μολυβδαίνιο, μπορούν να αποτελέσουν το κοκκώδες εγκλείσμα άλλων μετάλλων τα οποία παρουσιάζουν όλκιμη συμπεριφορά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει είναι όλκιμο στη θερμοκρασία αυτή και διαθέτει παράλληλα και κάποιες από τις ιδιότητες του εύθραυστου εγκλείσματος.

### *4) Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος εντός μεταλλικής μήτρας.*

Μη μεταλλικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μορφή κοκκώδους εγκλείσματος μέσα σε μεταλλική μήτρα. Τα υλικά που προκύπτουν ονομάζονται κεραμομέταλλα. Τα κεραμομέταλλα μπορούν να είναι δυο ειδών ανάλογα με το εγκλείσμα. Το πρώτο είδος είναι κεραμομέταλλα με κόκκους οξειδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εργαλείων και σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπου η αντίσταση στη διάβρωση είναι σημαντική. Το δεύτερο είδος είναι τα κεραμομέταλλα με κόκκους καρβιδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα. Έτσι, το καρβίδιο του βολφραμίου μέσα σε μήτρα κοβαλτίου χρησιμοποιείται σε τμήματα μηχανών τα οποία απαιτούν μεγάλη αντοχή στην οξείδωση και στη διάβρωση, ενώ έχει συντελεστή θερμικής διαστολής παραπλήσιο με αυτόν του χάλυβα και έτσι είναι κατάλληλο για χρήσεις σε βαλβίδες κ.λ.π.. Επίσης το καρβίδιο του τιτανίου μέσα σε μήτρα νικελίου ή κοβαλτίου χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, όπως π.χ. σε διάφορα μέρη στροβιλομηχανών. Τέλος τα κεραμομέταλλα χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες σαν καύσιμα.

Τα κοκκώδη σύνθετα από πολυμερική μήτρα κατέχουν ένα σημαντικό μέρος των εφαρμογών που βρίσκουν γενικά τα κοκκώδη σύνθετα υλικά. Κάποιοι από τους λόγους για τους οποίους χρησιμοποιούμε ίνες και κόκκους από κάποιο υλικό σαν ενίσχυση (έγκλεισμα) είναι:

- ❖ Να αυξήσουν τη δυσκαμψία της μήτρας.
- ❖ Να ρυθμίσουν το συντελεστή θερμικής διαστολής του υλικού.
- ❖ Να βελτιώσουν τη θερμική αντίσταση.
- ❖ Να μειώσουν τα φαινόμενα ερπυσμού.
- ❖ Να αυξήσουν την αντοχή του πολυμερούς ή άλλης μήτρας.
- ❖ Να ρυθμίσουν τη διαπερατότητα σε υγρά και αέρια.
- ❖ Να βελτιώσουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες.

- ❖ Να ρυθμίσουν τις ρεολογικές ιδιότητες.
- ❖ Να μειώσουν το κόστος του υλικού.

### 1.2.3 Στρωματικά σύνθετα υλικά (Laminated composites)

Τα πολύστρωτα ή στρωματικά σύνθετα υλικά είναι μια κατηγορία σύνθετων υλικών στην οποία τα υλικά της μήτρας και της ενίσχυσης είναι υπό τη μορφή στρώσεων και φύλλων. Διάφορα υλικά μπορούν να σχεδιαστούν και να αποτελέσουν τα φύλλα που συνθέτουν τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα αυτού του τύπου μπορεί να έχουν πολύ καλές ιδιότητες, όπως δυσκαμψία, αντοχή, αντίσταση στη διάβρωση, στη φθορά και ακουστική, θερμική μόνωση κ.α.

Οι επιμέρους στρώσεις αποτελούνται από υψηλές τιμές μέτρου ελαστικότητας και ίνες υψηλής αντοχής σε ένα πολυμερές, μεταλλικό ή κεραμικό συνδετικό υλικό. Τυπικές ίνες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν γραφίτη, γυαλί, βόριο, και καρβίδιο του πυριτίου, και μερικά συνδετικά υλικά είναι εποξειδικά, πολυιμίδες, αλουμίνιο, τιτάνιο και αλουμίνα.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στρώσεις διαφορετικών υλικών, με αποτέλεσμα ένα υβριδικό έλασμα. Οι επιμέρους στρώσεις γενικά είναι ορθότροπες (δηλαδή, με κύριες ιδιότητες σε ορθογώνιες κατευθύνσεις) ή εγκάρσια ισότροπες (με ισότροπες ιδιότητες στο εγκάρσιο επίπεδο) με το έλασμα, στη συνέχεια παρουσιάζουν ανισότροπες (με μεταβλητή κατεύθυνση των κύριων ιδιοτήτων), ορθότροπες, ή ημι-ισότροπες ιδιότητες. Ημι-ισοτροπικά ελάσματα εμφανίζουν ισότροπη (δηλαδή, ανεξάρτητη από την κατεύθυνση) απόκριση εντός του επιπέδου αλλά δεν περιορίζονται σε ισοτροπική (καμπτική) απόκριση εκτός του επιπέδου. Ανάλογα με τη σειρά στοίβαξης των επιμέρους στρωμάτων, το έλασμα μπορεί να εμφανίζει σύζευξη μεταξύ της εντός και της εκτός του επιπέδου απόκρισης. Ένα παράδειγμα σύζευξης κάμψης-έκτασης είναι η εμφάνιση καμπυλότητας που αναπτύσσεται ως αποτέλεσμα της φορτίσεως εντός του επιπέδου.

Τα κυριότερα είδη αυτής της κατηγορίας είναι τα διμέταλλα, τα επιμεταλλωμένα μέταλλα, η ύαλος ασφαλείας και τα υλικά με επίστρωση πλαστικού. Τα διμέταλλα είναι συνδεδεμένα φύλλα δυο διαφορετικών μετάλλων με διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής. Η διαφορά των συντελεστών θερμικής διαστολής τα καθιστούν ικανά να κάμπτονται όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία και χρησιμοποιούνται ως διακόπτες ή σε συσκευές μέτρησης της θερμοκρασίας κ.α.

### 1.2.4 Μήτρες

Στα σύνθετα υλικά ο ρόλος της μήτρας είναι καθοριστικός γιατί επιτελεί μια σειρά από πολύ σημαντικές λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα, προστατεύει την επιφάνεια της ενίσχυσης από το περιβάλλον και από άλλους παράγοντες, όπως η υγρασία και η

θερμότητα, αποτρέποντας ενδεχόμενη χημική προσβολή. Στην περίπτωση όπου η μήτρα είναι πιο όλκιμη από την ενίσχυση, μπορεί να προστατεύσει το υλικό από ενδεχόμενη θραύση. Επιπλέον, διατηρεί τη συνοχή του συνθέτου μιας και συγκρατεί τις ενισχύσεις. Το συνδετικό υλικό δηλαδή 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 φύση της μήτρας είναι εκείνη που καθορίζει τη μέθοδο κατασκευής του σύνθετου. 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 μήτρα και ενίσχυση πρέπει να έχουν καλή φυσικοχημική πρόσφυση μεταξύ τους και να μη λαμβάνουν χώρα μεταξύ τους χημικές και άλλες αλληλεπιδράσεις. Όταν η πρόσφυση της ενίσχυσης και της μήτρας είναι καλή τότε και η λειτουργία του σύνθετου είναι καλή. Επίσης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι ιδιότητες του υλικού της μήτρας και εκείνης της ενίσχυσης που έχουν να κάνουν με το ιξώδες, τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ) κ.α.

Η επιλογή της μεθόδου παραγωγής πρέπει να γίνει στην αρχή της πορείας σχεδιασμού για διάφορους λόγους. Πρώτον, οι μέθοδοι παραγωγής επιβάλλουν 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 επιβάλλει 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.

### **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/ζελατινοποίησης (*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 τη στερεοποίηση κυμαίνεται μεταξύ 4% για *epoxy* έως 8% για πολυεστέρες. Εφόσον οι ίνες ενίσχυσης δε συρρικνώνονται, η προκαλούμενη εσωτερική τάση προκαλεί ρηγματώση, 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*).

**ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ (POLYESTER RESINS):** 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 στη 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 έναν 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 τη 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 βελτίωση 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 (*chlорendic*) 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 δε 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 (*chlорendic*) 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°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 υπεροξειδία 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 δε χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές εφαρμογές επειδή έχουν χαμηλή αντοχή σε διάβρωση και μικρή μηχανική αντοχή.

Οι ρητίνες με βάση το χλώριο (*chlорendic*) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες έως 176°C. Έχουν υψηλή αντοχή στα οξέα, σε υπεροξειδία 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 την τάξη I για ειδικές μορφές.

Τα *BPA fumarate* είναι καλύτερα των ισοφθαλικών (*isophthalic*) σε δυνατά οξέα και αλκαλικό περιβάλλον έως τους 121°C. Έχουν χαμηλή αντοχή σε φωτιά και μέτρια αντοχή σε διαλυτικά μέσα, σε υπεροξειδία 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).

**PHTINEΣ 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°C. Έχουν μεγάλη αντοχή σε οξέα, βάσεις, διαλυτικά μέσα, σε υπεροξειδία 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 πολυεστερικών (*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° και 150°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 πυράλλων, 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 στον τομέα των ηλεκτρικών λόγω της εξαιρετικής ηλεκτρικής μόνωσης που προσφέρουν. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν *potting* και συστατικό συμπίκνωσης, 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=τιμήματα 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 ρητινεδέσεως*), 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°C και 175°C. Για να αυξηθεί η σκληρότητα της ρητίνης και του σύνθετου υλικού, αυτό γίνεται με πρόσθετα στις βασικές εποξικές ρητίνες θερμικής διαμόρφωσης (*thermoset*), συμπεριλαμβανομένης και της προσθήκης θερμοπλαστικών (*thermoplastics*). Οι θερμοκρασίες λειτουργίας για τις σκληρυμένες ρητίνες είναι πάντα χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες μετάβασης του γυαλιού, που

είναι υψηλές για εύθραυστα εποξικά (*brittle epoxies*) (έως 247°C) και χαμηλές για σκληρυμένα εποξικά (*toughened epoxies*) (μεταξύ 76 και 185°C).

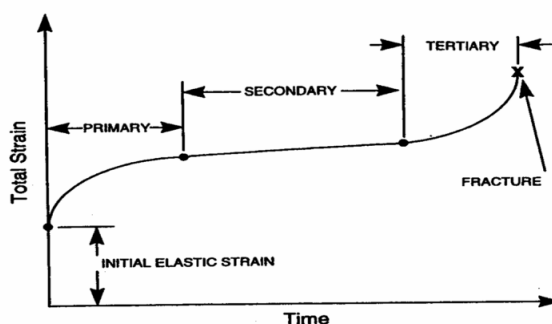
**ΡΗΤΙΝΕΣ ΦΑΙΝΟΛΗΣ (PHENOLIC):** οι ρητίνες αυτές έχουν μικρή πυραντοχή και μικρή παραγωγή καπνού, σε σύγκριση με άλλες ρητίνες μικρού κόστους. Επίσης, έχουν καλή σταθερότητα των διαστάσεων για αυξομείωση της θερμοκρασίας και αρκετά καλές συγκολλητικές ιδιότητες. Οι φαινόλες χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη, 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.

### **Θερμοπλαστικά Συνδεδετικά 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°C και μετατρέπονται σε άμορφα πολυμερή με υψηλή θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού. Μετά τη 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 ερυσμού

### 1.3 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.

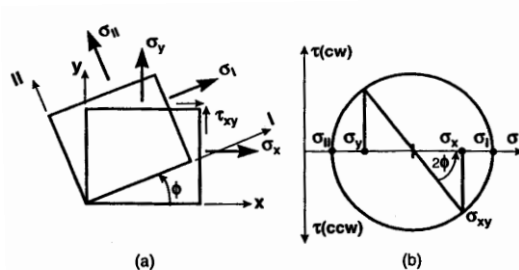
### 1.3.1 Σχεδιασμός με κύριες τάσεις

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 ( $\sigma_I, \sigma_{II}$ ), οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν από τον κύκλο του Mohr.

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

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

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



Σχ. 1.5: Κύκλος του Mohr

όπου  $\varphi$  η γωνία που φαίνεται στο Σχ. 1.5. Οι κύριοι άξονες (I,II) 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  $\sigma_I, \sigma_{II}$  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.

### 1.3.2 Περίληψη μεθόδων σχεδιασμού σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά σχηματίζονται από το συνδυασμό δύο ή περισσότερων 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 τη δυσκαμψία και αντοχή, ενώ το συνδετικό υλικό δεσμεύει τις ίνες και τις αναγκάζει να συνεργάζονται εξασφαλίζοντας τη μεταφορά φορτίων εντός του σύνθετου υλικού.



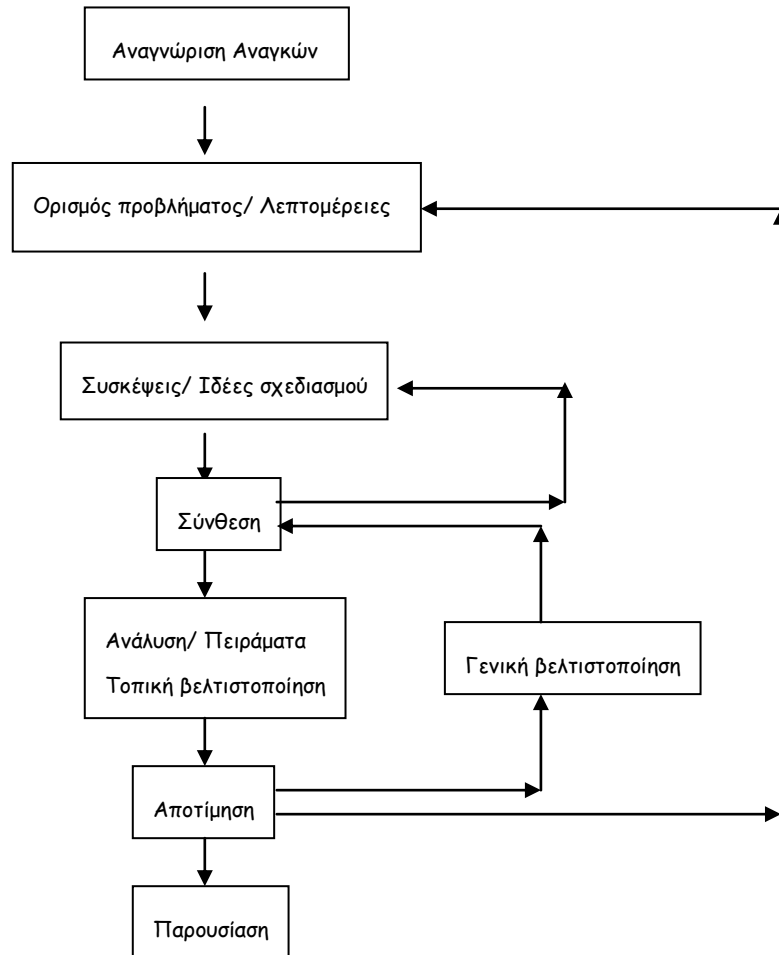
Ο σχεδιασμός ενός δομικού στοιχείου από σύνθετα υλικά περιλαμβάνει ταυτόχρονα το σχεδιασμό του υλικού και της κατασκευής. Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά (π.χ. χάλυβας), οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού μπορούν να σχεδιαστούν ταυτόχρονα με τις φάσεις κατασκευής. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών (π.χ. 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 στην 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 και 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 <sup>3</sup> ]	2.076	1.993	1.85	1.380	1.58	-	-	1.6	-
Διάμηκες Μέτρο Ελαστικότητας E <sub>1</sub> [GPa]	45	55	37.9	75.8	142	155.8	151	138	110
Εγκάρσιο Μέτρο Ελαστικότητας E <sub>2</sub> [GPa]	12	16	11.3	5.5	10.3	8.89	9.0	10.2	8.3
Μέτρο Διάτμησης G <sub>12</sub> [GPa]	5.5	7.6	3.3	2.07	7.2	5.14	5.6	5.7	-
Λόγος Poisson ν <sub>12</sub>	0.19	0.28	0.3	0.34	0.27	0.3	0.3	0.3	-
Διαμήκης Εφελκυστική Αντοχή F <sub>1t</sub> [MPa]	1020	1620	903	1380.0	1830	2698	-	2070	-
Εγκάρσια Εφελκυστική Αντοχή F <sub>2t</sub> [MPa]	40	40	40	34.5	57	-	-	86	37
Διατμητική Αντοχή F <sub>6</sub> [MPa]	60	60	40	44.1	71	-	-	186	63
Διαμήκης Θλιπτική Αντοχή F <sub>1c</sub> [MPa]	620	690	357	586.0	1096	1691	-	1360	1000
Εγκάρσια Θλιπτική Αντοχή F <sub>2c</sub> [MPa]	140	140	68	138.0	228	-	-	-	-
Εγκάρσια Διατμητική Αντοχή (F <sub>4</sub> ή F <sub>5</sub> ) [MPa]	60	80	76	48.69	-	-	-	150	-
Διαμήκης Εφελκυστική Παραμόρφωση ε <sub>1t</sub> [%]	2.3	2.9	2.4	1.8	1.29	1.68	1.64	1.45	-
Διαμήκης θερμ. CTE α <sub>1</sub> [10 <sup>-6</sup> /°C]	3.7	3.5	6.5	-2.0	-0.9	-	-	0.5	-
Εγκάρσια θερμ. CTE α <sub>2</sub> [10 <sup>-6</sup> /°C]	30	32	22	60	27	-	-	30	-
Διαμήκης υγρασιακή σταθερά β <sub>1</sub>	0	0	0	0.01	0	0.0095	-	-	-
Εγκάρσια υγρασιακή σταθερά β <sub>2</sub>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.321	-	-	-
Λόγος όγκου ινών V <sub>f</sub> [%]	60	60	50	60	60	-	57.3	61	-
Λόγος όγκου κενών V <sub>v</sub> [%]	-	-	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.

Όνομασία	Ιδιότητα	Προσανατολισμός 0°			Προσανατολισμός 45°		V <sub>f</sub> [%]	Πάχος Διαστρωμάτωσης [mm]	Ποκνότητα g/cm <sup>2</sup>
		Αντοχή F <sub>x</sub> [MPa]	Μέτρο Ελαστικότητας E <sub>x</sub> [MPa]	Αντοχή/ Ποκνότητα [Nm/g]	Αντοχή F <sub>45</sub> [MPa]	Μέτρο Ελαστικότητας E <sub>45</sub> [MPa]			
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

## Κεφάλαιο 2: Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες σύνθετων υλικών

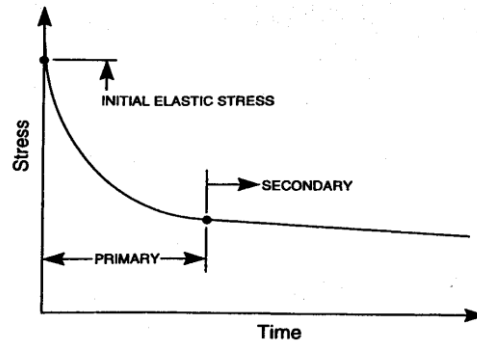
### 2.1 Φυσικές ιδιότητες

#### 2.1.1 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 ( $\sigma$ =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.

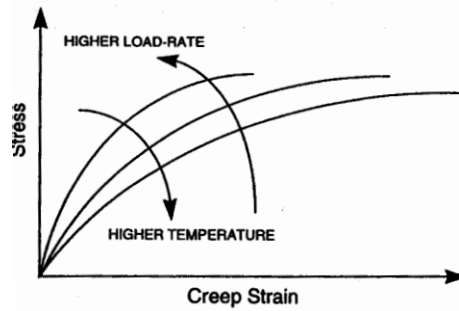
Ένα απλό τεστ χαλάρωσης περιλαμβάνει την εφαρμογή σταθερής εφελκυστικής παραμόρφωσης ( $\Delta L$ =σταθερό) και καταγραφή της τάσης ως προς το χρόνο (σχ.2.2). Το τελικό φορτίο είναι το απαραίτητο ελαστικό φορτίο που προκαλεί την αρχική ακαριαία παραμόρφωση. Στη συνέχεια, το δοκίμιο χαλαρώνει και το φορτίο 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 (*viscosplastic*) 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 τη μικρομηχανική θεώρηση.

Η θερμοκρασία έχει αξιοσημείωτη επίδραση στη συμπεριφορά των πολυμερών. Τα θερμικής διαμόρφωσης πολυμερή έχουν άμορφη εσωτερική δομή και χαρακτηρίζονται από 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

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

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 ( $T_0$ ) και τις συνθήκες ξηρασίας. Ο λόγος *retention ratio* κάποιων εποξικών ρητινών μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικούς τύπους όπως

$$g = [(T_{gw}-T_0)/(T_{gd}-T_0)]^{0,5} \quad (2.5)$$

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 αμφιέριστο 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°C/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.

### 2.1.2 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 διάρκειας 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 τη 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  $H_T$  (*total heat of reaction*) (ASTM D3418 και

D5028). Μετά είναι δυνατόν να μετρηθεί ο βαθμός στερεοποίησης  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) 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 τη 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.

### 2.1.3 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 τη 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°C, μερικοί εστέρες βινυλίου (*vinylesters*) έως 135°C, οι *BPA fumarate* και οι ρητίνες με βάση το χλώριο (*chlorendic*) έως τους 140°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 την πηγή θερμότητας, επιπλέον βελτιώνουν τις θερμοκρασίες του υλικού. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα κάποιων ινών είναι καταστροφική γιατί υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να έχουμε κοντά στην 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 [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	Transverse Thermal Expansion [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	Poisson Ratio	Thermal Conduct [W/m/ $^{\circ}\text{C}$ ]	Maximum Operating Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Resistivity [micro ohm-m]
Ίνες	Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	Εφελκυστική Αντοχή [GPa]	Θλιπτική Αντοχή [GPa]	Επιμήκυνση [%]	Πυκνότητα [gr/cc]	Διαμήκης Θερμική Διαστολή [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	Εγκάρσια Θερμική Διαστολή [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	Λόγος Poisson	Θερμική Διάδοση [W/m/ $^{\circ}\text{C}$ ]	Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας [ $^{\circ}\text{C}$ ]	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	-
<b>Carbon</b>											
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
<b>Kevlar29</b>	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	-
<b>Boron</b>	400	2.7-3.7	6.9	0.79	2.57	4.5	0.2	0.2	38	315	-
<b>SCS-6</b>	427	2.4-4	-	0.6	3	4-4.8	-	0.2	10	-	-
<b>Nextel</b>	260	2.1	-	-	3.4	6	-	-	-	1200	-

**Πιν. 2.2 :** Υπολογισμός απομείωσης της αντοχής των ινών.

<b>Fiber/ Ίνες</b>	<b>Strength reduction / Μείωση Αντοχής (%)</b>
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).

<b>Denomination / Ονοματολογία</b>	<b>Chopped Strand Mat g/m<sup>2</sup></b>	<b>0/90 (balanced) g/m<sup>2</sup></b>	<b>±45 (balanced) g/m<sup>2</sup></b>	<b>0 (warp) g/m<sup>2</sup></b>	<b>90 (weft) g/m<sup>2</sup></b>
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 [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	Heat Deflection Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Poisson Ratio	T <sub>g</sub> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Density [gr/cc]
Θερμικής Διαμόρφωσης	Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	Εφελκυστική Αντοχή [MPa]	Θλιπτική Αντοχή [MPa]	Διατμητική Τάση [MPa]	Επιμήκυνση Εφελκυσμού [%]	Μέτρο Ακαμψίας σε κάμψη [GPa]	Αντοχή σε κάμψη [GPa]	Θερμική Διαστολή [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	Θερμοκρασία Διόγκωσης H.D.T. [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Λόγος Poisson	T <sub>g</sub> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	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 <sub>o</sub> C	3.12	75.8	-	-	4	-	-	54	-	0.38	185	1.2
9310/9360@149 <sub>o</sub> C	1.4	26.2	-	-	5.2	-	-	-	-	-	185	1.2
9420/9470(A)@23 <sub>o</sub> C	2.66	57.2	-	-	3.1	-	-	-	-	-	195	1.162
9420/9470(B)@23 <sub>o</sub> C	2.83	77.2	-	-	5.2	-	-	-	-	-	155	1.158
HPT1072/1062-M@23 <sub>o</sub> C	3.383	-	-	-	-	3.383	131	-	-	-	239	-
BISMALEIMIDE												
796/TM-123@24 <sub>o</sub> C	3.582	-	-	-	-	3.582	132	-	-	-	260	-
796/TM-123@249 <sub>o</sub> C	-	-	-	-	-	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 [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	T <sub>g</sub> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	T <sub>m</sub> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Process Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Heat Deflection Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Fracture Toughness G <sub>IC</sub> [KJ/m <sup>2</sup> ]	Density [gr/cc]
Θερμοπλαστικά	Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	Εφελκυστική Αντοχή [MPa]	Επιμήκυνση κατά τον Εφελκυσμό [%]	Λόγος Poisson	Θερμική Διαστολή [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	T <sub>g</sub> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	T <sub>m</sub> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Θερμοκρασία κατά τη Διαδικασία [ $^{\circ}\text{C}$ ]	H.D.T. [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Σκληρότητα κατά τη θραύση G <sub>IC</sub> [KJ/m <sup>2</sup> ]	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

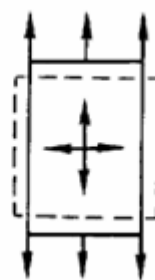
## 2.2 Μηχανικές ιδιότητες πολύστρωτων

### 2.2.1 Μηχανικές ιδιότητες

Τα κατασκευαστικά υλικά χαρακτηρίζονται από τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες ποσοτικοποιούν τη συμπεριφορά τους, σε συγκεκριμένες φορτίσεις. Οι ιδιότητες αυτές είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young  $\{E\}$ , το οποίο σχετίζει τις παραμορφώσεις που παραλαμβάνει ένα υλικό σε σχέση με την κατακόρυφη τάση που δέχεται, ο λόγος Poisson  $\{v\}$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των παραμορφώσεων που λαμβάνει ένα υλικό σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, και το μέτρο διάτμησης  $\{G\}$ , το οποίο δείχνει τις παραμορφώσεις σε σχέση με τη διατμητική τάση που δέχεται ένα υλικό.

Συνήθη κατασκευαστικά υλικά, όπως τα μέταλλα, είναι ιστροπικά, δηλαδή οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση επιβολής του φορτίου. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι από όποια κατεύθυνση κι αν επιβληθεί φορτίο, η απόκριση του υλικού θα είναι ίδια σε όλες τις περιοχές. Η μηχανική συμπεριφορά των ιστροπικών υλικών μπορεί να χαρακτηριστεί από 2 μεγέθη, το μέτρο ελαστικότητας  $E$  και το λόγο Poisson  $v$ . Το μέτρο διάτμησης ιστροπικών υλικών εξαρτάται από τα άλλα δύο μεγέθη.

Τα σύνθετα πολύστρωτα είναι συχνά ορθοτροπικά, δηλαδή έχουν τουλάχιστον 2 επίπεδα συμμετρίας στα οποία οι ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Μια εφαρμοζόμενη τάση προκαλεί διαφορετική παραμόρφωση στη διεύθυνση εφαρμογής της και στην κάθετη σ' αυτήν διεύθυνση, ενώ το μέτρο διάτμησης είναι ανεξάρτητο των μεγεθών  $E$  και  $v$ . Για το χαρακτηρισμό των ορθοτροπικών υλικών απαιτούνται 9 μεγέθη, 3 για κάθε διεύθυνση:  $E_{xy}$ ,  $E_{yz}$ ,  $E_{xz}$ ,  $v_{xy}$ ,  $v_{yz}$ ,  $v_{xz}$ ,  $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ . Στα ορθοτροπικά υλικά δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ διατμητικών τάσεων – ορθών παραμορφώσεων ( $\tau - \epsilon$ ), ορθών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων ( $\sigma - \gamma$ ), καθώς και διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων σε διαφορετικά επίπεδα. Στο παρακάτω Σχήμα παρουσιάζεται η συμπεριφορά ενός ιστροπικού (Σχήμα α) και ενός ορθοτροπικού (Σχήμα β) υλικού, σε ορθή τάση και σε διάτμηση.



(α) Ιστροπικό

(β) Ορθοτροπικό

*Συμπεριφορά σε ορθή τάση και σε διάτμηση ιστροπικών και ορθοτροπικών υλικών*



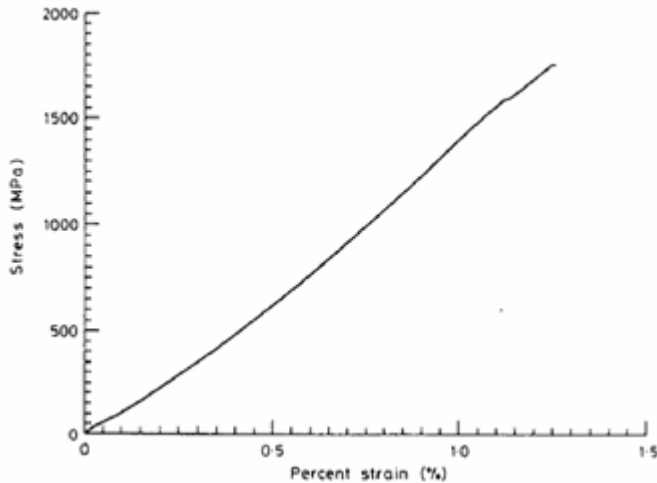
Οι σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά είναι γραμμικές, και ακολουθούν το νόμο του Hooke, ο οποίος στα ομογενή ισότροπα υλικά ορίζει ότι η σχέση μεταξύ μιας επιβαλλόμενης τάσης  $\sigma$  και της παραμόρφωσης  $\epsilon$  που προκαλείται είναι :  $\sigma = E \cdot \epsilon$ . Στα ορθοτροπικά σύνθετα υλικά οι σχέσεις μεταξύ των 3 ορθών και 3 διατμητικών τάσεων, και των αντίστοιχων παραμορφώσεων σε κάθε επίπεδο ορίζονται από το μητρώο δυσκαμψίας  $C_{ij}$ .

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται ευρύτερα το μητρώο ενδοτικότητας,  $[S_{ij}]$ , το οποίο είναι το αντίστροφο του μητρώου δυσκαμψίας ( $[S_{ij}] = [C_{ij}]^{-1}$ ).

Η ευκολία χρήσης του μητρώου ενδοτικότητας  $[S_{ij}]$  συνίσταται στο ότι τα στοιχεία του ορίζονται συναρτήσει των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού:

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{1}{E_1} & , & & S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} & , & & S_{13} &= -\frac{\nu_{13}}{E_1} \\
 S_{21} &= -\frac{\nu_{21}}{E_2} & , & & S_{22} &= \frac{1}{E_2} & , & & S_{32} &= -\frac{\nu_{23}}{E_2} \\
 S_{13} &= -\frac{\nu_{31}}{E_3} & , & & S_{23} &= -\frac{\nu_{32}}{E_3} & , & & S_{33} &= \frac{1}{E_3} \\
 S_{44} &= \frac{1}{G_{23}} & , & & S_{55} &= \frac{1}{G_{13}} & , & & S_{66} &= \frac{1}{G_{12}}
 \end{aligned}$$

Σημειώνεται επίσης ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μόνο γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι σε κατάσταση φόρτισης, οι παραμορφώσεις αυξάνονται ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση, με σταθερό ρυθμό, μέχρι να επέλθει τελικά η θραύση. Η συμπεριφορά αυτή κατατάσσει τα σύνθετα υλικά ως ψαθυρά. Στο Σχήμα απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων σύνθετου υλικού, όπου φαίνεται η γραμμική ελαστική συμπεριφορά τους.



Τυπική καμπύλη – τάσεων παραμορφώσεων μονοαξονικού σύνθετου υλικού

### 2.2.2 Αστοχίες πολύστρωτων

Οι αστοχίες στα σύνθετα υλικά έχουν σχέση είτε με την αντοχή, είτε με τη δυσκαμψία. Οι αστοχίες που οφείλονται στην αντοχή παρουσιάζονται όταν κάποια τάση υπερβεί την ικανότητα του πολύστρωτου να φέρει φορτία, ενώ οι αστοχίες που οφείλονται στη δυσκαμψία εμφανίζονται όταν οι παραμορφώσεις υπερβούν τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια του πολύστρωτου. Σε κάθε περίπτωση, λόγω της ορθοτροπικότητας των πολύστρωτων σύνθετων υλικών, η εκτίμηση της αντοχής τους είναι πιο πολύπλοκη, σε σχέση με τα ισότροπα υλικά. Η πιο σημαντική δυσκολία οφείλεται στο γεγονός ότι οι αντοχές των πολύστρωτων, όπως και οι ελαστικές τους σταθερές, μεταβάλλονται στις διάφορες δευθύνσεις. Επομένως, σε ένα ορθοτροπικό υλικό, μπορεί να μετρηθεί άπειρος αριθμός αντοχών, ακόμη και με τη διεξαγωγή μιας μονοαξονικής δοκιμής, ανάλογα με τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Για σχεδιαστικούς λόγους ο αριθμός των αντοχών περιορίζεται σε 5, στις κύριες διευθύνσεις του υλικού. Τελικά οι αντοχές που χρησιμοποιούνται είναι:

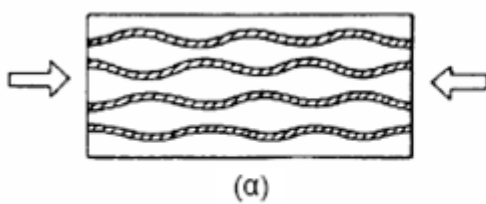
Εφελκυσμός στη διεύθυνση 1	$X_t$
Θλίψη στη διεύθυνση 1	$X_c$
Εφελκυσμός στη διεύθυνση 2	$Y_t$
Θλίψη στη διεύθυνση 2	$Y_c$
Διάτμηση στο επίπεδο 1-2	$S$

### 2.2.3 Τρόποι και μορφές αστοχίας

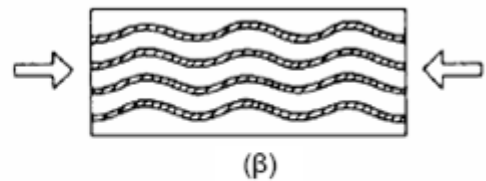
Εξετάζεται ιδιαίτερα η αστοχία πολύστρωτου σε θλίψη. Η αστοχία μιας στρώσης υπό την επίδραση θλιπτικών φορτίων παράλληλων στη διεύθυνση των ινών σχετίζεται με το μικροσκοπικό λυγισμό των μεμονωμένων ινών, οι οποίες λειτουργούν σα δοκοί – κολώνες σε ελαστική έδραση που παρέχεται από τη ρητίνη που τις περιβάλλει. Ο

λυγισμός μπορεί να είναι τύπου «έκτασης» (Σχήμα α, β), ο οποίος εμφανίζεται μόνο σε στρώσεις με πολύ μικρό όγκο ινών, ή τύπου «διάτμησης» (Σχήμα γ), ο οποίος οδηγεί στη δημιουργία έκκεντρων ζωνών. Οι ζώνες αυτές παρατηρούνται πολύ συχνά κατά την αστοχία πολύστρωτων σε θλίψη. Σε σύνθετα υλικά που περιέχουν ίνες υψηλής δυσκαμψίας, μπορεί να προηγηθεί του λυγισμού των ινών αστοχία της μήτρας σε διάτμηση σε επίπεδο  $45^\circ$  (Σχήμα δ). Παρόμοια μορφή κατάρρευσης προκαλείται και από θλιπτικά φορτία κάθετα στις ίνες, αστοχία που περιλαμβάνει τη θραύση πολύ λίγων ή καθόλου ινών.

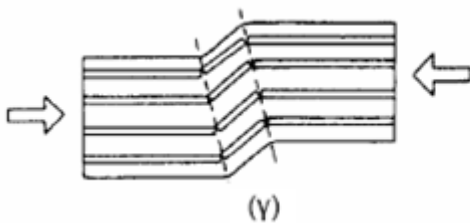
Η αστοχία σε θλίψη των πολύστρωτων από ίνες και ρητίνη επηρεάζεται πολύ από τις διαφόρων ειδών ατέλειες, όπως η ατελής ευθυγράμμιση των ινών, η μη ικανοποιητική γειννίαση των ινών, ατελείς δεσμοί ινών – ρητίνης και τα κενά, ιδίως όταν αυτά εμφανίζονται στην κοινή επιφάνεια ίνας- ρητίνης.



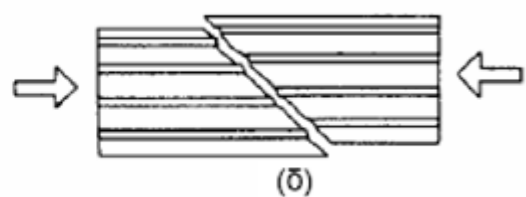
(α) : Λυγισμός ινών εκτός φάσης



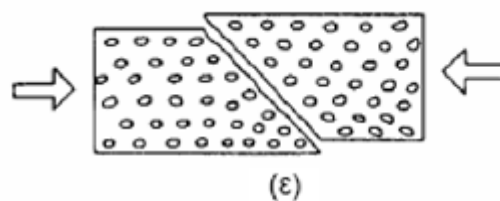
(β) : Λυγισμός ινών σε φάση



(γ): Λυγισμός ινών – τύπος «διάτμησης»



(δ) : Διατμητική αστοχία σε επίπεδο  $45^\circ$



(ε) : Διατμητική αστοχία σε εγκάρσια θλίψη

*Τρόποι αστοχίας σε θλίψη μιας μονοαξονικής στρώσης*

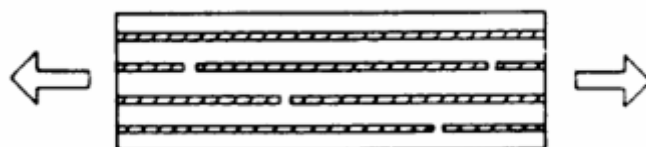
Η αστοχία ενός πολύστρωτου σε εφελκυσμό, με φορτίο παράλληλο στη διεύθυνση των ινών είναι πολύπλοκη διαδικασία. Στα τυπικά σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού και πολυεστερική ρητίνη, η μέγιστη παραμόρφωση των ινών είναι μεγαλύτερη από

εκείνη της ρητίνης ( $\epsilon_f > \epsilon_m$ ). Τότε επέρχεται πρώτα αστοχία της ρητίνης και το φορτίο μεταβιβάζεται στις ίνες, οπότε δεν επηρεάζεται σημαντικά η αντοχή της στρώσης (Σχήμα α). Στα σύνθετα με πολυεστερική ή εποξική ρητίνη και ίνες άνθρακα, η θραύση των ινών προηγείται της θραύσης της ρητίνης. Όταν θραύονται οι ίνες, με την προϋπόθεση ότι ο δεσμός ίνας – ρητίνης είναι καλός, μεταφέρεται φορτίο με διάτμηση από τις σπασμένες ίνες μέσω της ρητίνης στις παρακείμενες άθικτες ίνες (Σχήμα β). Έτσι, οι σπασμένες ίνες ανακτούν την ικανότητα να φέρουν φορτία σε μια απόσταση από τη θραύση ίση περίπου με 10 ως 100 φορές τη διάμετρο της ίνας. Η θραύση της στρώσης επέρχεται όταν αθροίζονται πολλές θραύσεις ινών κοντά στην ίδια εγκάρσια διατομή, ικανές να υπερνικήσουν την ικανότητα αυτή.

Η αστοχία μιας μονοαξονικής στρώσης σε εφελκυστικό φορτίο κάθετο στη διεύθυνση των ινών εμφανίζεται με τη μορφή ρηγμάτωσης της ρητίνης και αποχωρισμού του δεσμού ίνας – ρητίνης.



Σχήμα α: Ρηγμάτωση ρητίνης πριν τη θραύση των ινών



Σχήμα β: Θραύση πρώτα των ινών

#### 2.2.4 Κριτήρια αστοχίας

Για τον έλεγχο της αντοχής ενός πολύστρωτου, αναπτύχθηκαν διάφορα κριτήρια αστοχίας, που εφαρμόζονται σε ορθοτροπικά υλικά. Αρκετά από αυτά βασίστηκαν σε κριτήρια αστοχίας ορθοτροπικών υλικών, ενώ άλλα μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε συγκεκριμένα σύνθετα υλικά. Για τα σύνθετα υλικά πολύ συχνά χρησιμοποιούνται τα κριτήρια μέγιστης τάσης, μέγιστης παραμόρφωσης, το κριτήριο Tsai – Hill και το κριτήριο Tsai – Wu.

##### ➤ Κριτήριο Μέγιστης Τάσης:

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, εμφανίζεται αστοχία όταν οποιαδήποτε από τις τάσεις στις κύριες διευθύνσεις υπερβεί την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή. Οπότε η αστοχία επέρχεται όταν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

Εφελκυσμός

Θλίψη

Διάτμηση

$$|\tau_{12}| < S$$

$$\sigma_1 < X_t$$

$$\sigma_2 < Y_t$$

$$\sigma_1 < X_c$$

$$\sigma_2 < Y_c$$

όπου  $\sigma_1, \sigma_2$  οι τάσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού, δηλαδή  $\sigma_1$  η τάση παράλληλα στις ίνες,  $\sigma_2$  η τάση σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες.

➤ Κριτήριο Μέγιστης Παραμόρφωσης:

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό παρουσιάζεται αστοχία όταν οποιαδήποτε από τις παραμορφώσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού υπερβεί την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή. Οπότε η αστοχία επέρχεται όταν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

Εφελκυσμός

$$\varepsilon_1 < X_{et}$$

$$\varepsilon_2 < Y_{et}$$

Θλίψη

$$\varepsilon_1 < X_{ec}$$

$$\varepsilon_2 < Y_{ec}$$

Διάτμηση

$$|\gamma_{12}| < S_e$$

όπου κι εδώ οι δείκτες 1 και 2 δείχνουν διεύθυνση παράλληλη ή κάθετη στη διεύθυνση των ινών, ενώ αντίστοιχα  $X_{et}$ ,  $X_{ec}$  είναι οι μέγιστες επιτρεπόμενες εφελκυστικές ή θλιπτικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση 1,  $Y_{et}$ ,  $Y_{ec}$  είναι οι μέγιστες επιτρεπόμενες εφελκυστικές ή θλιπτικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση 2 και  $S$  η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση.

Λόγω της γραμμικότητας στην ελαστική συμπεριφορά των σύνθετων, τα κριτήρια μέγιστης τάσης και παραμόρφωσης είναι όμοια. Οι μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις συνδέονται μέσω των λόγων :

$$X_{et} = \frac{X_t}{E_1}$$

$$Y_{et} = \frac{Y_t}{E_2}$$

$$S_e = \frac{S}{G_{12}}$$

➤ Κριτήριο Tsai – Hill:

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, έχουμε έναρξη αστοχίας σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, όταν παραβιάζεται η ανισότητα:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{T_{12}^2}{S^2} < 1$$

όπου X,Y,S είναι οι αντοχές στις διευθύνσεις 1 και 2 και στο επίπεδο 1- 2, ανάλογα με το είδος των τάσεων. Όταν οι τάσεις είναι εφελκυστικές, χρησιμοποιούνται οι αντοχές σε εφελκυσμό ( $X_t, Y_t$ ), ενώ αν οι τάσεις είναι θλιπτικές χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχες αντοχές σε θλίψη  $X_c, Y_c$ .

➤ Κριτήριο Tsai – Wu:

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, σε μια ορθοτροπική στρώση σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, για να μη συμβαίνει αστοχία πρέπει:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 < 1$$

όπου:

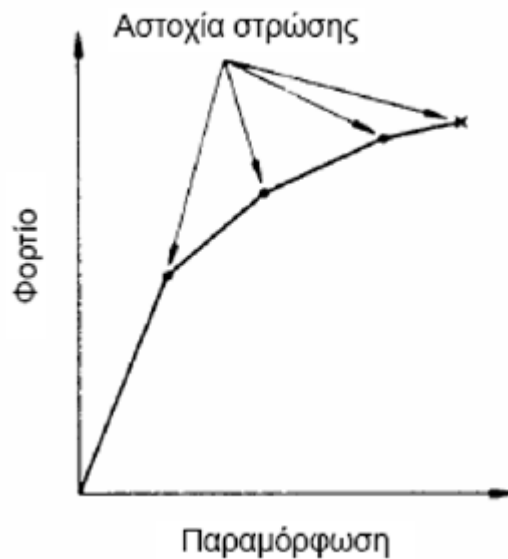
$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \quad F_{11} = -\frac{1}{X_t X_c} \quad F_{22} = -\frac{1}{Y_t Y_c}$$

$$F_6=0, \quad F_{66}=1/S^2, \quad F_{12}=1/S^2*[1 - (1/X_t+1/X_c+1/Y_t+1/Y_c)*\sigma + (1/X_t X_c+1/Y_t Y_c)*\sigma^2]$$

όπου  $\sigma$  είναι η αντοχή του υλικού σε διαξονικό εφελκυσμό, ενώ οι δείκτες στις αντοχές X,Y,S είναι οι ίδιοι όπως αναφέρονται και προηγουμένως.

Οι παραπάνω σχέσεις, καθώς και ο υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά αναφέρονται σε μία μόνο στρώση. Επομένως, με τις μεθόδους αυτές μπορεί να ελεγχθεί αν θα αστοχήσει κάποια από τις στρώσεις, ή, αντίστροφα, ποια στρώση θα αστοχήσει πρώτα σε συγκεκριμένο φορτίο. Οι στρώσεις αστοχούν με τη σειρά, ξεκινώντας από τις πιο ευαίσθητες, που είναι συνήθως εκείνες που έχουν ίνες διατεταγμένες κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου. Έτσι, η αστοχία πρώτης στρώσης μπορεί να συμβεί σε σχετικά μικρό φορτίο, χωρίς το πολύστρωτο να κινδυνεύει ολοκληρωτικά. Μερικές φορές, η επίδραση αστοχίας πρώτης στρώσης μπορεί να μην είναι εμφανής στη μακροσκοπική συμπεριφορά του πολύστρωτου. Καθώς όμως αστοχούν περισσότερες στρώσεις η μείωση της δυσκαμψίας γίνεται εμφανής, και η απόκριση του πολύστρωτου αποκλίνει από την αρχική συμπεριφορά.

Όμως, το πολύστρωτο είναι ικανό να φέρει ακόμη φορτία, τα οποία προκαλούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από εκείνες που θα προκαλούσαν πριν την αστοχία πρώτης στρώσης. Σταδιακά με αυτό τον τρόπο αστοχούν όλο και περισσότερες στρώσεις, με την αντίστοιχη μείωση δυσκαμψίας του πολύστρωτου. Αυτή η σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας έχει ως αποτέλεσμα η μορφή της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων να εμφανίζει «γόνατα», για κάθε σημείο όπου οι στρώσεις που έχουν αστοχήσει είναι τέτοιες, ώστε να μειώνεται σημαντικά η δυσκαμψία. Ανάμεσα όμως στα «γόνατα» - και κατά συνέπεια στις επιμέρους αστοχίες στρώσεων - το πολύστρωτο διατηρεί τη γραμμική ελαστική συμπεριφορά του.



Καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης πολύστρωτου

### 2.2.5 Λυγισμός

Ο λυγισμός είναι φαινόμενο που παρατηρείται σε κατασκευαστικά στοιχεία, συνήθως δοκούς, κολώνες ή κελύφη, όταν αυτά φορτίζονται θλιπτικά. Ορίζεται ως «αιφνίδια μείωση της ικανότητας του στοιχείου να φέρει θλιπτικά φορτία». Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι αν και οι επιβαλλόμενες θλιπτικές τάσεις δεν έχουν πάρει τις μέγιστες τιμές τους, το στοιχείο παραμορφώνεται, και δεν μπορεί να παραλάβει άλλα φορτία. Στην παρούσα εργασία ενδιαφέρει η απόκριση σε λυγισμό ενός ελάσματος, καθώς προσομοιάζει τη μορφή των πολύστρωτων πλακών.

Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει ένα έλασμα μέχρι να υποστεί λυγισμό ονομάζεται κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Για πλάκες από ομογενή ισότροπα υλικά, απλά εδρασμένες, υπό ομοαξονική ομοιόμορφη θλιπτική φόρτιση, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση του Euler:

$$\sigma_{\text{EL}} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad k = \left(\frac{m}{a/b} + \frac{a/b}{m}\right)^2$$

όπου

E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

$\nu$  ο λόγος Poisson

t το πάχος του ελασματος

a,b οι διαστάσεις των πλευρών του ελάσματος, με a την πλευρά παράλληλα και b την πλευρά κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης

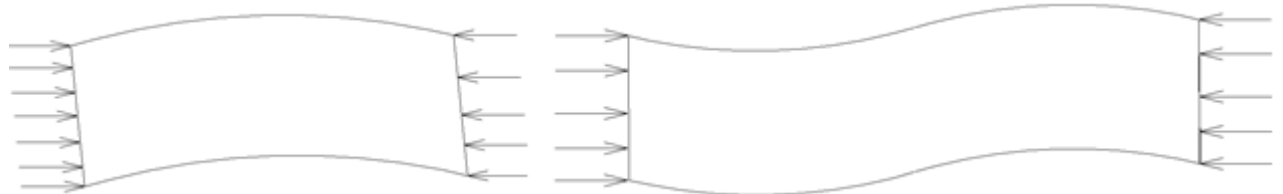
m η τιμή ιδιομορφής

Το βέλος κάμψης σε ένα έλασμα που βρίσκεται σε ισορροπία περιγράφεται

από τη σχέση:

$$w(x, y) = C \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot y}{b}\right) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right)$$

η τιμή m ονομάζεται ιδιοτιμή του λυγισμού. Στην πράξη, η ιδιοτιμή περιγράφει τον αριθμό ημικυμάτων που θα δημιουργηθούν με το λυγισμό, λόγω εφαρμογής θλιπτικού φορτίου.



Σχηματική αναπαράσταση ιδιομορφών λυγισμού πλάκας



### Κεφάλαιο 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 αυτή. Συχνά η διαδικασία παραγωγής είναι η τελική θεώρηση στο σχεδιασμό δομικών σύνθετων υλικών. Αυτό οφείλεται στο κόστος, τον όγκο παραγωγής, το ρυθμό παραγωγής και την επάρκεια της διαδικασίας στο να παράγει τον τύπο του δομικού στοιχείου που είναι επιθυμητό. Κάθε διαδικασία παραγωγής επιβάλλει 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 τη δόμηση. Λόγω αυτής της παραμέτρου, μπορούν να σχεδιαστούν κατασκευές υψηλών απαιτήσεων οι οποίες και επιβάλλουν στο 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 ρητινένεσεως (*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:

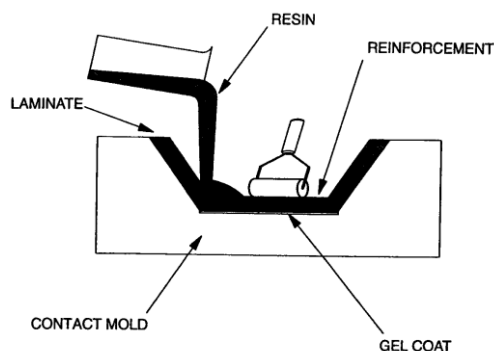
1. Τοποθέτηση των ινών στο εκμαγείο κατά τον επιθυμητό προσανατολισμό.
2. Εμποτισμό (*impregnation*) των ινών με ρητίνες
3. Στερεοποίηση (*consolidation*) των εμποτισμένων ινών και απομάκρυνση του περιττού όγκου ρητινών, του αέρα και λοιπών πτητικών ουσιών (*volatiles*)
4. Στερεοποίηση του πολυμερούς
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 στη 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 το 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 (καλούπιού) 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 τον κατάλληλο εξοπλισμό. Τελικά, το κόστος ανά τμήμα επηρεάζεται από την επιθυμητή ποιότητα λόγω της ανάγκης είτε ανειδίκευτων ή ειδικευμένων εργατών. Το κόστος ανά μονάδα 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 χρησιμοποιείται 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*).

<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μπορούν να παραχθούν μεγάλα τμήματα με πολύπλοκη γεωμετρία</li> <li>• Ελάχιστη επένδυση σε εξοπλισμό</li> <li>• Ελάχιστο κόστος των εκτελούμενων εργασιών</li> <li>• Περιεχόμενο κενών κάτω του 1%</li> <li>• Είναι πιθανή η κατασκευή «sandwich»</li> <li>• Μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν πρόσθετα και κατασκευαστικές ενισχύσεις</li> <li>• Μπορούν να κατασκευαστούν τμήματα που απαιτούν εξαιρετα τελειώματα</li> <li>• Δεν είναι απαραίτητοι κλίβανοι στερεοποίησης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μόνο μία επιφάνεια του καλουπιασμένου τμήματος είναι λεία</li> <li>• Η τελική ποιότητα εξαρτάται από την ικανότητα των εργατών</li> <li>• Απαιτείται κόπος ανά εργασία</li> <li>• Χαμηλός ρυθμός παραγωγής</li> <li>• Υψηλή έκλυση πτητικών ουσιών</li> <li>• Είναι δύσκολο να διατηρηθεί η ομοιομορφία του προϊόντος</li> <li>• Απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι στερεοποίησης σε θερμοκρασίες δωματίου</li> </ul>

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

<b>Εφαρμογές</b>	<b>Προϊόντα</b>
Ναυπηγική	Βάρκες, κελύφη σκαφών ( <i>boat hulls</i> ), αγωγοί ( <i>ducts</i> ), πισίνες, δεξαμενές, έπιπλα κλπ.
Αεροσκάφη	Μηχανοκίνητα ακροφύσια πυραύλων ( <i>rocket motor nozzles</i> ) και λοιπά τμήματα αεροσκαφών
Διάφορες κατασκευές	Φίλτρα κλιβάνων, στηρίγματα κατασκευών, επίπεδα και κυματοειδή φύλλα, αντιδιαβρωτική προστασία αγωγών ( <i>corrosion duct work</i> ), προστατευτικά καλύμματα ( <i>housings</i> ), 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 στη 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 πυκνότητά 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*).**

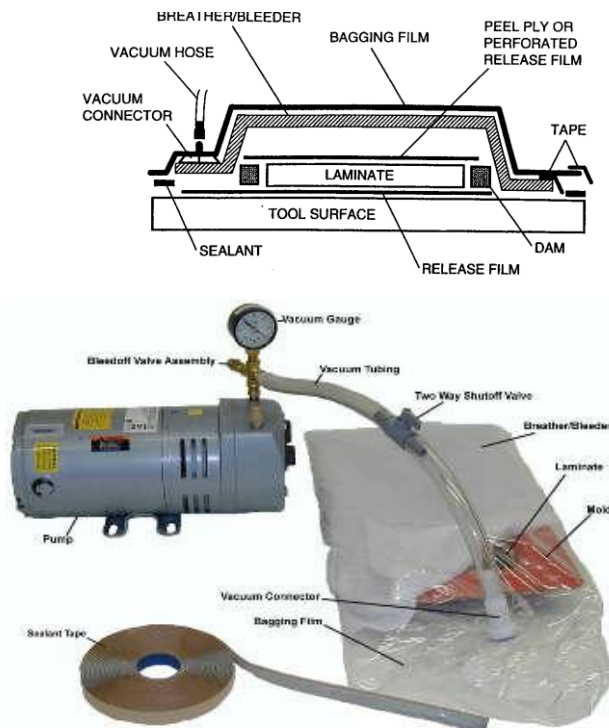
<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλοί λόγοι όγκου ινών</li> <li>• Ομοιόμορφη κατανομή ινών</li> <li>• Απλοποιημένη κατασκευή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απαιτείται κόπος ανά εργασία και είναι αργή διαδικασία</li> <li>• Πιο ακριβός εξοπλισμός στερεοποίησης</li> <li>• Αύξηση του κόστους για την κατασκευή των προκατασκευασμένων (<i>prepreg</i>)</li> </ul>

### **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) *vacuum bag* και γ) διαδικασία με κλίβανο (*autoclave processing*), με τις δύο τελευταίες να είναι οι πιο δημοφιλείς.

Τα περιβλήματα για τη μόρφωση *vacuum 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°C. Τα περισσότερα από τα θερμοπλαστικά (*thermoplastics*) λιώνουν σε ένα εύρος θερμοκρασιών 260-370°C σε σύγκριση με τους 120-180°C 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 μέσω 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.

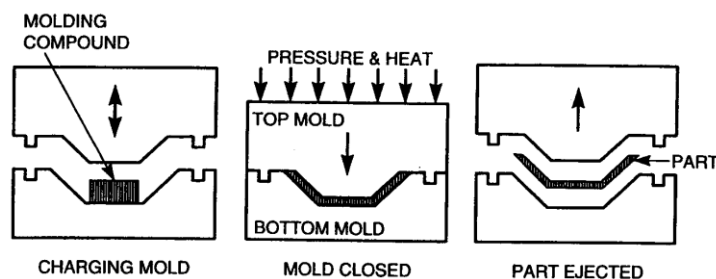
### 3.5 Εκμαγείο συμπίεσης – compression molding

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 kgf έως και πάνω από 75 kgf. 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*.

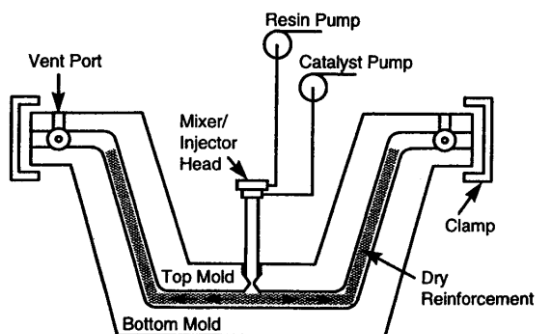
Το BMC (*Bulk Molding Compound*) είναι ένα μίγμα σαν ζύμη με λόγο όγκου ινών να κυμαίνεται από 20-50%. Ένας συνδυασμός υλικών πληρώσεως (ρόζοι ξύλου, οργανικά, κυτταρίνη, κλπ.) αναμιγνύονται με τη ρητίνη σε έναν αναμικτήρα με λεπίδες. Οι ενισχύσεις μπορούν να είναι από γυαλί, κυτταρίνη, βαμβάκι ή άλλα ινώδη υλικά. Η παρτίδα αυτή υλικών τοποθετείται στο καλούπι στους 150 έως 200°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°C και ασκείται πίεση περίπου 7-14MPa.

### **3.6 Καλούπι ρητινένεσεως - resin transfer molding (rtm)**

Η διαδικασία με το καλούπι ρητινένεσεως - 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 εισοδοί και εξοδοί 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 καλούπιου και η ρητίνη εισάγεται στο καλούπι επίσης με αναρρόφηση. Αφού εφαρμοστεί αναρρόφηση αντί πίεσης, το μισό μέρος του καλούπιου 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 καλούπιου 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 καλούπιου 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 ψεκάσμο 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 στη 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.

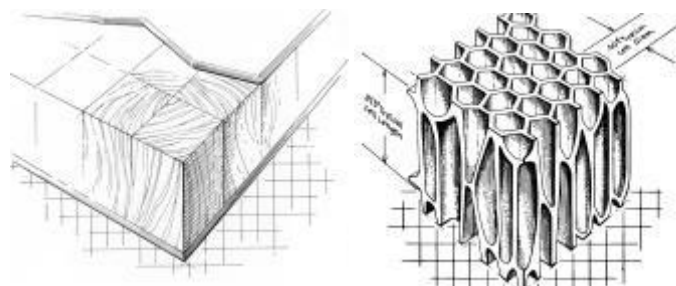
Οι φυσικές ιδιότητες των καλουπωμένων τμημάτων της *Resin Transfer Molding (RTM)* τείνουν να γίνουν πολύ σταθερές. Αυτό οφείλεται στο κόστος ενός σχετικά υψηλού συντελεστή απωλειών στην περίμετρο του τμήματος. Συνήθως οι γωνίες και οι ακμές απαιτείται να είναι πλούσιες σε ρητίνη καθιστώντας δύσκολη την 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  $\pm 0,2\text{mm}$ . 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 2-8 τμήματα/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

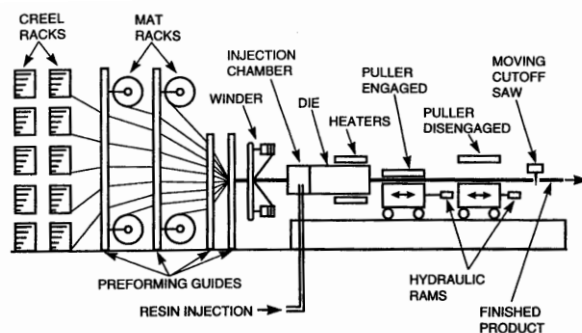


Το κόστος παραγωγής της *RTM* είναι μικρότερο από τη διαδικασία που χρησιμοποιεί τα *prepreg*, επειδή το κόστος των καθαρών υλικών (ινών και ρητινών) είναι σημαντικά μικρότερο. Σε κάποιες περιπτώσεις το κόστος των *RTM* έχει βρεθεί μικρότερο έως και 1/3 αυτού των διαδικασιών με *prepreg*, μέσω περιβλήματος (*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 οιαδήποτε 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 προσηματισμού. Τα *performing guides* θέτουν τις ίνες με κατάλληλη διάταξη μέσα στη διατομή (*cross-section*) του προϊόντος, όπως ορίζεται από το 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  $\pm \theta$ ) 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 θερμοαντήρες 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 χρωμιωμένες βάσεις της μήτρας, στο σχεδιασμό και τον 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 τη 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 γραμμική παραγωγή ενός πανέλου μπορεί να παράγει περίπου 20m<sup>2</sup>/min.

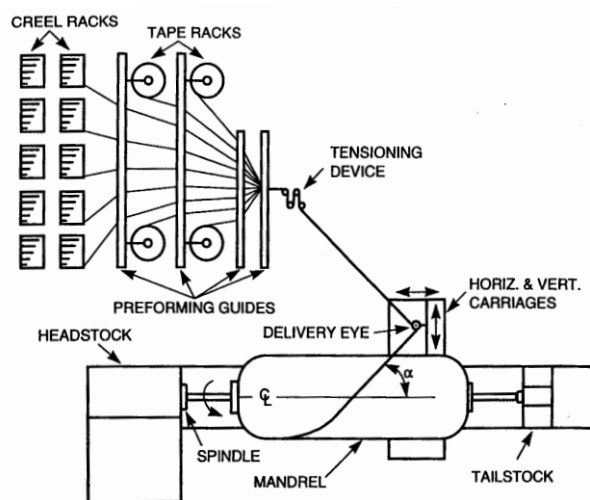
### 3.8 Διαδικασία περιέλιξης - filament winding

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°-90°, 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  $\pm\theta$ . 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 τη 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 δε 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 αφαιρεθεί 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 δε 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°C. 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 <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	Μέτρο Ελαστικότητας(GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Παραμορφ. Αστοχίας (%)
<b>Άνθρακα</b>					
Υψηλού E	1,90	380	0,35	2100	0,6
Υψηλής f <sub>t</sub>	1,80	230	0,35	2700	1,3
<b>Γυαλιού</b>					
Τύπου E	2,54	72-75	0,25	3500	4,8
Τύπου Z (ή AR)	2,27	70-76	0,25	2500-3500	3-4,6
Τύπου S2	2,44	85-88	0,25	4600	5
<b>Αραμιδίου</b>					
Kevlar 29	1,45	65	0,32	3500	4
Kevlar 49	1,44	1 25	0,32	3500	2,1
<b>Χάλυβας</b>	<b>7,86</b>	<b>200</b>	<b>0,28</b>	<b>400-1700</b>	<b>10</b>

**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
<b>Χάλυβας</b>	<b>200</b>	<b>10</b>

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

<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>CFRP</b>	<b>AFRP</b>	<b>GFRP</b>
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 δε 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 ινώδων 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 τοποθέτησεως 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 προϊόντος. Για τα περισσότερα κοινά υλικά το ποσοστό των αποβλήτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ποσοστό του τελικού προϊόντος και παρά τη δυνατότητα ανακυκλώσεως και χρησιμοποίησεως 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 τη δυσκολία ανακυκλώσεως των αποβλήτων τους, παρουσιάζουν πολύ μειωμένο ποσοστό αποβλήτων επειδή δύναται 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 τη δημιουργία αποβλήτων τα οποία έχουν τη δυνατότητα να φθάσουν μέχρι 600% (κατά βάρος) . Εν τούτοις, εάν 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.

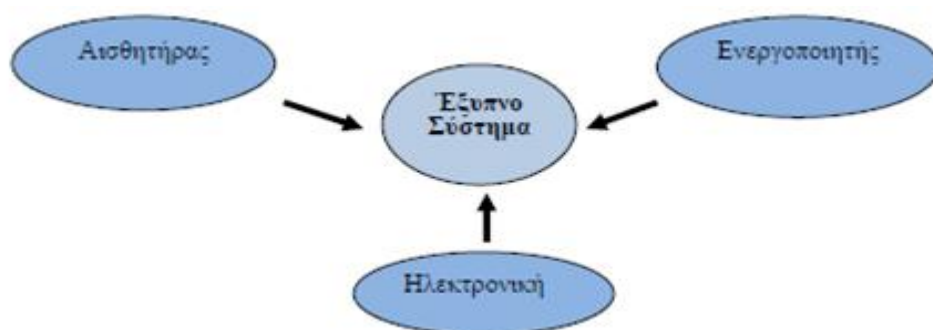
Συνοπτικά μπορεί να λεχθεί ότι ο λόγος κόστος/πυκνότητα πολλών κοινών υλικών δύναται σε πολλές περιπτώσεις να είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο των ινώδων



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.

## Κεφάλαιο 4: Εισαγωγή στα έξυπνα υλικά

Στις μέρες μας αναπτύχθηκε μία νέα κατηγορία υλικών τα λεγόμενα «έξυπνα», «λειτουργικά», «αυτοπροσαρμοζόμενα», «ευφυή» ή «σοφά» υλικά. Στα υλικά αυτά μεγαλύτερη σημασία έχουν οι λειτουργίες/ενέργειες που μπορούν να εκτελέσουν παρά οι ονομαστικές τιμές κάποιων φυσικών ιδιοτήτων ή χαρακτηριστικών τους (όπως το μέτρο ελαστικότητας, η ειδική αντίσταση κτλ). Ως ευφυή υλικά αναφέρονται συστήματα που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους (σχήμα, ιδιοσυχνότητα, συντελεστής απόσβεσης δονήσεων και άλλα) με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο, μέσω μιας διέγερσης. Τα «Έξυπνα Υλικά» ορίζονται σαν υλικά που διαμορφώνουν μέρος ενός έξυπνου δομικού συστήματος που έχει τη δυνατότητα να έχει την αίσθηση του περιβάλλοντα χώρου και τις επιδράσεις αυτού, και αν είναι πραγματικά έξυπνο το σύστημα, να αντιδρά σ' αυτόν τον εξωτερικό παράγοντα μέσω ενός μηχανισμού ελέγχου. Συχνά, η λειτουργία του αισθητήρα από μόνη της θεωρείται επαρκής για να κατασταθεί η «οξύνοια». Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν αισθητήρες και ενεργοποιητές, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο βρόχο ελέγχου.



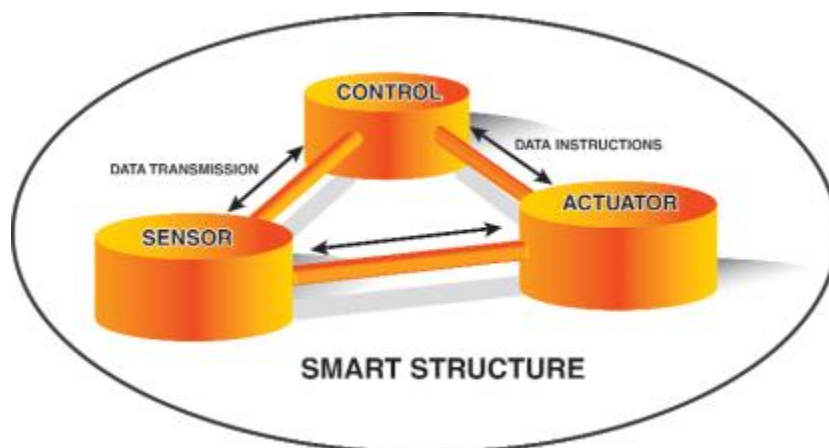
*Ένα έξυπνο σύστημα μπορεί να έχει αίσθηση και να ανταποκρίνεται επαρκώς στο περιβάλλον του*

Έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν «ευφυώς» συγκεκριμένες λειτουργίες, αποκρινόμενα σε εξωτερικές διεγέρσεις. Με τους αισθητήρες αισθάνονται αλλαγές στο εξωτερικό περιβάλλον (π.χ. επιβαλλόμενη τάση ή αλλαγή θερμοκρασίας) ή στη δομή τους (π.χ. ανάπτυξη ατελειών ή μεταβολή της κρυσταλλικής δομής) και αποκρίνονται σε αυτές με τους ενεργοποιητές, αλλάζοντας κάποια ιδιότητά τους προς ορισμένη κατεύθυνση (π.χ. δυσκαμψία, σχήμα, ικανότητα απόσβεσης).

Εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες των ευφυών υλικών μπορούν να σχεδιαστούν κατασκευές που να αξιοποιούνται στα λειτουργικά και δομικά τους όρια χωρίς τον κίνδυνο να τα ξεπεράσουν. Επιπλέον, θα πληροφορούν τους χρήστες τους για όλη την ιστορία λειτουργίας τους, όπως για τη δημιουργία αστοχιών, το βαθμό ανάπτυξής τους και τα σημεία που συμβαίνουν, ενώ ταυτόχρονα θα έχουν τη δυνατότητα να αντιδράσουν σε επικίνδυνες για αυτά συνθήκες, όπως υπερβολικές δονήσεις, ή να αυτοεπιδιορθωθούν. Ένα τέλειο ευφυές σύστημα είναι αυτό που η πηγή της

απαραίτητης ενέργειας (η κινούσα δύναμη) για να λάβει χώρα η αντίδραση στο εξωτερικό ερέθισμα είναι ενσωματωμένη στο ίδιο σύστημα και οι λειτουργίες του εκτελούνται από δομικά του στοιχεία. Μπορούμε να προσομοιάσουμε τα ευφυή συστήματα με βιολογικά. Οι αισθητήρες λειτουργούν σαν το νευρικό σύστημα, οι ενεργοποιητές σαν το μυϊκό και ο βρόγχος ελέγχου σαν τον εγκέφαλο ενός οργανισμού που ελέγχει το όλο σύστημα.

Στη βιβλιογραφία, συστήματα που είναι σε θέση να εκτελούν λειτουργίες αναφέρονται με διάφορους όρους όπως «έξυπνο», «ευφυές», «αυτοπροσαρμοζόμενο» και «σοφό». Γενικά αυτοπροσαρμοζόμενο αναφέρεται το σύστημα που αισθάνεται ερεθίσματα από το περιβάλλον του, έξυπνο αυτό που αντιδρά στα ερεθίσματα με συγκεκριμένο τρόπο, ευφυές αυτό που η απαραίτητη ενέργεια για να λάβει χώρα η αντίδραση στο εξωτερικό ερέθισμα είναι ενσωματωμένη στο σύνθετο και σοφό αυτό που μπορεί να με την πάροδο του χρόνου να αποφασίζει τις αντιδράσεις του.



Τα 5 βασικά συστατικά ενός έξυπνου υλικού.

Ο ορισμός των έξυπνων δομών ήταν ένα θέμα διαμάχης από το τέλος του 1970 ως τα τέλη του 1980. Για να καταλήξουμε σε συναίνεση για μια κυρίαρχη ορολογία, οργανώθηκε ένα ειδικό εργαστήριο από το Γραφείο Ερευνών του Αμερικανικού Στρατού το 1988, στο οποίο «αισθητήρες», «ενεργοποιητές», «μηχανισμός ελέγχου» και «έγκαιρη ανταπόκριση» αναγνωρίστηκαν ως τα τέσσερα επιλέξιμα χαρακτηριστικά του κάθε έξυπνου συστήματος ή δομής (Rogers, 1988). Σ' αυτό το εργαστήριο, εγκρίθηκε επισήμως ακολουθώντας τον ορισμό των έξυπνων συστημάτων / δομών (Ahmad, 1988).

Ένα σύστημα ή υλικό ορίζεται αυτό το οποίο έχει ενσωματωμένο ή ενδογενή αισθητήρα (-ες), ενεργοποιητή (-ες) και μηχανισμό (-ους) ελέγχου σύμφωνα με τα οποία είναι ικανό να **ανιχνεύει** ένα ερέθισμα, να **ανταποκρίνεται** σ' αυτό με ένα προκαθορισμένο τρόπο και βαθμό, σε **σύντομο / κατάλληλο** χρόνο, και να επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, μόλις το ερέθισμα απομακρύνεται». Σύμφωνα με τον Vardan (2000), το έξυπνο σύστημα αναφέρεται σε μία συσκευή η οποία μπορεί να ανιχνεύει τις αλλαγές στο περιβάλλον του και μπορεί να έχει μία βέλτιστη απόκριση

αλλάζοντας τις ιδιότητες του υλικού, τη γεωμετρία, τη μηχανική ή ηλεκτρομαγνητική απόκριση. Τόσο ο αισθητήρας όσο και οι λειτουργίες του ενεργοποιητή με κατάλληλη ανατροφοδότηση τους θα πρέπει να ενσωματωθούν κατάλληλα. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, εάν η απόκριση είναι πολύ αργή ή πολύ γρήγορη, το σύστημα θα μπορούσε να χάσει την εφαρμογή του ή μπορεί να είναι επικίνδυνη (Takagi, 1990).

Παλαιότερα, οι λέξεις έξυπνο, προσαρμοστικό και βιολογικό χρησιμοποιήθηκαν επίσης για να χαρακτηρίσουν έξυπνα συστήματα και υλικά. Για παράδειγμα, οι Crawley και de Luis (1987) όρισαν τις ευφυείς δομές ως τις δομές που κατέχουν σε μεγάλο βαθμό καταναμημένους ενεργοποιητές, αισθητήρες και δίκτυα επεξεργασίας. Ομοίως, ο καθηγητής H. Robertshaw προτίμησε τον όρο βιολογικά (Rogers, 1988), γεγονός που υποδηλώνει ομοιότητα με βιολογικές διεργασίες. Το ανθρώπινο χέρι, για παράδειγμα, είναι σαν έναν μεταβλητό άκαμπτο ενεργοποιητή με ένα νόμο ελέγχου (νοημοσύνη). Ωστόσο, πολλοί από τους συμμετέχοντες στο Συνέδριο του Γραφείου Ερευνών του Αμερικανικού Στρατού (π.χ. Rogers και άλλοι, 1988) προσπάθησαν να διαφοροποιήσουν τους όρους ευφύες, προσαρμοστικό και βιολογικό από τον όρο έξυπνο, τονίζοντας τις λεπτές διαφορές τους από τον όρο έξυπνο. Ο όρος νοημοσύνη, για παράδειγμα, συνδέεται με την αφηρημένη σκέψη και τη μάθηση, και μέχρι σήμερα δεν έχει εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε μορφή προσαρμοστικού και ανιχνευθέντος υλικού ή κατασκευής. Ωστόσο, πολλοί ερευνητές εξακολουθούν να χρησιμοποιούν τους όρους ευφύες και έξυπνο σχεδόν εναλλακτικά (π.χ. στο Συνέδριο ΗΠΑ-Ιαπωνίας: Takagi, Rogers, 1990), αν και τα προσαρμοστικά και τα βιολογικά έχουν γίνει λιγότερο δημοφιλή.

Η ιδέα των έξυπνων ή ευφύων δομών έχει υιοθετηθεί από την ίδια τη φύση, όπου όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί έχουν δυνατότητες ερεθίσματος-απόκρισης (Rogers, 1990). Ο στόχος της τρέχουσας έρευνας στο πεδίο των έξυπνων συστημάτων / δομών είναι να επιτρέψει σε μία τέτοια δομή ή σύστημα να μιμείται τους ζωντανούς οργανισμούς, οι οποίοι διαθέτουν ένα σύστημα διανεμημένων αισθητηρίων νευρώνων που τρέχει σε όλο το σώμα, επιτρέποντας στον εγκέφαλο να παρακολουθεί την κατάσταση των διαφόρων μερών του σώματος. Ωστόσο, τα έξυπνα συστήματα είναι πολύ κατώτερα από τα έμβια όντα, αφού το επίπεδο της νοημοσύνης τους είναι πολύ πρωτόγονο.

Σε συνδυασμό με τις έξυπνες ή ευφυείς κατασκευές, ο Rogers (1990) ορίσε τους παρακάτω πρόσθετους όρους, οι οποίοι στοχεύουν να ταξινομήσουν τις έξυπνες δομές περαιτέρω, με βάση το επίπεδο της πολυπλοκότητας. Η σχέση μεταξύ των τύπων των δομών αυτών εξηγείται σαφώς στο Σχήμα.

α) *Αισθητηριακές Δομές*: Οι δομές αυτές διαθέτουν αισθητήρες που επιτρέπουν τον προσδιορισμό ή την παρακολούθηση των καταστάσεων/χαρακτηριστικών του συστήματος.

(β) *Προσαρμοστικές Δομές*: Αυτές οι δομές διαθέτουν ενεργοποιητές που επιτρέπουν την τροποποίηση των καταστάσεων ή των χαρακτηριστικών του συστήματος με έναν ελεγχόμενο τρόπο.

(γ) *Ελεγχόμενες Δομές*: Αυτές προκύπτουν από τη διασταύρωση των αισθητηριακών και προσαρμοστικών δομών. Κατέχουν και αισθητήρες και ενεργοποιητές που ενσωματώνονται στην αρχιτεκτονική ανατροφοδότηση για σκοπούς ελέγχου των χαρακτηριστικών καταστάσεων του συστήματος.

(δ) *Ενεργητικές Δομές*: Αυτές οι δομές διαθέτουν και αισθητήρες και ενεργοποιητές που είναι ιδιαίτερα ενταγμένοι στην κατασκευή και εμφανίζουν δομική λειτουργικότητα εκτός από λειτουργικότητα ελέγχου.

(ε) *Ευφυείς Δομές*: Οι δομές αυτές είναι κατά βάση ενεργητικές δομές που έχουν υψηλό βαθμό ολοκληρωμένης λογικής ελέγχου και ηλεκτρονικά παρέχουν τα γνωστικά στοιχεία μιας κατανεμημένης ή ιεραρχικής αρχιτεκτονικής ελέγχου. Οι ευφυείς δομές δημιουργούνται γενικά μέσω σύνθεσης, όχι μόνο συνδυάζοντας αισθητήρες, επεξεργαστές, και ενεργοποιητές αλλά επίσης και μέσω της ενοποίησης τους με συμβατικά δομικά υλικά όπως είναι ο χάλυβας, το σκυρόδεμα, ή τα σύνθετα υλικά.

#### **4.1 Συστήματα ταξινόμησης για προηγμένα και έξυπνα υλικά**

Η απαραίτητη πληροφόρηση για την εφαρμογή των νέων υλικών μπορεί να είναι διαθέσιμη, αλλά δεν υπάρχει ακόμη μέθοδος για την εφαρμογή της στα πλαίσια του σχεδιασμού. Η επιμονή στην τρέχουσα μέθοδο και η διαχείριση των έξυπνων υλικών σαν τεχνητά υλικά σ' ένα σύστημα ταξινόμησης είναι εμφανώς προβληματική. Ακόμη κι αν ένα έξυπνο υλικό θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν αντικαταστάτης ενός συνηθισμένου υλικού όσον αφορά πολλά στοιχεία και εφαρμογές, η έμφυτη «ενεργή» συμπεριφορά τους τα καθιστά επίσης δυνητικά εφαρμόσιμα και στην τεχνολογία. Για παράδειγμα, το ηλεκτροχρωμικό γυαλί μπορεί ταυτόχρονα να είναι ένα υλικό τοποθέτησης υαλοπινάκων, ένα παράθυρο, ένα παραβάν, ένα σύστημα ελέγχου φωτός ή ένα αυτοματοποιημένο σύστημα σκίασης. Στην περίπτωση αυτή, την πρότυπη ταξινόμηση το υλικό θα ενέπιπτε σε αρκετές μεμονωμένες κατηγορίες καθιστώντας ιδιαίτερα δύσκολο για τον αρχιτέκτονα την εξέταση του πολυμορφικού χαρακτήρα και της επίδοσης του υλικού. Επιπλέον, πολλές από τις νέες τεχνολογίες είναι νεοεισαχθείσες στην εφαρμογή, και συνεπώς δεν έχουν θέση στις συμβατικές περιγραφές. Ίσως το μεγαλύτερο μέρος της συναρμολόγησης, τότε, είναι οι ταξινομήσεις των έξυπνων υλικών να γίνονται σε πολλά στρώματα – το ένα στρώμα να χαρακτηρίζει το υλικό σύμφωνα με τη *φυσική* του συμπεριφορά (τι κάνει) και το άλλο στρώμα να χαρακτηρίζει το υλικό σύμφωνα με τη *φαινομενική* του συμπεριφορά (το αποτέλεσμα της φυσικής του συμπεριφοράς). Σπάνια βρίσκει κάποιος κείμενα για τη φαινομενική συμπεριφορά, πολύ λιγότερο δε, έχει εξεταστεί στα πλαίσια της αρχιτεκτονικής. Μπορούμε να ταξινομήσουμε αυτά τα αποτελέσματα στα πλαίσια του πεδίου δράσης τους, η οποία θα μπορούσε να εξεταστεί σε αναλογία με την πρόθεση ενός αρχιτέκτονα:

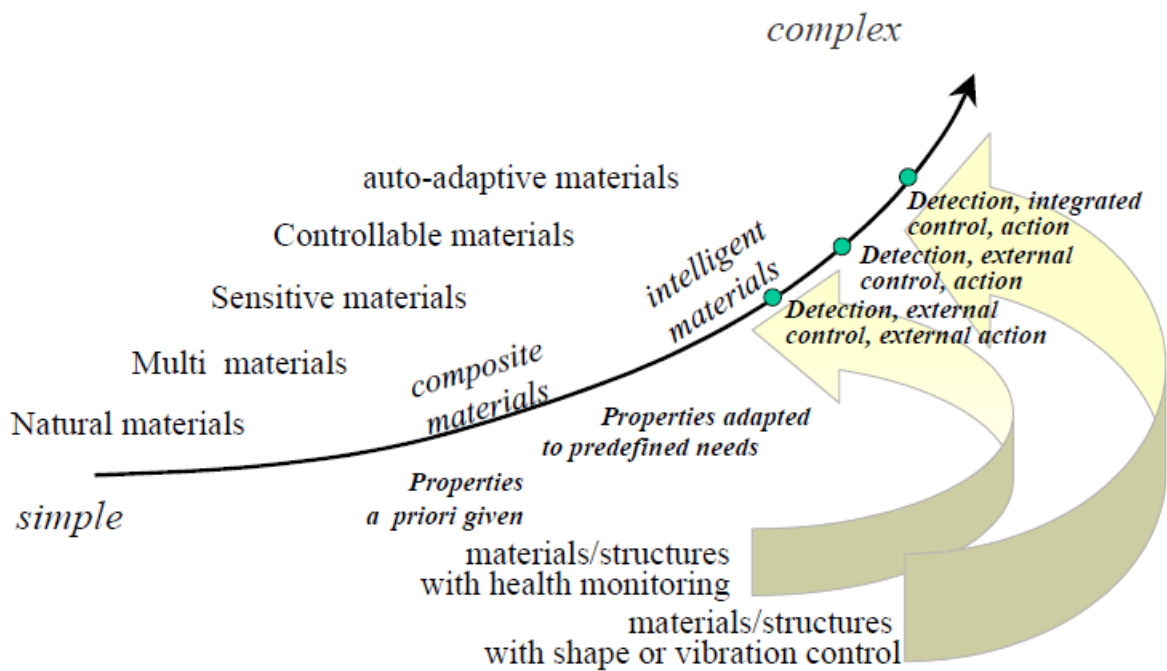
- *τί θέλουμε να κάνει το υλικό* . Τα έξυπνα υλικά που χρησιμοποιούμε μπορούν να παράγουν άμεσα αποτελέσματα στο πεδίο της ενέργειας (οπτικής, θερμικής και ακουστικής), ή μπορούν να παράγουν έμμεσα αποτελέσματα στα συστήματα (δημιουργία ενέργειας, μηχανικός εξοπλισμός). Αυτή η προσέγγιση, λειτουργικά, είναι πολύ χρήσιμη στο σχεδιαστή σε ό,τι αφορά την αποτίμηση

της χρήσης των έξυπνων υλικών και των συστημάτων σε σχέση με το σχεδιασμό των διαφόρων ειδών ατμόσφαιρας. Όμως, θα πρέπει επίσης να αναγνωρίσουμε, ότι υπάρχει και αξία και πραγματικότητα στην εξέταση του τρόπου που αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται σταθερά στην εξυπηρέτηση της δημιουργίας όλο και περισσότερο περίτεχνων κατασκευών, συναρμολογήσεων και καταστάσεων που εσωτερικά είναι πολυμορφικά ή αλλιώς παρέχουν πιο περίτεχνες αντιδράσεις από αυτές που μπορούν να παρέχουν τα απλά υλικά. Αυτή είναι η προσέγγιση των λειτουργιών/συστημάτων.

## **4.2 Διαρθρωτικός έλεγχος υγείας ως ένας τρόπος για να καταστούν έξυπνα τα υλικά και οι κατασκευές**

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, η ιδέα των έξυπνων ή νοήμωνων υλικών και δομών έχει κάνει όλο και πιο αισθητή την παρουσία της στο μυαλό των μηχανικών. Αυτές οι νέες ιδέες ήταν ιδιαίτερα ευπρόσδεκτες στους τομείς της αεροδιαστημικής και των έργων πολιτικού μηχανικού. Πράγματι, η ιδέα αυτή είναι σήμερα μια από τις κινητήριες δυνάμεις για την καινοτομία σε όλους τους τομείς.

Η έννοια των Έξυπνων Υλικών / Κατασκευών (EYK) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα βήμα προς τη γενική εξέλιξη των τεχνητών αντικειμένων, όπως φαίνεται στο Σχήμα. Υπάρχει μια συνεχής τάση από την απλή στη σύνθετη ανθρώπινη παραγωγή, που αρχίζει από τη χρήση των ομοιογενών υλικών, τα οποία παρέχονται από τη φύση και είναι αποδεκτά με τις φυσικές τους ιδιότητες, ακολουθούμενη από πολλαπλά υλικά (ειδικότερα, σύνθετα υλικά) που μας επιτρέπουν να δημιουργήσουμε δομές με ιδιότητες προσαρμοσμένες για συγκεκριμένες χρήσεις. Στην πραγματικότητα, τα σύνθετα υλικά και πολυ-υλικά αντικαθιστούν ομοιογενή υλικά σε ολοένα και περισσότερες κατασκευές. Αυτό είναι ιδιαίτερα αληθές στον αεροναυπηγικό τομέα. Για παράδειγμα, σύνθετα τμήματα πλέον σήμερα χρησιμοποιούνται ή προβλέπονται για σύγχρονα αεροσκάφη (όπως για παράδειγμα στο Σχήμα το έργο Boeing 7E7 της Dreamliner, το οποίο έχει το 50% των δομών του κατασκευασμένα από σύνθετα). Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό το αεροσκάφος είναι το πρώτο το οποίο έχει σαφώς προγραμματιστεί να ενσωματώσει EYK συστήματα, ιδίως συστήματα για την ανίχνευση των επιπτώσεων.

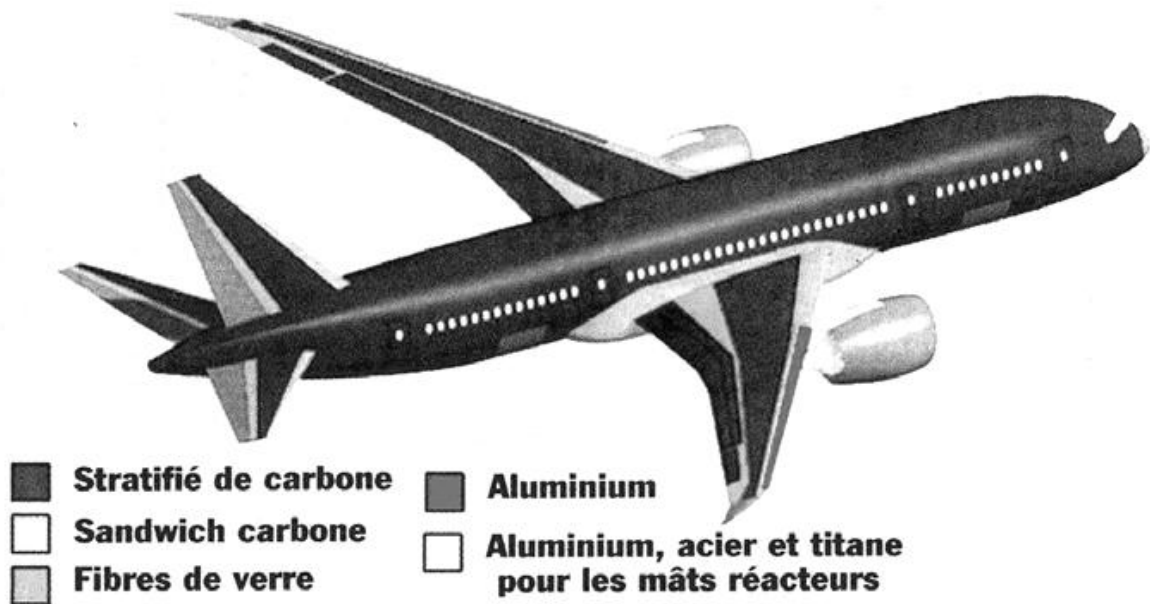


*Γενική εξέλιξη των υλικών / κατασκευών που χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους, και ο χώρος των έξυπνων δομών, συμπεριλαμβανομένων των δομών με ΔΕΥ.*

Το επόμενο βήμα αποτελείται από την επίτευξη της προσαρμογής των ιδιοτήτων των υλικών και δομών στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Αυτό απαιτεί να τις καταστήσουμε ευαίσθητες, ελέγξιμες και ενεργές. Τα διάφορα επίπεδα τέτοιας «νοημοσύνης» αντιστοιχούν στην ύπαρξη μιας, δύο ή και τριών ποιοτήτων. Έτσι, μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα ευαίσθητα, ελεγχόμενα και αυτοθεραπευόμενα υλικά / κατασκευές. Κλασικά, τρεις τύποι των ΕΥΚ υπάρχουν: τα ΕΥΚ που ελέγχουν το σχήμα τους, τα ΕΥΚ που ελέγχουν τις δονήσεις τους, και τα ΕΥΚ που ελέγχουν την υγεία τους. Είναι σαφές ότι τα υλικά και οι δομές που ενσωματώνουν συστήματα ΔΕΥ ανήκουν, τουλάχιστον σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα, στο λιγότερο έξυπνο είδος των ΕΥΚ. Στην πραγματικότητα, σχεδόν όλα τα επιτεύγματα στον τομέα αυτό προορίζονται μόνο για να κάνουν ευαίσθητα τα υλικά / κατασκευές, με την ενσωμάτωση αισθητήρων. Το επόμενο βήμα προς την κατεύθυνση πιο έξυπνων δομών θα είναι να φτιάξουμε αυτο-επιδιορθώμενα υλικά / κατασκευές, ή τουλάχιστον υλικά / κατασκευές με ενσωματωμένες ιδιότητες καταπράνσης των ζημιών. Για τον περιορισμό των ζημιών, η ενσωμάτωση ενεργοποιητών κατασκευασμένων από κράματα με μνήμη σχήματος (SMA) θα μπορούσε να είναι μια λύση που θα επάγει στελέχη προκειμένου να μειωθούν οι καταπονήσεις στις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων.

Αυτοί οι ενεργοποιητές SMA μπορούν να έχουν τη μορφή συρμάτων [YOS 96, CHO 99] ή μεμβρανών [TAK 00]. Όσον αφορά τις αυτοθεραπευόμενες δομές, πολύ λίγες προσπάθειες έχουν καταβληθεί. Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε, στον τομέα των έργων πολιτικού μηχανικού, την ύπαρξη των αυτοθεραπευόμενων σκυροδεμάτων που περιέχουν κοίλες πλήρως-συγκολλημένες εύθραυστες ίνες: η κόλλα απελευθερώνεται όταν οι ίνες κατανέμονται στην περιοχή όπου λαμβάνει χώρα πυρόλυση [DRY 94].

Μια παρόμοια μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνθετα πολυμερούς μήτρας [DRY 96, MOT 99].



*Παράδειγμα της αυξανόμενης σπουδαιότητας των σύνθετων υλικών σε αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας: ο Dreamliner 7E7 έχει 50% της δομής του κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά.*

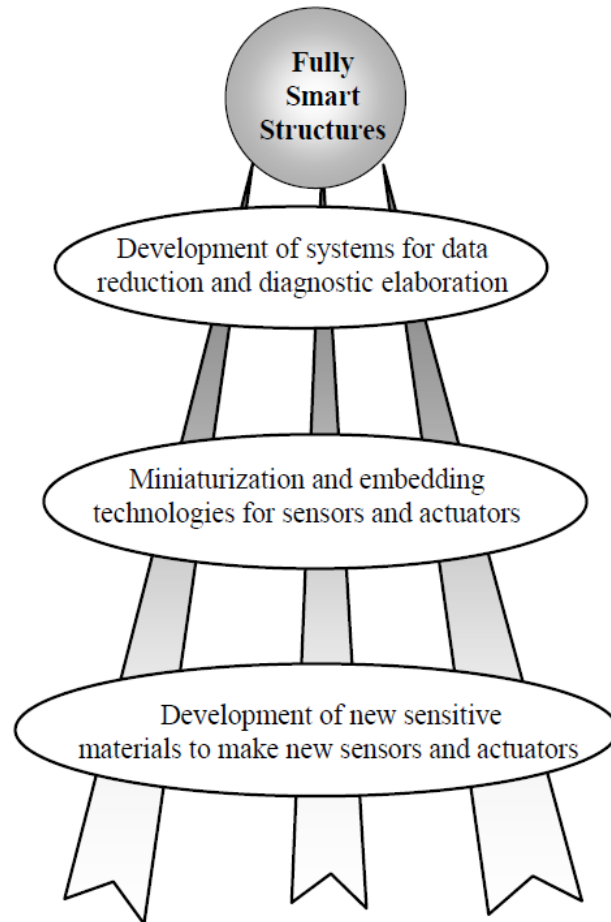
*Γι' αυτό το αεροσκάφος, τα συστήματα παρακολούθησης ανίχνευσης των επιπτώσεων προβλέπονται για το εξωτερικό πάνελ.*

Όπως φαίνεται παραπάνω, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δομών με ΔΕΥ και ΕΥΚ που ελέγχουν το σχήμα και τους κραδασμούς τους. Εντούτοις, είναι ενδιαφέρον να εξετασθούν ως μέρος ενός συνόλου, δεδομένου ότι μια πραγματικά έξυπνη δομή θα ενσωματώσει και τις τρεις λειτουργίες, και επειδή όλα βασίζονται σε κοινές βασικές έρευνες με στόχο την:

- Εκπόνηση νέων ευαίσθητων υλικών για να γίνουν αισθητήρες και ενεργοποιητές,
- Ανάπτυξη τεχνολογιών για τη μικρογραφία αισθητήρων και ενεργοποιητών, και την ενσωμάτωσή τους χωρίς υποβάθμιση των δομών υποδοχής,
- Σύλληψη των συστημάτων για μείωση των δεδομένων και διαγνωστική τυποποίηση.

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο, μέχρι πρόσφατα, τα έργα για ΔΕΥ συχνά παρουσιάζονται σε συνέδρια και επιστημονικά περιοδικά που διατίθενται για το γενικό θέμα των ΕΥΚ.





**Shape control    Vibration Control    Health Monitoring**

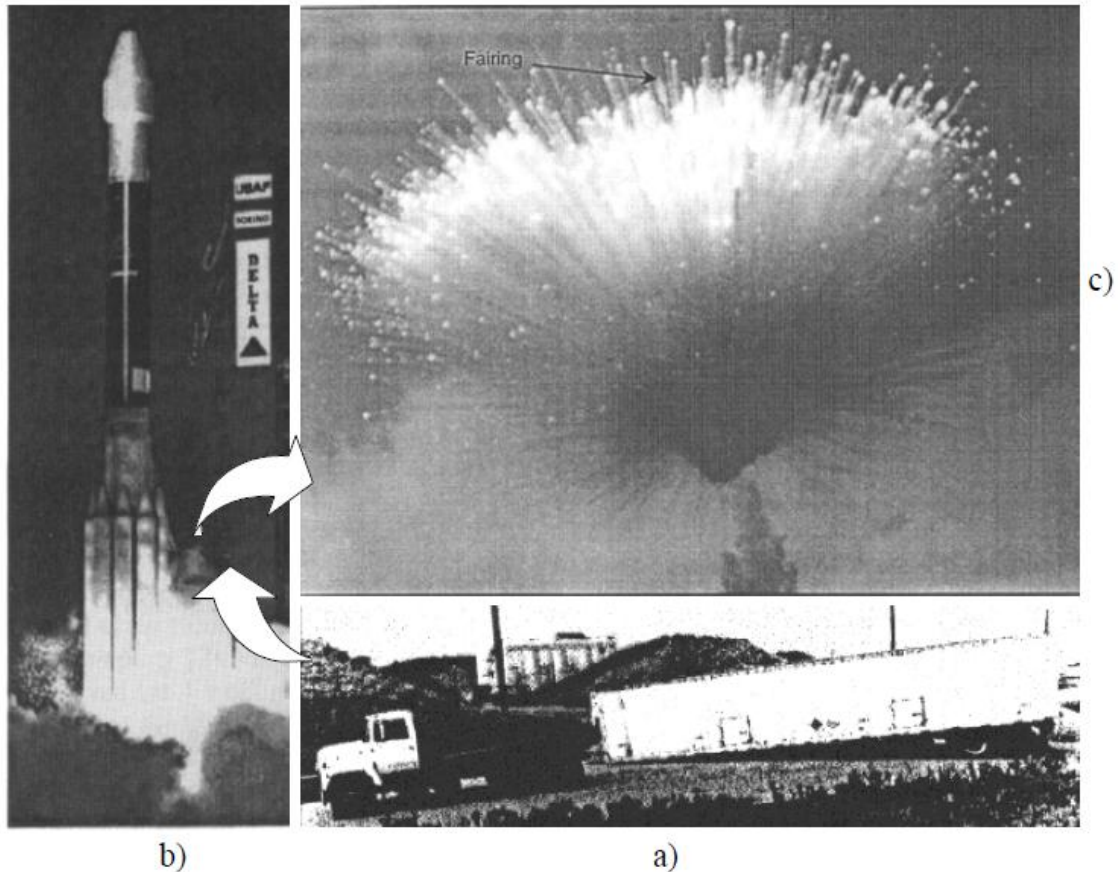
*Κοινή βάση και συμπληρωματικότητα του ΔΕΥ, έλεγχος σχήματος και έλεγχος δόνησεως*

### **4.3 Έλεγχος διαδικασίας και προ-παρακολούθησης ως μέρος του ΔΕΥ**

Αισθητήρες για Διαχείριση της Υγείας μπορούν να ενσωματώνονται στα συστατικά κατά τη διαδικασία παρασκευής του σύνθετου υλικού. Έτσι, σε μια σφαιρική προσέγγιση, που συμπεριλαμβάνει το στάδιο επεξεργασίας, οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιούνται πρώτα από όλα για την παρακολούθηση της επεξεργασίας παραμέτρων προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι αρχικές ιδιότητες του υλικού. Οι φυσικές παράμετροι του υλικού που μπορούν να ελέγχονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ποικίλλουν: δείκτης διάθλασης, ιξωδο-ελαστικές ιδιότητες, αγωγιμότητα, κλπ. Μια ποικιλία τεχνικών που επιτρέπει σε απευθείας σύνδεση την παρακολούθηση τους είναι διαθέσιμες: ηλεκτρικές τεχνικές [KRA 91, PIC 99], ηλεκτρο-μηχανικές τεχνικές αντίστασης που χρησιμοποιούν ενσωματωμένα πιεζο-μπαλώματα [JAY 97, GIU 03], ακουστικούς υπερήχους (ή οπτικές τεχνικές που χρησιμοποιούν αισθητήρες οπτικών ινών [CHA 01, DEG 02a]). Θα μπορούσε να είναι ενδιαφέρον να αναμειγνύονται διαφορετικοί αισθητήρες για την επίτευξη μιας πολλαπλής ανίχνευσης [CHA 00].

Για θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και στο εσωτερικό του σύνθετου, είναι διαθέσιμα ξανά διάφορα συστήματα αισθητήρων βασισμένα σε οπτικές ίνες. Αυτά βασίζονται κατά κύριο λόγο σε φθορά των μετρήσεων φθορισμού [LIU 00], οπτικές εσχάρες του Bragg [LIU 98, DEW 99] ή τροποποιημένους εξωγενείς αισθητήρες ινών Fabry-Perot [DEG 02b].

Υπάρχει μία ενδιάμεση φάση της ζωής μιας κατασκευής που μπορεί να χρειαστεί ΔΕΥ επίσης: μεταξύ του τέλους της διαδικασίας παρασκευής και την έναρξη της λειτουργικής φάσης, για ορισμένες δομές, συμβαίνουν πολλές χειριστικές και μεταφορικές λειτουργίες. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, η οποία θα μπορούσε να ονομαστεί το προ-στάδιο χρήσης της κατασκευής, τυχαία φορτία, άγνωστα από τον τελικό χρήστη, μπορεί να εμφανιστούν και να απειλήσουν την αξιοπιστία της κατασκευής. Ένα καλό παράδειγμα ενός τέτοιου κινδύνου δίνεται στο [GUN 99]. Στις 17 Ιανουαρίου του 1997, η αποστολή Delta II 241 απέτυχε όταν ο πύραυλος εξερράγη μετά από μια πτήση των 12,5 δευτερολέπτων, με τη συνέπεια ότι η πρώτη από τη νέα δέσμη των Παγκόσμιων Δορυφόρων Εντοπισμού Θέσης (GPS) χάθηκε (Σχήμα). Η εμφάνιση της βλάβης, η οποία προκλήθηκε από μια υπερφόρτωση χειρισμού ενώ ο πύραυλος μεταφερόταν οδικώς πριν από την πυροδότηση, ήταν βάσιμη υποψία. Η θεραπεία αποτελείτο από εξοπλισμό της κατασκευής με ένα σύστημα ΔΕΥ, το οποίο κατέγραψε τις διαταραχές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του πλήρους προσταδίου χρήσης.

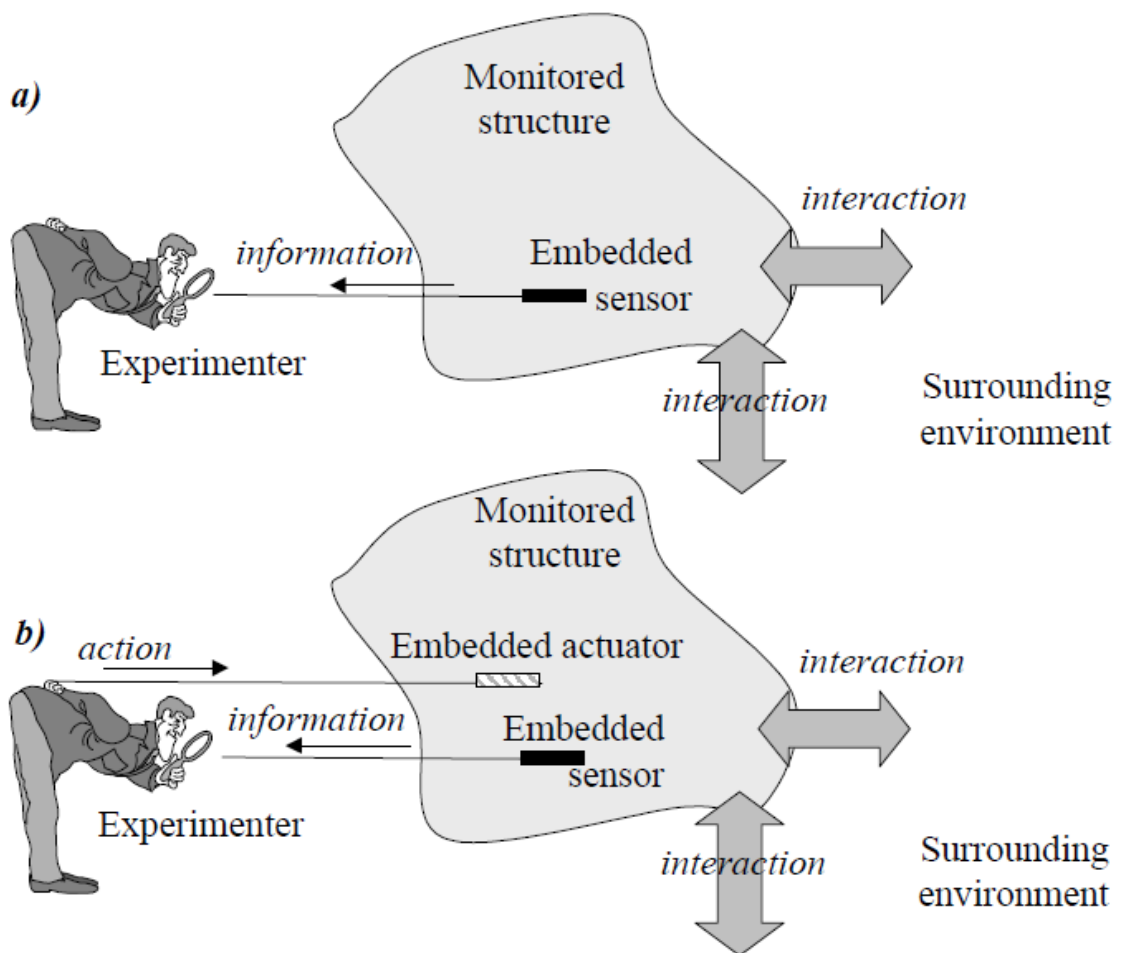


*Η έκρηξη της αποστολής Delta II 241, από το [GUN 99], μια καταστροφική βλάβη που θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί με το προστάδιο παρακολούθησης της υγείας - α) οδικές μεταφορές: ο πυραύλος είναι μέσα στο ρυμουλκούμενο, εδώ έχει αποσυνδεθεί, β) απογείωση του Delta II, γ) η έκρηξη, η οποία ξεκίνησε από μια ρωγμή σε έναν από τους κινητήρες με εποξειδικό γραφίτη που βρίσκεται στη βάση του πυραύλου*

Για τον τύπο αυτό του ΔΕΥ, είναι ευκολότερο να ανιχνευθούν τα πιθανά επιζήμια γεγονότα παρά οι βλάβες που πιστεύεται ότι έχουν προκληθεί. Οι αισθητήρες μπορούν να είναι ωμικά όργανα μέτρησης της παραμόρφωσης ή αισθητήρες οπτικών ινών ευαίσθητοι σε παραμορφώσεις για τα ημιστατικά φορτία και τους αισθητήρες ακουστικών εκπομπών για εμπυγνύμενα φορτία.

#### **4.4 Παθητικός και ενεργητικός διαρθρωτικός έλεγχος υγείας(ΔΕΥ)**

Ο ΔΕΥ, όπως και η μη-καταστρεπτική αξιολόγηση (ΜΚΑ), μπορεί να είναι παθητικός ή ενεργητικός. Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει τις πιθανές καταστάσεις στις οποίες εμπλέκονται αμφοτέρωτα πειραματιστής και εξεταζόμενη κατασκευή. Η δομή είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες και αλληλεπιδρά με το γύρω περιβάλλον, με τέτοιο τρόπο ώστε η κατάσταση και οι φυσικές του παράμετροι να εξελίσσονται.



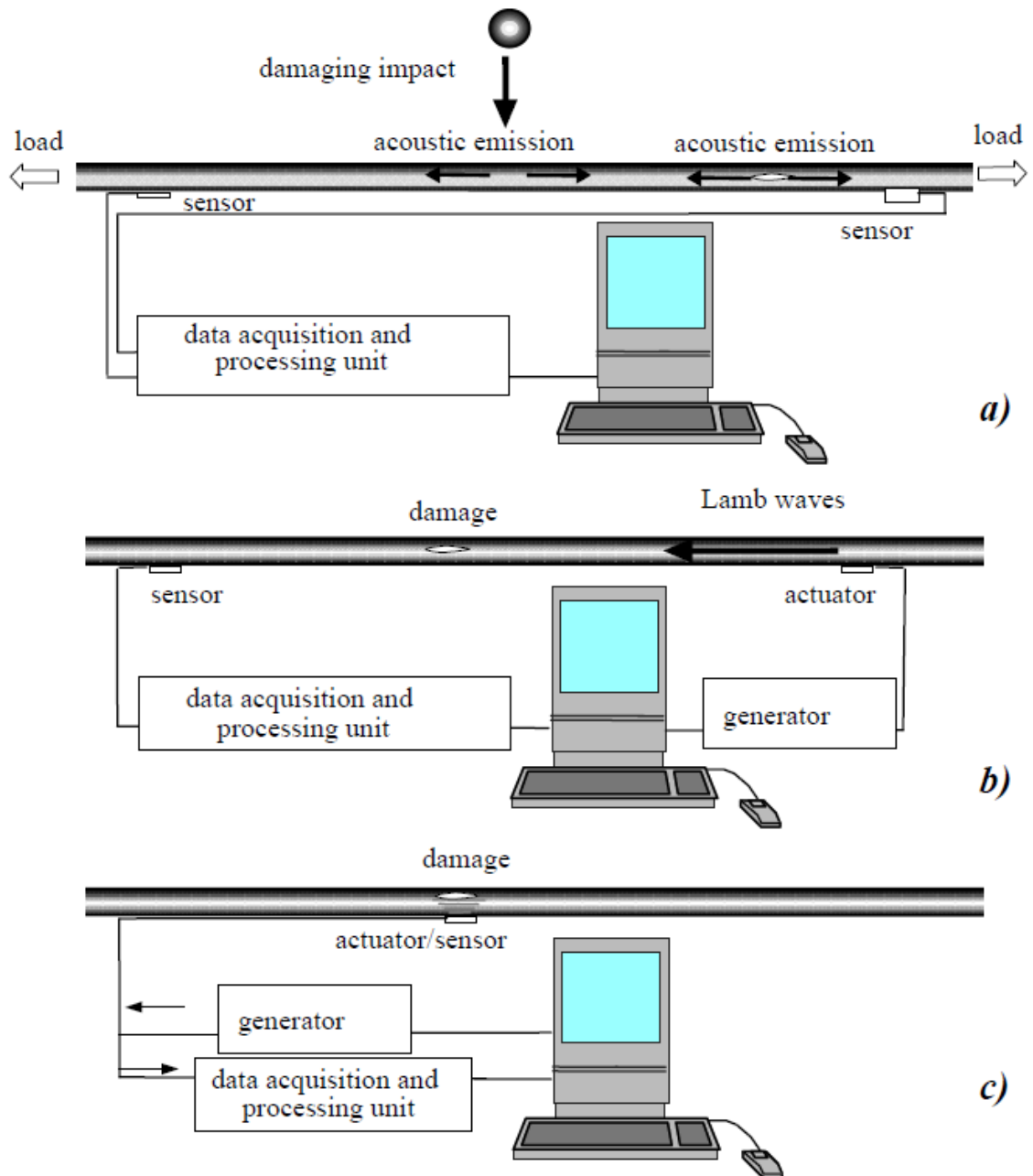
Οι δύο πιθανές στάσεις του πειραματιστή που καθορίζουν: α) παθητική και β) ενεργητική παρακολούθηση

Αν ο πειραματιστής παρακολουθεί μόνο αυτήν την εξέλιξη χάρη στους ενσωματωμένους αισθητήρες, μπορούμε να αποκαλέσουμε τη δράση του «παθητική παρακολούθηση». Για ΔΕΥ, αυτό το είδος κατάστασης συναντάται με την ανίχνευση ακουστικών τεχνικών εκπομπής, για παράδειγμα, την εξέλιξη της βλάβης σε μια φορτισμένη κατασκευή ή την εμφάνιση μιας καταστροφικής συνέπειας [DUP 99, ΣΤΑ 99].

Αν ο πειραματιστής έχει εξοπλίσει την κατασκευή τόσο με αισθητήρες όσο και με ενεργοποιητές, αυτός/αυτή μπορεί να δημιουργήσει διαταραχές στη δομή, χάρη στους ενεργοποιητές, και στη συνέχεια, να χρησιμοποιήσει αισθητήρες για την παρακολούθηση της απόκρισης της κατασκευής. Σε μια τέτοια περίπτωση, η δράση του πειραματιστή είναι «ενεργός παρακολούθηση». Στο παραπάνω παράδειγμα, η παρακολούθηση καθίσταται ενεργή, με την προσθήκη στο πρώτο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, το οποίο χρησιμοποιείται ως ένας ανιχνευτής ακουστικής εκπομπής, ενός δεύτερου επιθέματος, το οποίο χρησιμοποιείται ως ένας πομπός υπερηχητικών κυμάτων. Ο δέκτης, εδώ, καταγράφει σήματα, που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση

αυτών των κυμάτων με μία θέση πιθανής βλάβης, επιτρέποντας την ανίχνευση τους [WAN 99, LEM 00 β, PAG 02].

Στην κλασσική ΜΚΑ, η διέγερση, γενικά, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια συσκευή εξωτερικά από την εξεταζόμενη κατασκευή, αλλά η φιλοσοφία είναι η ίδια. Στον ΔΕΥ, ο ενεργοποιητής και ο αισθητήρας μπορεί να είναι διαφορετικοί ή ταυτόσημοι ως προς τη φύση, για παράδειγμα, διέγερση από ένα πιεζοηλεκτρικό έμπλαστρο και ανίχνευση των κυμάτων, με έναν αισθητήρα οπτικών ινών [LIN 02] ή άλλο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων, αξίζει να σημειωθεί ότι η ίδια συσκευή μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως πομπός όσο και δέκτης, που παρέχει ευελιξία στην παρακολούθηση του συστήματος, εναλλάσσοντας τους ρόλους τους. Αυτό απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα. Με τα πιεζοηλεκτρικά μπαλώματα, ένα μοναδικό αισθητήριο μπορεί να εκτελέσει ακόμη και τις δύο λειτουργίες ταυτόχρονα, όπως και στην τεχνική της ηλεκτρομηχανικής εμπέδησης [ΔΠΚ 02, GIU 03].



Ευελιξία των τεχνικών παρακολούθησης με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα: α) παθητική μέθοδος: τεχνική ακουστικών εκπομπών, β) ενεργητική μέθοδος: τεχνική ακουστικών υπερήχων με τη γενιά των κυμάτων Lamb, γ) ενεργητική μέθοδος: τεχνική ηλεκτρομηχανολογικής αντίστασης.

#### 4.5 Ενεργητικά και παθητικά έξυπνα υλικά

Τα έξυπνα υλικά μπορεί να είναι είτε ενεργητικά είτε παθητικά. Ο Fairweather (1998) όρισε τα ενεργητικά έξυπνα υλικά ως εκείνα τα υλικά που έχουν την ικανότητα να τροποποιούν τις γεωμετρικές και υλικές τους ιδιότητες υπό την εφαρμογή ηλεκτρικών, θερμικών ή μαγνητικών πεδίων, δια τούτου αποκτώντας την εγγενή ικανότητα να μετάγουν ενέργεια. Πιεζοηλεκτρικά υλικά (Piezoelectric materials), κράματα με μνήμη σχήματος (Shape memory alloys), ηλεκτροροεολογικά Ρευστά (Electrorheological

Fluids) και μαγνητοσυσταλτικά υλικά (Magnetostrictive materials) είναι ενεργητικά έξυπνα υλικά. Όντας ενεργητικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μορφοτροπείς δύναμης και ενεργοποιητές. Για παράδειγμα, τα SMA έχουν μεγάλη δύναμη ανάκαμψης, της τάξεως των 700MPa (105 psi) (Kumar, 1991), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κίνηση. Παρομοίως, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα οποία μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική δύναμη, είναι επίσης «ενεργητικά». Τα έξυπνα υλικά που δεν είναι ενεργητικά, ονομάζονται παθητικά έξυπνα υλικά.

Παρότι έξυπνα, στερούνται της έμφυτης ικανότητας να μετάγουν ενέργεια. Το υλικό οπτικών ινών είναι ένα καλό παράδειγμα παθητικού έξυπνου υλικού. Τέτοια υλικά μπορούν να δρουν σαν αισθητήρες αλλά όχι σαν ενεργοποιητές ή μορφοτροπείς.

## Κεφάλαιο 5: Κατηγορίες έξυπνων υλικών

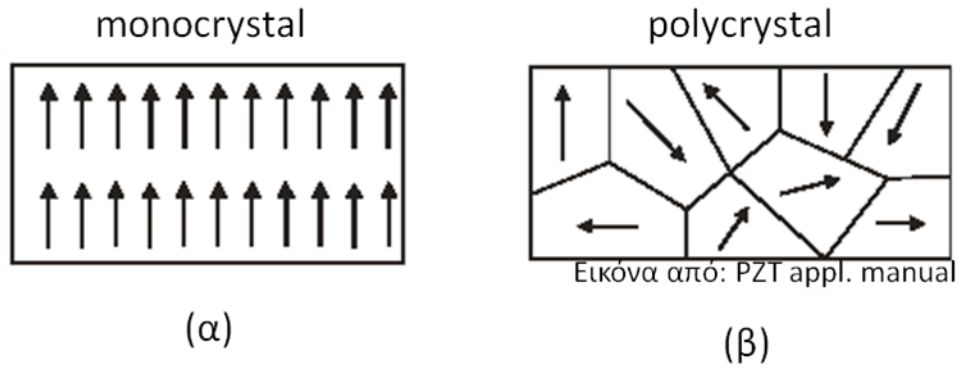
### 5.1 Έξυπνα υλικά για έλεγχο ήχων και κραδασμών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μερικά υλικά έχουν την ικανότητα να αλλάζουν σχήμα ή μέγεθος απλά εφαρμόζοντας ένα ηλεκτρικό δυναμικό, προσθέτοντας λίγη θερμότητα, ή να αλλάζουν την κατάστασή τους από υγρή σε στερεή σχεδόν ακαριαία όταν βρίσκονται κοντά σε ένα μαγνήτη τα υλικά αυτά ονομάζονται έξυπνα υλικά. Οι δομές με έξυπνα υλικά ονομάζονται επίσης έξυπνες κατασκευές. Σε γενικές γραμμές, τα έξυπνα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

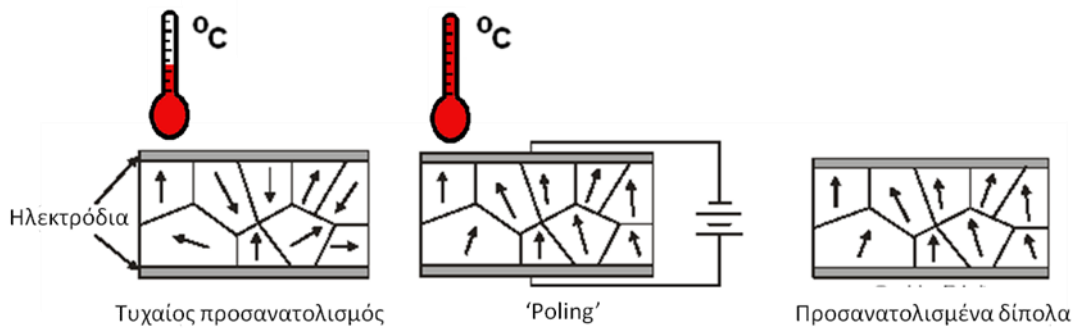
1. *Πιεζοηλεκτρικά υλικά*: μπορούν να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό δυναμικό σε απόκριση μιας εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης (άμεση πιεζοηλεκτρική επίπτωση) και μπορεί να παράγουν τη μηχανική τάση όταν υποβάλλονται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο (αντίστροφη πιεζοηλεκτρική επίπτωση). Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών (κυρίως κρυσταλλικών υλικών αλλά και μερικών κεραμικών υλικών) να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Επίσης, ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται, όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση. Ο πιεζοηλεκτρισμός ανακαλύφθηκε από τον Πιερ Κιουρί το 1880. Οφείλεται σε κρυσταλλικές ασυμμετρίες και αποτελεί φαινόμενο πρώτης τάξης. Παραδείγματα υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ), το αλάτι Rochelle ή Seignette (τρυγικό καλιονάτριο,  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), το ADP (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), το ένυδρο θεικό λίθιο, ( $\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride), κτλ.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο δε θα πρέπει να συγχέεται με το φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής, που είναι διαφορετικό (δεν αποτελεί το ένα αντίστροφο του άλλου, όπως λανθασμένα γράφεται σε κάποιες αναφορές). Και τα δύο φαινόμενα είναι δυνατό να συνυπάρχουν στο ίδιο κρυσταλλικό υλικό, με κάποιο από τα δύο να είναι επικρατέστερο του άλλου. Το φαινόμενο τυγχάνει ευρείας εκμετάλλευσης σε διάφορες εφαρμογές της ακουστικής (ηλεκτροακουστική, ηλεκτρακουστικοί μορφοτροπείς, βιοϊατρική, μικροζυγαριές κτλ).

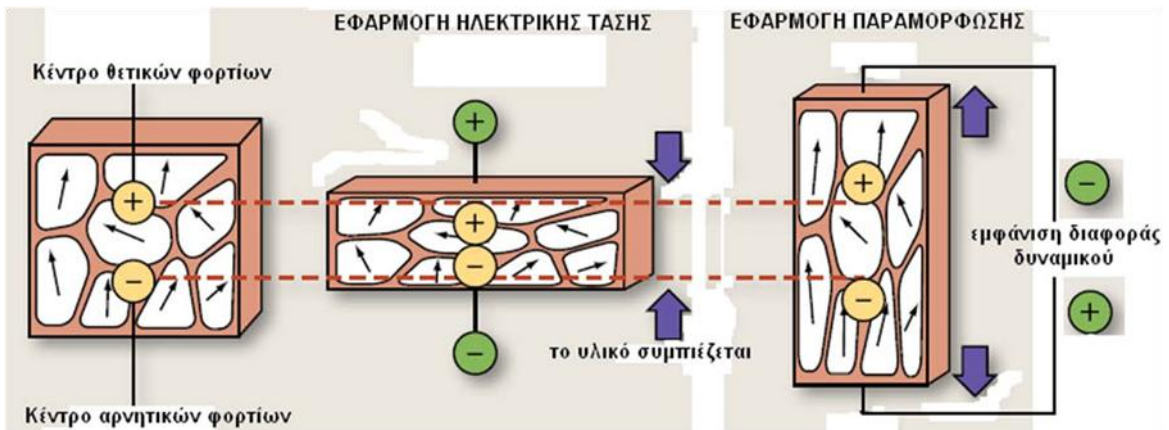




Διευθύνσεις πόλωσης (α) μονοκρυσταλλικού και (β) πολυκρυσταλλικού υλικού



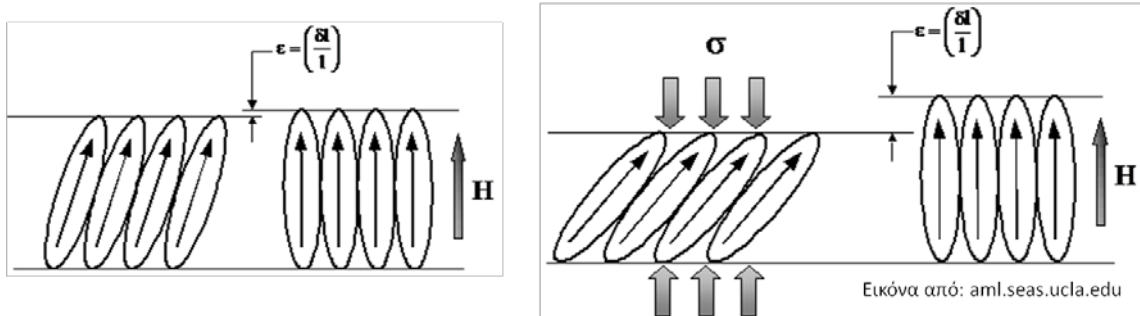
Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας πόλωσης ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού στην επιθυμητή διεύθυνση



Σχηματική αναπαράσταση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου όπως εκδηλώνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις

2. *Ηλεκτροσυσταλτικά υλικά:* Ηλεκτροσυστολή είναι μια ιδιότητα όλων των διηλεκτρικών υλικών. Η μηχανική καταπόνηση είναι ανάλογη του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου. Σε αντίθεση με τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, η ηλεκτροσυστολή δε μπορεί να αντιστραφεί η μηχανική παραμόρφωση δε θα προκαλέσει ηλεκτρικό πεδίο και η αντιστροφή του ηλεκτρικού πεδίου δεν αντιστρέφει την κατεύθυνση της παραμόρφωσης. Ο λόγος είναι ότι τα ηλεκτροσυσταλτικά υλικά δεν είναι πολωμένα.

3. *Μαγνητοσυσταλτικά υλικά*: Μαγνητοσυστολή είναι η ιδιότητα που προκαλεί ένα υλικό να αλλάζει το μήκος του όταν υποβάλλεται σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την κατασκευή τηλε-μηχανισμών εφαρμογής (remote actuator systems), μετατρέποντας ένα μαγνητικό σήμα (είσοδος) σε μηχανική έξοδο. Μια τυπική τέτοιου είδους διαμόρφωση είναι μια πρόβολος μικροδοκός ή μεμβράνη που επικαλύπτεται απ' τη μια πλευρά της με μαγνητοσυσταλτικό υλικό. Παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου δημιουργείται συσσώρευση τάσεων και η μικροκατασκευή κάμπτεται σε κάποιο σημείο. Χαρακτηριστικά μαγνητοσυσταλτικά υλικά είναι κράματα NdFe, TbCo και πολυστρωματικά υμένα TbFe/TbCo, καθώς έχουν υψηλό συντελεστή μαγνητοσυστολής. Ένα άλλο υλικό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το Tefonel-D (Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub>) και χρησιμοποιείται κυρίως στους μικρο-αισθητήρες. Η σύγχρονη εποχή του φαινομένου της μαγνητοσυστολής ξεκίνησε το 1963 όταν η παραμόρφωση των σπάνιων υλικών της γης, όπως του τερβίου (Tb) και του δυσπροσίου (Dy), πλησίασε το 1% σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Μέχρι τότε πολλά υλικά είχαν παρουσιάσει μαγνητοσυστολική συμπεριφορά, συμπεριλαμβανομένων ορισμένων υλικών σε θερμοκρασίες δωματίου, αλλά η μέγιστη μαγνητοσυστολή παρατηρήθηκε στα κράματα, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες δωματίου, πράγμα που τα καθιστά ιδανικά για τις κρυογονικές συσκευές.



(α)

(β)

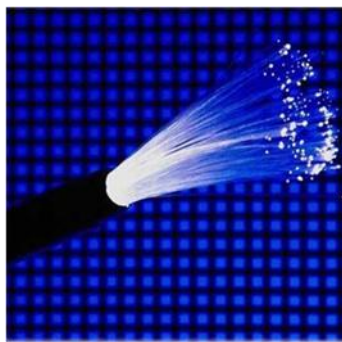
(α) Απλοποιημένη εξήγηση της μαγνητοδιαγνωστικής συμπεριφοράς και  
 (β) ενίσχυση του φαινομένου με προφόρτιση του υλικού

4. *Κράματα με μνήμη σχήματος (ΚΜΣ)*: είναι κράματα που μπορεί να "θυμούνται" τη γεωμετρία τους. Τα υλικά τους προκαλούν αλλαγές σχήματος όταν υποβάλλονται σε θερμικό πεδίο. Αναλύονται διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

5. *Οπτικές ίνες*: έχουν ένταση, φάση, συχνότητα, ή πόλωση της διαμόρφωσης για τη μέτρηση έντασης, θερμοκρασίας, ηλεκτρικών / μαγνητικών πεδίων, πίεσης, και άλλων μετρήσιμων ποσοτήτων. Οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παντός είδους άριστοι αισθητήρες. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνιών και επιτρέπουν τη μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερου εύρους ζώνες (ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων) σε σχέση με άλλες μορφές επικοινωνίας, όπως ο χαλκός. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων, διότι τα σήματα ταξιδεύουν μαζί τους με λιγότερη απώλεια, και επίσης δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η ένωση οπτικών ινών είναι πιο πολύπλοκη από την ένωση συρμάτων ή καλωδίων. Τα άκρα των ινών πρέπει να είναι σχισμένα με προσοχή,

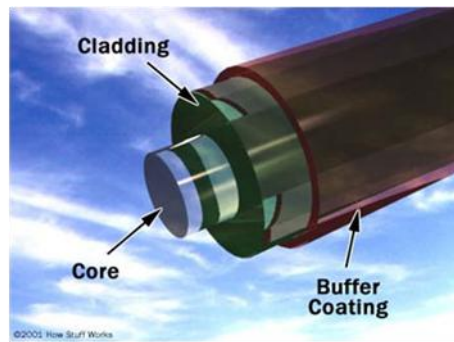
και στη συνέχεια, συγκολλημένα μαζί με μηχανική πίεση ή με σύντηξη χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό τόξο. Ειδικοί ακροδέκτες χρησιμοποιούνται στις συνδέσεις. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται επίσης για φωτισμό, και είναι σε μάτσα, επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά εικόνων, επιτρέποντας έτσι την προβολή σε στενούς χώρους. Ειδικά σχεδιασμένες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για πολλές άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων λείζερ.

Το φως κατά τη διέλευσή του παραμένει στον πυρήνα της οπτικής λόγω του φαινομένου της ολικής ανάκλασης. Αυτό προκαλεί την ίνα να λειτουργήσει ως κυματοδηγός. Οι ίνες οι οποίες υποστηρίζουν πολλές συχνότητες διερχόμενου φωτός ονομάζονται πολύτροπες (MMF), ενώ εκείνες που μπορούν να μεταφέρουν φως μιας μόνο συχνότητας ονομάζονται μονότροπες ίνες (SMF). Οι πολύτροπες έχουν γενικά μεγαλύτερη διάμετρο πυρήνα, και χρησιμοποιούνται για τις θαλάσσιες συνδέσεις επικοινωνίας εξ' απόστασεως και για εφαρμογές όπου υπάρχει ανάγκη μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων. Οι μονότροπες ίνες χρησιμοποιούνται όταν οι ανάγκες επικοινωνίας απαιτούν συνδέσεις σε απόσταση μεγαλύτερη από 550 μέτρα (1.800 πόδια).



www.molinainternational.com

(α)



©2003 How Stuff Works

www.howstuffwork.com

(β)

(α) δέσμη οπτικών ινών και (β) τα βασικά μέρη μιας τυπικής οπτικής ίνας.

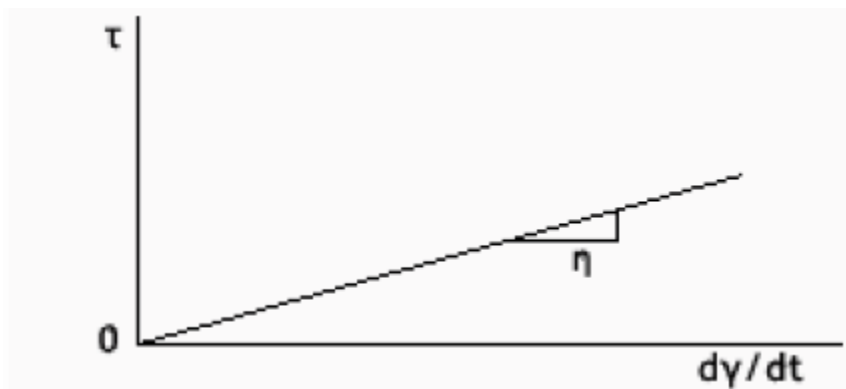
6. Ηλεκτρορεολογικά (ER) και Μαγνητορεολογικά (MR) υλικά: είναι έξυπνα υγρά, τα οποία μπορούν να βιώσουν μια δραματική αλλαγή του ιξώδους τους σε ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου, όταν εκτεθούν σε μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο. Το αποτέλεσμα μπορεί να αντιστραφεί πλήρως αμέσως μόλις το πεδίο αφαιρεθεί. Η πιο ενδιαφέρουσα μηχανική ιδιότητα που παρουσιάζουν τα παραπάνω υλικά είναι η ικανότητά τους να φέρουν διατμητικές τάσεις. Στην μηχανολογία, ρευστά τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται σε μηχανισμούς που απαιτούν έλεγχο φορτίων και ροπών μεταξύ κινούμενων μερών. Αυτό σημαίνει ότι κάθε συσκευή η οποία στηρίζεται σε υδραυλικά συστήματα και επιτελεί το παραπάνω έργο μπορεί να επωφεληθεί από αυτά τα υλικά σε ότι αφορά την απόκρισή της και τη μείωση των στοιχείων που την αποτελούν. Τέτοιες συσκευές είναι κυρίως οι αποσβεστήρες, οι συμπλέκτες και οι οπτικές συσκευές. Η εξάπλωση των ηλεκτρομαγνητικών ρευστών στα μηχανολογικά συστήματα καθυστέρησε λόγω της πολυπλοκότητας του προσεγγιστικού τους μοντέλου το οποίο δεν είναι κάτι το συνηθισμένο. Το μοντέλο στο οποίο βασίζονται τα ηλεκτρομαγνητορεολογικά ρευστά είναι κοινό. Πρόκειται για το μοντέλο πλαστικής ροής του Bingham, το οποίο σημαίνει

ότι συμπεριφέρονται σαν στερεά μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο ενδοτικότητας. Κύρια διαφορά στην μηχανική συμπεριφορά των ER και MR ρευστών είναι το μέγεθος της διατμητικής τάσης που είναι ικανά να φέρουν. Τα πρώτα φέρουν διατμητικές τάσεις της τάξεως των 10kPa, ενώ τα μαγνητοροεολογικά δύνανται να φέρουν δεκαπλάσια τάση, της τάξεως δηλαδή των 100kPa. Μέχρι στιγμής μόνο ένα είδος ERF έχει καταφέρει να συναγωνιστεί τα MRF σε ότι αφορά την τάση που φέρει. Αποτελεί εφεύρεση ερευνητών του Hong Kong University of Science and Technology το 2004 και μπορεί να φέρει διατμητική τάση 130kPa.

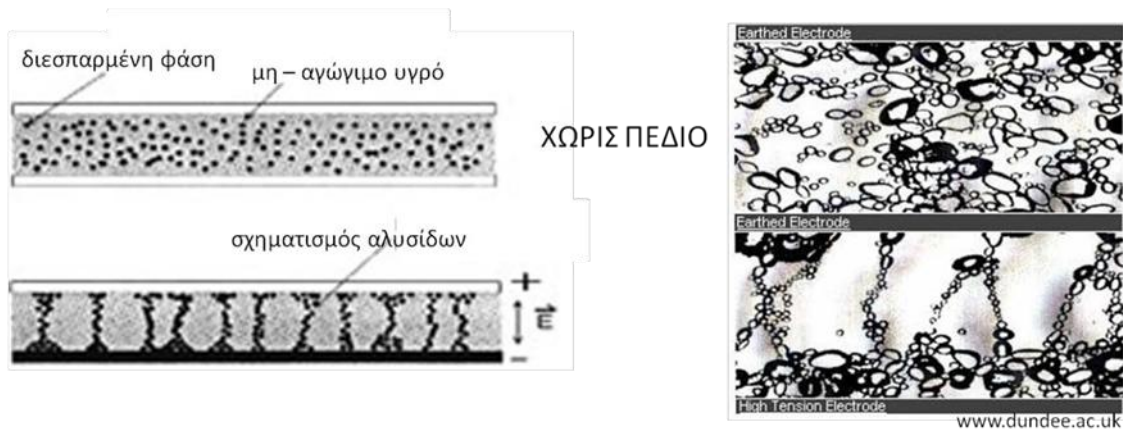
Χωρίς ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο τα ηλεκτροροεολογικά ή τα μαγνητοροεολογικά ρευστά αντίστοιχα συμπεριφέρονται σαν Νευτώνεια ρευστά, με τη διατμητική τάση ( $\tau$ ) να είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της διατμητικής παραμόρφωσης ( $dy/dt$ ) και του ιξώδους ( $\eta$ ):

$$\tau = dy/dt \cdot (\eta)$$

Αυτή η απόκριση παριστάνεται από τη γραμμή που διέρχεται από την αρχή των αξόνων στην ακόλουθη γραφική παράσταση διατμητικής τάσης ( $\tau$ ) – διατμητικής παραμόρφωσης ( $dy/dt$ ):



Αυτό γενικά είναι μία προσέγγιση καθώς τα MRF ακόμα κι εκτός πεδίου δεν είναι Νευτώνεια εξαιτίας των εναιωρημάτων και άλλων πρόσθετων σωματιδίων που περιέχουν. Σε συνθήκες μηδενικού πεδίου τα εναιωρήματα θεωρούνται ως ομαλά κατανεμημένα. Σε κάποιες άλλες εφαρμογές ακόμα και η ροή του ρευστού είναι ικανή να αποτρέψει την καθίζηση. Σε άλλες πάλι μία ελαφριά ανάδευση είναι απαραίτητη για την ανακατανομή των σωματιδίων. Αποδεικνύεται ότι αποτελεί πλεονέκτημα το ιξώδες σε μηδενικό πεδίο να είναι όσο το δυνατό μικρότερο.



*Το ηλεκτρορεολογικό φαινόμενο*

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλά έξυπνα υλικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και έχουν εγκατασταθεί και εγκαταθιστώνται σε διάφορες εφαρμογές από τον έλεγχο των αεροναυπηγικών κατασκευών μέχρι την ανάπτυξη των βιομηχανικών συσκευών, αυτό το κεφάλαιο καλύπτει μόνο τα πιεζοηλεκτρικά υλικά και τις εφαρμογές τους στον διαρθρωτικό ήχο και την καταστολή των κραδασμών.

Τα αδέρφια Curie ανακάλυψαν τις πιεζοηλεκτρικές επιδράσεις το 1880, αλλά δε χρησιμοποιήθηκαν πλήρως μέχρι το 1940 όταν αναπτύχθηκαν ενισχυτές υψηλής εισροής αντίστασης. Στη δεκαετία του 1950, η πιεζοηλεκτρική επίδραση έγινε στο εμπόριο με την έλευση των ηλεκτρομετρικών σωλήνων. Τώρα, πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν γίνει πολύ δημοφιλή σε παθητικές και ενεργητικές κατασκευαστικές εφαρμογές ελέγχου, τόσο ως αισθητήρες όσο και σαν ενεργοποιητές. Ζιρκονικό-τιτανικό άλας μολύβδου και φθοριούχο πολυβινυλιδένιο είναι δύο κοινά παραδείγματα των πιεζοηλεκτρικών υλικών σε εφαρμογές μηχανικής.

Γενικά, υπάρχουν τρεις μεγάλοι τρόποι για την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών υλικών για διαρθρωτικό ήχο και έλεγχο κραδασμών: παθητικά, ενεργητικά και υβριδικά.

### **A) Παθητικός έλεγχος με πιεζοηλεκτρικά υλικά**

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται για παθητικό ήχο και απόσβεση κραδασμών σε διάφορες τεχνικές κυκλωμάτων διακλάδωσης. Ένα κύριο χαρακτηριστικό των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι η μεταγωγή ενέργειας. Αυτό συμβαίνει όταν ένα μηχανικό έργο γίνεται με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και ορισμένο τμήμα μετατρέπεται και αποθηκεύεται ως διηλεκτρική ενέργεια. Σε μια δονούμενη κατασκευή, ένα δίκτυο ελιγμών μπορεί να ρυθμιστεί να ολοκληρώσει τον έλεγχο των κραδασμών, τροποποιώντας τη δυναμική του ηλεκτρικού συστήματος. Ο Lesieutre περιέγραψε τους τέσσερις τύπους της διακλάδωσης κυκλωμάτων: ωμικά, επαγωγικά, χωρητικά, και ενεργοποιημένα. Ο Hagoood και ο Flotow, διερεύνησε τη δυνατότητα της διάχυσης μηχανικής ενέργειας με πιεζοηλεκτρικά υλικά που παραπέμπουν σε παθητικά ηλεκτρικά κυκλώματα. Ο Aldrich διεξήγαγε έρευνα στο σχεδιασμό ενός παθητικού συστήματος ελέγχου για μια χωρική κατασκευή. Ο Wu παρουσίασε τα αποτελέσματα

ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που διακλαδίζεται με μια παράλληλη αντίσταση-επαγωγέα κυκλώματος. Το ερευνητικό ενδιαφέρον στην ηλεκτρονική αυτή περιοχή περιλαμβάνει το σχεδιασμό του κυκλώματος διακλάδωσης και τη μέθοδο βραχυχρόνιων διακυμάνσεων της ρευστότητας του κυκλώματος διακλάδωσης.

## **B) Ενεργητικός έλεγχος με πιεζοηλεκτρικά υλικά**

Οι πιεζοηλεκτρικές δυνατότητες των κατασκευών χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στον έλεγχο ή την ακύρωση του ήχου και της δόνησης σε εύρος χαμηλών ως μεσαίων συχνοτήτων. Χρησιμοποιούν για να γεφυρώσουν τον περιορισμό της συμβατικής μεθόδου των παθητικών τεχνικών απόσβεσης, οι οποίες είναι αποτελεσματικές μόνον όταν χρησιμοποιούνται σε υψηλής συχνότητας εφαρμογές. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών υλικών για ενεργό ήχο και έλεγχο των κραδασμών, όπως είναι οι λεπίδες του ελικοπτερου και τα βαρέλια όπλων για τη μείωση των κραδασμών των κατασκευών, έναν ενεργό έλεγχο του ήχου που προέρχεται από μια κατασκευή, και έλεγχο ακτινοβολίας ήχου από έναν αρμονικά ενθουσιώδη πίνακα με τη χρήση πολλαπλών πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών. Υφίστανται δύο σημαντικά ζητήματα που πρέπει να εξεταστούν σχετικά με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών ως ενεργοποιητών για τον ενεργό έλεγχο συστημάτων: (1) συνήθως απαιτούν μεγάλη ποσότητα ρεύματος για λειτουργία και (2) η πολυπλοκότητα του υλικού που εμπλέκεται με τον ενεργό έλεγχο (προσθήκη υλικού και το σχεδιασμό ελέγχου νόμου, κλπ.).

Το ερευνητικό ενδιαφέρον αυτής της περιοχής περιλαμβάνει το πώς να διαμορφώσουμε τις δυναμικές ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών δυνατοτήτων των κατασκευών, τη βέλτιστη τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών, τη βέλτιστη επιλογή των αριθμών ενεργοποιητών PZT, το σχεδιασμό ελέγχου, τη μέθοδο ελέγχου συντονισμού, τη διαχείριση ενέργειας, κλπ.

## **Γ) Υβριδικός έλεγχος με πιεζοηλεκτρικά υλικά**

Υπάρχουν επίσης μερικές εφαρμογές όταν ενεργό-παθητικά υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί η καλύτερη λύση για την καταστολή των κραδασμών. Σ' ένα υβριδικό σύστημα ελέγχου κραδασμών, ένα ενεργό σύστημα ελέγχου με μια πηγή τάσης είναι ενσωματωμένο σε ένα παθητικό κύκλωμα διακλάδωσης. Ένα πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος έγκειται στην αύξηση της συνολικής σταθερότητας του ενεργού συστήματος ελέγχου.

Για οποιαδήποτε μέσα από τα παραπάνω, είναι αναγκαίο να έχουμε ακριβή και αξιόπιστα αριθμητικά μοντέλα για το σχεδιασμό και την ανάλυση των πιεζοηλεκτρικά ενεργοποιημένων κατασκευών. Μερικά από τα πρώτα μοντέλα που χρησιμοποίησαν αυτή την επαγόμενη ένταση με τους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές ως εφαρμοσμένη ένταση που συνέβαλε στη συνολική ένταση των μη ενεργών δομών παρόμοια με μια συνεισφορά θερμικής έντασης. Για την εύρεση αναλυτικών λύσεων, ηλεκτρολογική και μηχανολογική ισορροπία ή διακυβέρνηση εξισώσεων πρέπει να επιλυθούν για ένα

σύνολο συνοριακών συνθηκών. Είναι γενικά αναγνωρισμένο ότι θεωρητικά μοντέλα εφαρμόζονται μόνο σε πολύ περιορισμένο εύρος καλώς ορισμένων γεωμετριών και συνοριακών συνθηκών. Για πρακτικές εφαρμογές, αριθμητικές μέθοδοι όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) χρησιμοποιούνται συχνά για τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση διάφορων σχεδιασμών έξυπνων κατασκευών.

Υπάρχουν πλαστικοποιημένου τύπου και διακριτού τύπου έξυπνες κατασκευές για διαρθρωτικό ήχο και έλεγχο κραδασμών στην πράξη. Αυτό σημαίνει ότι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά καλύπτουν ή είναι ενσωματωμένα σε ολόκληρη την κατασκευή. Δηλαδή τα πιεζοηλεκτρικά υλικά καταλαμβάνουν ένα σχετικά μικρό εμβαδόν της κατασκευής. Αυτές οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης και τεχνικές ανάλυσης διαφέρουν σημαντικά μεταξύ του πλαστικοποιημένου και του διακριτού τύπου έξυπνων κατασκευών.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρέχει μια επισκόπηση των διάφορων αριθμητικών μεθόδων μοντελοποίησης των δυναμικών ιδιοτήτων των πιεζοηλεκτρικά ενεργοποιημένων έξυπνων κατασκευών και των συναφών θεμάτων. Η ανασκόπηση είναι σύντομη και δεν έγινε καμία προσπάθεια να είναι εξαντλητική. Οργανώνεται στις ακόλουθες ενότητες: (1) γραμμική θεωρία της ηλεκτροδυναμικής που περιγράφει τις βασικές εξισώσεις που διέπουν τη μοντελοποίηση των έξυπνων κατασκευών, (2) μεθόδους για πλαστικοποιημένου τύπου έξυπνες κατασκευές που περιλαμβάνουν τις ελαστικές θεωρίες και θεωρίες πλακών εκτός από τη συζευγμένη πολυστρωματική θεωρία (3) τις μεθόδους για διακριτού τύπου έξυπνες κατασκευές που περιλαμβάνουν την ισοδύναμη γραμμή στιγμιαίας προσέγγισης, τη μέθοδο της ενέργειας, μαζί με την υποτιθέμενη μέθοδο λειτουργίας και προσέγγισης πεπερασμένου στοιχείου και (4) νέα ερευνητικά πεδία σε έξυπνες κατασκευές, τα οποία περιλαμβάνουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών, ακριβή περιγραφή των ηλεκτρικών δυναμικών στις πιεζοηλεκτρικές στρώσεις, κλπ.

### **Γραμμική θεωρία της ηλεκτροδυναμικής**

Η γραμμική θεωρία της ηλεκτροδυναμικής αντιμετωπίζει όλους τους ελαστικούς, πιεζοηλεκτρικούς και διηλεκτρικούς συντελεστές ως σταθερές ανεξάρτητα από το μέγεθος και τη συχνότητα της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης και των ηλεκτρικών πεδίων. Μια διέπουσα εξίσωση της απουσίας των δυνάμεων σώματος και των δυνάμεων που επιβαρύνουν αποτελείται από εξισώσεις κίνησης των τάσεων:

$$\rho \ddot{\mathbf{U}} - \mathbf{L}_d^T \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}$$

Μία εξίσωση της ηλεκτροστατικής και των σχέσεων ηλεκτρικού πεδίου – ηλεκτρικού δυναμικού είναι:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

και

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi$$

όπου

η συμβολική τελεία δηλώνει παραγωγή ως προς τη χρονική στιγμή  $t$

ο εκθέτης  $T$  τη μεταφορά

$\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού ( $\text{kg/m}^3$ )

$U$  είναι το διάνυσμα μετατόπισης των σωματιδίων (m)

$\sigma$  είναι το διάνυσμα τάσης ( $\text{N/m}^2$ )

$L_d$  ο χειριστής [17,18]

$D$  το ηλεκτρικό διάνυσμα μετατόπισης ( $\text{C/m}^2$ )

$E$  το ηλεκτρικό διάνυσμα πεδίου ( $\text{V/m}$ )

$\phi$  το βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό (V)

Οι συστατικές σχέσεις για ένα πιεζοηλεκτρικό στρώμα είναι:

$$\sigma = c\varepsilon - e^T E$$

και

$$\mathbf{D} = e\varepsilon + gE$$

όπου

$c$  είναι το μητρώο δυσκαμψίας ( $\text{N/m}^2$ ) σε σταθερή δύναμη ηλεκτρικού πεδίου

$g$  το διηλεκτρικό μητρώο ( $\text{F/m}$  ή  $\text{C/Vm}$ ) σε σταθερή μηχανική ένταση

$e$  το πιεζοηλεκτρικό μητρώο τάσης ( $\text{N/mV}$  ή  $\text{C/m}^2$ )

Ο συνδυασμός των ανωτέρω εξισώσεων δίνει τις τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις της γραμμικής πιεζοηλεκτρικής συνέχειας σε όρους των τεσσάρων εξαρτημένων μεταβλητών (τρεις συνιστώσες μετατοπίσεων και ένα ηλεκτρικό δυναμικό) ως

$$L_d^T c L_d U + L_d^T e^T \nabla \phi = \rho \ddot{U}$$

$$\nabla \cdot (e L_d U - g \nabla \phi) = 0$$

Με την παρουσία των ορίων, οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες πρέπει να εφάπτονται στις παραπάνω εξισώσεις. Εάν υπάρχει μια υλική επιφάνεια της ασυνέχειας, σε όλη την επιφάνεια υπάρχουν οι συνθήκες συνέχειας των τάσεων, μετατοπίσεις, ηλεκτρικές μετατοπίσεις και ηλεκτρικά δυναμικά.



## **Μέθοδοι για Έξυπνες Κατασκευές Πλαστικοποιημένου Τύπου**

Οι εξελίξεις των πιεζοηλεκτρικών μοντέλων πλαστικοποιημένου τύπου ικανοποιούν την ανάγκη για πιο ακριβή μοντέλα μηχανικού για να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά σύνθετων ελασμάτων και η ανάγκη για πιο ακριβή ηλεκτροελαστικά μοντέλα για λογαριασμό των συζευγμένων επιπτώσεων μεταξύ των ηλεκτρικών και μηχανικών πεδίων μέσα στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Τα θεμελιώδη έργα από προηγούμενους ερευνητές παρέχουν πολλές από τις απαραίτητες θεωρητικές βάσεις για τη μοντελοποίηση της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς των έξυπνων κατασκευών πλαστικοποιημένου τύπου.

### **1. Ελαστική Θεωρία**

Η ελαστική θεωρία χρησιμοποιεί την ελαστική μέθοδο διάδοσης κυμάτων για καθορισμό της μεταβλητής κατάστασης σχέσης μεταξύ ανώτερης και κατώτερης επιφάνειας ενός ελάσματος. Ελαστική θεωρία μπορεί να παρέχει μια ακριβή λύση ενός προβλήματος, που να ικανοποιεί τις κυρίαρχες εξισώσεις σε κάθε σημείο του χώρου και τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να εξασφαλίσουμε μια επίλυση που διέπει τις εξισώσεις εντός ενός πιεζοηλεκτρικού στρώματος στο πεδίο των συχνοτήτων.

#### **A) Μέθοδος Μεταφοράς Μητρώων**

Επιβάλλεται η συνέχεια των μετακινήσεων, τάσεων, και ηλεκτρικών παραμέτρων στην επιφάνεια διαφόρων τμημάτων. Στην κορυφή και στις κάτω επιφάνειες του ελάσματος, οι κανονικές μετατοπίσεις, τάσεις, και ηλεκτρικές μεταβλητές πρέπει να είναι συνεχείς, επίσης. Η προσέγγιση συνοριακής συνθήκης αποτελεί τη βάση της μεθόδου μεταφοράς μητρώων και της σύνθετης επιφανειακής μεθόδου τανυστών.

#### **B) Σύνθετη Επιφανειακή Μέθοδος Τανυστών**

Μια σημαντική διατύπωση ενός μητρώου των πιεζοηλεκτρικών σύνθετων υλικών φαίνεται να είναι ο φορμαλισμός του οκτώ-διάστατου διανύσματος κατάστασης που προτάθηκε αρχικά από τον Kraut. Στην καρδιά αυτής της διατύπωσης είναι το δημοφιλές γεγονός ότι οι συνήθεις διαφορικές εξισώσεις μπορούν να μετατραπούν σε ένα σύνολο εξισώσεων πρώτης τάξεως.

Ως επέκταση, ο Honein προτείνει μια συστηματική μεθοδολογία σχετικά με την αντίσταση της τανυστικής επιφάνειας. Η αντίσταση της τανυστικής επιφάνειας συσχετίζει τα συστατικά της σωματιδιακής μετατόπισης και της κανονικής συνιστώσας της ηλεκτρικής μετατόπισης σε μία επιφάνεια με το ηλεκτρικό δυναμικό και το στοιχείο της έλξης που δρα στην ίδια επιφάνεια. Όταν ο επιφανειακός τανυστής εμπέδησης λαμβάνεται για ένα ενιαίο στρώμα, ένας ενιαίος αναδρομικός αλγόριθμος επιτρέπει την αξιολόγηση του επιφανειακού τανυστή εμπέδησης για οποιοδήποτε αριθμό στρωμάτων.

Η προσέγγιση του επιφανειακού τανυστή εμπέδησης προτείνεται για να ξεπεραστεί μια αριθμητική δυσκολία που υπάρχει όταν πάρουμε τη λύση για πολλά στρώματα ως το προϊόν των λύσεων του κάθε στρώματος. Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για να επιλύσει την ακουστική αντανάκλαση και το πρόβλημα μετάδοσης, όταν μια κατασκευή με πιεζομετρικούς ενεργοποιητές υποβάλλεται σε μια ακουστική συχνότητα κύματος.

Τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης βρίσκονται στο ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για διάδοση κυμάτων (θεωρία υψηλής τάξεως) στην πιεζοηλεκτρική στρώση, αλλά και για την ανάλυση των κραδασμών (θεωρία χαμηλής τάξεως) των γενικών πιεζοηλεκτρικών ελασμάτων.

## **2.Κλασική Θεωρία Επίπεδων Ελασμάτων**

Η Κλασική Θεωρία Επίπεδων Ελασμάτων (CLPT) είναι μια επέκταση της κλασικής θεωρίας πλακών σε σύνθετα ελάσματα. Ο Lee και ο Moon χρησιμοποίησαν τις παραδοχές της CLPT για να αντλήσουν μια απλή θεωρία για ένα πιεζοηλεκτρικό έλασμα. Ο Reddy παρουσίασε τη θεωρητική διατύπωση των επίπεδων ελασμάτων με πιεζοηλεκτρικά στρώματα σαν αισθητήρες ή ενεργοποιητές. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν μοντέλα CLPT και παραλλαγές τους για να σχεδιάσουν πιεζοηλεκτρικά ελάσματα για διαφορετικές εφαρμογές. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποίησαν απλουστευμένες προσεγγίσεις για το χαρακτηρισμό του πεδίου προκαλούμενης έντασης και παραγόμενα ηλεκτρικά πεδία που παράγονται λόγω μιας εφαρμοζόμενης τάσης ή εξωτερικής φόρτισης. Η CLPT υποθέτει ότι η υπόθεση Kirchhoff ισχύει και για το έλασμα.

Η CLPT συνεπάγεται αυτό για την περίπτωση τόσο επίπεδης έντασης όσο και επίπεδης τάσης. Ωστόσο, για πρακτικούς λόγους, χρησιμοποιεί τον περιορισμό του κάθε στρώματος, ο οποίος είναι σε κατάσταση επίπεδης τάσης, επειδή τα περισσότερα ελάσματα είναι τυπικά λεπτά σε σύγκριση με τις εντός του επιπέδου διαστάσεις. Είναι μία σχετική υπόθεση στην ίδρυση των συστατικών σχέσεων για το έλασμα ή μια ελασματοποιημένη κατασκευή.

## **3.Θεωρία Διατμητικής Παραμόρφωσης Πρώτης Τάξεως (FSDT)**

Για την ενίσχυση του μοντέλου της CPLT, ένα εναλλακτικό μοντέλο, αναπτύχθηκε η θεωρία διατμητικής παραμόρφωσης πρώτης τάξεως, η οποία ανήκει επίσης στην ιεραρχία των ισοδύναμων μονοστρωματικών θεωριών ελασμάτων. Στην FSDT, κυκλοφόρησε η τρίτη υπόθεση του Kirchhoff. Αυτό σημαίνει ότι τα εγκάρσια φυσιολογικά δεν παραμένουν κάθετα στη μεσοεπιφάνεια μετά την παραμόρφωση. Ονομάζεται επίσης ως θεωρία πλακών Reissner-Mindlin ή μια θεωρία σταθερής γωνίας κλίσης. Σημειώνεται ότι οι συντελεστές διόρθωσης κλίσης υιοθετήθηκαν κανονικά κατά τον υπολογισμό των εγκάρσιων συνισταμένων διατμητικής δύναμης για να διορθώσουν τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής κατάστασης τάσης και της σταθερής κατάστασης τάσης που προβλέπεται από το FSDT.

#### **4. Θεωρία Διατμητικής Παραμόρφωσης Τρίτης Τάξεως (TSDT)**

Στο μοντέλο FSDT, οι διατμητικές συντελεστές διορθώσεως δεν είναι εύκολο να καθοριστούν. Για να επιτευχθεί καλύτερη προσέγγιση, έχουν αναπτυχθεί υψηλότερης τάξης επεκτάσεις του πεδίου μετατοπίσεων. Μια θεωρία διατμητικής παραμόρφωσης τρίτης τάξεως (TSDT) φιλοξενεί το μηδενισμό των εγκάρσιων διατμητικών παραμορφώσεων στην κορυφή και τον πάτο των επιφανειών ενός ελάσματος. Ο Reddy παρουσίασε τις λύσεις Navier και τα πρότυπα πεπερασμένων στοιχείων των CLPT και TSDT.

#### **5. Συζευγμένη Πολυστρωματική Θεωρία**

Θεωρίες διακριτών στρωμάτων και πολυστρωματικές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί για τη στατική και δυναμική ανάλυση των πιεζοηλεκτρικών ελασμάτων. Σε αντίθεση με τα απλουστευμένα ηλεκτρικά πεδία και τα πεδία μετατοπίσεων διαμέσου του πάχους του ελάσματος στις παραπάνω ισοδύναμες μονοστρωματικές πιεζοηλεκτρικές θεωρίες ελασμάτων, οι μηχανικές μετατοπίσεις και το ηλεκτρικό δυναμικό υποτίθεται ότι είναι τμηματικά συνεχή κατά μήκος του πάχους του ελάσματος στις πολυστρωματικές θεωρίες. Αυτές οι θεωρίες παρέχουν μια πολύ πιο σωστή κινηματικά εκπροσώπηση της στρέβλωσης της εγκάρσιας τομής και της σύλληψης με μη γραμμική μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού διαμέσου του πάχους που σχετίζονται με παχιά ελάσματα. Οι εξελίξεις της θεωρίας πολυστρωματικού υλικού για ένα έλασμα με ενσωματωμένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Συγκρίσεις των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων χωρίς κραδασμούς από την πολυστρωματική θεωρία με τις ακριβείς λύσεις για απλά υποστηριζόμενα πιεζοηλεκτρικά ελάσματα αναδεικνύει τη βελτιωμένη ακρίβεια και ευρωστία της πολυστρωματικής θεωρίας υπέρ των CLPT και FSDT για πιεζοηλεκτρικά ελάσματα.

Ο Tanī και Liu αρχικά πρότεινε μια αριθμητική μέθοδο για τη διερεύνηση των επιφανειακών κυμάτων σε λειτουργικά βαθμωτά πιεζοηλεκτρικά επίπεδα. Ο Liu και Achenbach ονόμασε τη μέθοδο, μέθοδο λωριδωτών στοιχείων (SEM). Η τεχνική έχει ένα σαφές πλεονέκτημα υπέρ της μεθόδου πεπερασμένου στοιχείου για πολυεπίπεδες κατασκευές όσον αφορά τις απαιτήσεις αποθήκευσης. Πρόσφατα, ο Han επέκτεινε την SEM για ανάλυση των ιδιοτήτων των επιφανειακών κυμάτων σε ένα υβριδικό πολυστρωματικό πιεζοηλεκτρικό κυκλικό κύλινδρο.

#### **Μέθοδοι για Διακριτού Τύπου Έξυπνες Κατασκευές**

Διακριτά μονολιθικά κομμάτια από πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση και για τους σκοπούς του ελέγχου, αντί να καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια με τη μορφή των στρωμάτων λόγω βάρους και δυσκολίας εκτιμήσεων της κατασκευής. Οι διακριτές κηλίδες μπορεί είτε να επισυνάπτονται στην κατασκευή όπως στη βιβλιογραφία ή να ενσωματώνονται εντός του υποστρώματος, όπως στην εργασία.

## 1. Μέθοδος Ροπής Ισοδύναμης Γραμμής

Σ' αυτή την προσέγγιση, διεξήχθη μια στατική μελέτη της συμπεριφοράς των δίδυμων, συμμετρικών, πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών που είναι συνδεδεμένοι σε μια κατασκευή. Έχει αποδειχθεί ότι ένας τέλει συνδεδεμένος ενεργοποιητής ήταν ισοδύναμος προς εξωτερικές γραμμές ροπών που ενεργούν κατά μήκος των ορίων των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Τα αντιπροσωπευτικά άρθρα είναι από τους Crawley, deLuis και Δημητριάδη. Σε όλα αυτά τα προηγούμενα μοντέλα, η συνήθης υπόθεση ήταν ότι αν δεν είχε εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, η παρουσία του πιεζοηλεκτρικού υλικού πάνω ή μέσα στο υπόστρωμα δε μεταβάλλει τις συνολικές δομικές ιδιότητες σημαντικά. Είναι επίσης δεδομένο ότι το πάχος του συνδετικού κολλώδους στρώματος ήταν αμελητέο και προκάλεσε αμελητέες αλλαγές ιδιοτήτων.

Ο Crawley και ο deLuis παρουσίασαν μια αυστηρή μελέτη της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης-δυναμικού των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που είναι συνδεδεμένα και ενσωματωμένα σε μονοδιάστατες δοκούς. Μια σημαντική παρατήρηση ήταν ότι η αποτελεσματικότητα των ροπών που προκύπτουν από τους πιεζοενεργοποιητές μπορεί να θεωρηθεί ότι συγκεντρώνεται στις δύο άκρες των ενεργοποιητών, όταν το συνδετικό στρώμα υποτίθεται απείρως λεπτό. Ως προέκταση της μονοδιάστατης θεωρίας, ο Δημητριάδης ανέπτυξε τα διδιάστατα πιεζοηλεκτρικά πεπερασμένα στοιχεία που είναι τέλεια συνδεδεμένα με τις άνω και κάτω επιφάνειες του ελαστικού επιπέδου με στατική και δυναμική ανάλυση. Τα φορτία που προκαλούνται από τον πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή στην υποστηριζόμενη λεπτή ελαστική κατασκευή εκτιμώνται στην έρευνά τους. Έτσι, το ισοδύναμο μέγεθος των ροπών των άκρων εφαρμόζεται στο επίπεδο για να αντικαταστήσει το μάλωμα του ενεργοποιητή έτσι ώστε η καμπτική τάση στην επιφάνεια του επιπέδου να είναι ίση με την τάση διεπαφών στο επίπεδο όταν το μάλωμα ενεργοποιείται.

Όπως προαναφέρθηκε, η προσέγγιση χρησιμοποίησε την επαγόμενη ένταση με τους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές ως μια εφαρμοσμένη ένταση που συμβάλλει στη συνολική ένταση των ανενεργών κατασκευών, παρόμοια με μια θερμική συμβολή έντασης. Αυστηρά μιλώντας, δεν είναι μια πλήρως συζευγμένη ανάλυση μεταξύ των μηχανικών και πιεζοηλεκτρικών κατασκευών. Θεωρεί μόνο το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα. Ο ηλεκτρομηχανολογικός συντελεστής  $d_{31}$  είναι η μόνη πηγή σύζευξης μεταξύ των ηλεκτρικών και των μηχανικών πεδίων μετατόπισης. Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει αυτό το αναλυτικό μοντέλο για διάφορες εφαρμογές όπου τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των δοκών, πλακών, και κελυφών. Ωστόσο, σε πολλές γεωμετρίες συσκευών, όλα τα στοιχεία των πιεζοηλεκτρικών τανυστών συζεύγονται στην ένταση και στα ηλεκτρικά πεδία και η υπόθεση ότι μόνο το  $d_{31}$  παίζει ρόλο δεν ισχύει πλέον.

## **2. Αρχή του Hamilton με μια διατύπωση Rayleigh-Ritz**

Ο Hagoood και άλλοι μελέτησαν την απόσβεση των κραδασμών των κατασκευών με πιεζοηλεκτρικά υλικά και παθητικά ηλεκτρικά δίκτυα. Εξήγαγαν ένα αναλυτικό μοντέλο για ένα ηλεκτροελαστικό σύστημα με πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιώντας την Αρχή του Hamilton με μια διατύπωση Rayleigh-Ritz. Η απαίτηση ότι όλα τα συζευγμένα μεταξύ πιεζοηλεκτρικών συσκευών και υποστρώματος πρέπει να συμπεριληφθούν στη διατύπωση διευκολύνθηκε σημαντικά από τη μεταβολική Αρχή του Hamilton ή ενεργειακές μεθόδους, οι οποίες είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για πολύπλοκες κατασκευές επειδή οι εξισώσεις μηχανικής και ηλεκτρικής ισορροπίας δε χρειάζεται να επιλυθούν ρητά. Η φυσική της συνολικής κατασκευής έχει πλήρως αντιπροσωπευθεί στα ενεργειακά ολοκληρώματα και δεν υπάρχει καμία ανάγκη να παραχθούν εξισώσεις που βασίζονται σε δυνάμεις και ροπές. Η προκύπτουσα εξίσωση κίνησης επιλύεται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο Rayleigh-Ritz.

Ο Hagoood και άλλοι διαπίστωσαν ότι οι ιδιότητες μετατροπής της πιεζοηλεκτρικής ενέργειας ιδιαίτερα είναι συζευγμένες με τη δυναμική του ηλεκτρικού κυκλώματος και το ελαστικό σύστημα. Μελέτησαν αυτή τη σύζευξη για συμμετρικούς πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές για να προσθέσουν απόσβεση στους κατασκευαστικούς τρόπους μιας προεξέχουσας δοκού. Οι Gibbs και Fuller ανέπτυξαν ένα αναλυτικό στατικό μοντέλο για να περιγράψουν την αντίδραση μιας άπειρης δοκού που υποβάλλεται σε μία ασύμμετρη κίνηση που προκαλείται από ένα τέλεια συνδεδεμένο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Ο Plantier και άλλοι παρήγαγαν ένα δυναμικό μοντέλο για μία δοκό που κατευθύνεται από ένα μονό ασύμμετρο πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή. Στο μοντέλο τους περιλαμβάνεται η συγκολλητική στρώση συνδέσεως, δηλαδή, ο ενεργοποιητής δεν υποτίθεται ότι είναι απόλυτα συνδεδεμένος με τη βάση της κατασκευής. Ο Lam και οι άλλοι παρήγαγαν τις εξισώσεις ενέργειας μέσω εικονικής εργασίας πρώτα. Οι τρόποι μεθόδων που θεώρησαν χρησιμοποιήθηκαν για να διακριτοποιήσουν τις εξισώσεις ενέργειας και η εξίσωση του Lagrange χρησιμοποιήθηκε για να ληφθούν οι εξισώσεις κίνησης για διαφορετικές μεταχειρίσεις.

## **3. Προσέγγιση Πεπερασμένου Στοιχείου και άλλες Αριθμητικές Μέθοδοι**

Για διακριτά πιεζοηλεκτρικά μπαλώματα ενσωματωμένα ή συνδεδεμένα με δέσμη σε δοκούς και πλάκες κατασκευών, οι ερευνητές έχουν ως επί το πλείστον χρησιμοποιήσει αριθμητικές μεθόδους, όπως η μέθοδος του πεπερασμένου στοιχείου αφού η απόκτηση ακριβών λύσεων είναι δύσκολη. Ένα πιθανό πλεονέκτημα της χρήσης του μοντελου πεπερασμένου στοιχείου για πιεζοηλεκτρικές συσκευές είναι ότι τα πεδία στο υλικό μπορεί να περιγραφούν επακριβώς χωρίς να απλοποιούνται οι παραδοχές.

Οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων τέθηκαν σε εφαρμογή για τις πιεζοηλεκτρικές κατασκευές από τον Allik, ο Ha, ο Rao και ο Sunar ανέπτυξαν μια μέθοδο πεπερασμένου στοιχείου για να μελετήσουν τη δυναμική καθώς και τη στατική απόκριση των πλακών που περιέχουν καταναμημένα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά με βάση

τις μεταβολικές αρχές. Ο Hwang χρησιμοποίησε ένα τετράπλευρο στοιχείο τεσσάρων κόμβων με βάση την κλασική θεωρία ελάσματος με την επαγόμενη ενεργοποίηση της έντασης και την Αρχή του Hamilton. Υποθέτουμε ότι δεν εφαρμόζεται πεδίο τάσεων στο στρώμα του ενεργοποιητή και κατά συνέπεια οι ροπές του ισοδύναμου ενεργοποιητή ανά μονάδα μήκους βρέθηκαν ως εξωτερικά φορτία διέγερσης. Ο Lam και άλλοι επίσης ανέπτυξαν ένα μοντέλο πεπερασμένου στοιχείου με βάση την κλασική θεωρία των επίπεδων ελασμάτων για τον ενεργό έλεγχο κραδασμών μιας σύνθετης πλάκας που περιέχει κατανεμημένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές. Ο Zhou χρησιμοποίησε την ίδια ιδέα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων των πιεζοηλεκτρικών σύνθετων ελασμάτων που βασίζεται στην Αρχή του Hamilton, καθώς και στις θεωρίες CLPT, FSDT και TSDT αντιστοίχως.

Ο Shen ανέπτυξε μια μονοδιάστατη διατύπωση πεπερασμένου στοιχείου για την καμπτική κίνηση μιας δοκού που περιέχει κατανεμημένες πιεζοηλεκτρικές συσκευές. Στο έργο του, η γενικευμένη μεταβολική αρχή χρησιμοποιήθηκε για να συμπεριλάβει την εικονική εργασία που έγινε από τις αδρανειακές και ηλεκτρικές δυνάμεις για να πάρει τη λειτουργική αρχή. Ο Chen και άλλοι παρουσίασαν τις γενικές διατυπώσεις πεπερασμένων στοιχείων για πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές, χρησιμοποιώντας την αρχή της εικονικής εργασίας.

Ο Kim και άλλοι ανέπτυξαν ένα στοιχείο μετάβασης για να συνδέσει τα τρισδιάστατα στερεά στοιχεία στην πιεζοηλεκτρική περιοχή με τα στοιχεία με επίπεδα κελύφη που χρησιμοποιήθηκαν για την πλάκα. Υιοθέτησαν κάποιες ειδικές τεχνικές για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα και η ανακρίβεια της μοντελοποίησης μιας πλάκας με τρισδιάστατα στοιχεία. Αυτή η προσέγγιση έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με την ακρίβεια στη μοντελοποίηση των πιεζοηλεκτρικών μπαλωμάτων και την υπολογιστική οικονομία για την επίπεδη κατασκευή.

Επιπλέον, ο Liu είχε προτείνει αρχικά μια μέθοδο σημειακής παρεμβολής (PIM), που ανήκει στις πεπλεγμένες ή μη πεπλεγμένες μεθόδους. Χρησιμοποιεί τις κομβικές τιμές στον τοπικό τομέα υποστήριξης για να παρεμβάλει τις λειτουργίες του σχήματος. Για την καλύτερη δυνατή γνώση των συγγραφέων, ο Liu και άλλοι αρχικά ασχολήθηκαν με ανάλυση πιεζοηλεκτρικής συσκευής με μηχανικά και ηλεκτρικά προβλήματα που συνδέονται με τη χρήση της μεθόδου σημειακής παρεμβολής. Σε αυτή τη μέθοδο, ο τομέας του προβλήματος αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο αυθαίρετα κατανεμημένων κόμβων. Μια πολυωνυμική βάση χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των λειτουργιών σχήματος, που διαθέτουν ιδιότητες δέλτα λειτουργίας. Κατασκευάστηκε πιεζοηλεκτρική δομή με αυθαίρετο σχήμα χρησιμοποιώντας πολυώνυμο PIM σε συνδυασμό με μεταβολική αρχή και γραμμικές συστατικές πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις. Αριθμητικά παραδείγματα παρέχουν σταθερή επικύρωση της προτεινόμενης μεθόδου. Διαπιστώθηκε ότι η παρούσα μέθοδος είναι εύκολο να εφαρμοστεί, και πολύ ευέλικτη και σταθερή για στατική και δυναμική ανάλυση των πιεζοηλεκτρικών κατασκευών με αυθαίρετο σχήμα και διαφορετικές μηχανικές ή ηλεκτρικές συνοριακές συνθήκες.

## Πιθανές Περιοχές Έρευνας στις Έξυπνες Κατασκευές

### 1.Μη Γραμμικά Χαρακτηριστικά των Πιεζοηλεκτρικών Υλικών

Μεταξύ των παρόντων διαθέσιμων αισθητήρων και ενεργοποιητών, οι μικρότεροι εξ αυτών είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών. Ωστόσο, η πρόοδος προς την κατεύθυνση των ευφυών κατασκευών απαιτεί από εμάς να αναπτύξουμε έξυπνα συστήματα υλικών που είναι της τάξεως των μερικών μικρομέτρων. Αυτή η μείωση στο μέγεθος έχει τεράστιο τεχνολογικό όφελος· ωστόσο σαφής κατανόηση της ακεραιότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική και βέλτιστη χρήση των εν λόγω υλικών συστημάτων. Όσο οι διαστάσεις γίνονται μικρότερες, τα προκαλούμενα ηλεκτρομηχανικά πεδία διευρύνονται. Επομένως, η ευκολία της γραμμικότητας στη μοντελοποίηση θα πρέπει να εγκαταλειφθεί, και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη υλικές και γεωμετρικές μη γραμμικότητες. Επιπλέον, πιεζοηλεκτρικά υλικά παρουσιάζουν μόνο μια γραμμική σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού πεδίου και της έντασης για χαμηλές τιμές πεδίου (έως 100 V / mm). Η σχέση συμπεριφέρεται μη γραμμικά για τα μεγάλα πεδία, το υλικό παρουσιάζει υστέρηση, επιπλέον, πιεζοηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν διηλεκτρική γήρανση και συνεπώς στερούνται αναπαραγωγιμότητας των εντάσεων.

Χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές, οι Shi και Atluri διεξήγαγαν μελέτες προκειμένου να ελεγχθεί η μη γραμμική δυναμική απόκριση ενός χωροδικτύωματος. Με την ενσωμάτωση της επίδρασης της μεγάλης ανίχνευσης και επίπεδα φορτία λόγω των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών, ο Pai και άλλοι ανέπτυξαν μια πλήρη μη γραμμική θεωρία για το δυναμικό και ενεργητικό έλεγχο μιας πλαστικοποιημένης σύνθετης πλάκας με ενσωματωμένους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές και υπό συνθήκες αισθητήρων μεγάλης περιστροφής και κραδασμού μικρής έντασης. Ο Royston και ο Houston παρουσιάζουν τη μη γραμμική κραδασμική συμπεριφορά ενός 1-3 πιεζοκεραμικού σύνθετου θεωρητικά και πειραματικά. Στο έργο τους, το θεωρητικό μοντέλο για την ηλεκτροελαστική συμπεριφορά του 1-3 σύνθετου ακολουθεί η συμβατική υπόθεση που έγινε από προηγούμενους ερευνητές, αλλά περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους να λάβουμε υπόψη για την υστέρηση στην ενσωματωμένη φάση PZT .

### 2.Ακριβής Περιγραφή των Ηλεκτρικών Δυναμικών στις Πιεζοηλεκτρικές Στρώσεις

Σημειώνεται ότι σε ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας που δημοσιεύεται για τα μηχανικά μοντέλα για την ανάλυση της συζευγμένης κατασκευής, υποτίθεται μια κατανομή ενός σταθερού ηλεκτρικού δυναμικού του συνόλου του πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή στη διάσταση του μήκους του και μία γραμμική κατανομή στη διάσταση του πάχους. Ωστόσο, για να ικανοποιήσουμε την εξίσωση Maxwell, δε μπορεί να υποθεθεί μια κατανομή ενός σταθερού ηλεκτρικού δυναμικού κατά τη διαμήκη

διεύθυνση, αλλά μάλλον λαμβάνεται με την επίλυση των συζευγμένων διεπουσών εξισώσεων.

Το πεδίο μέσα στις στρώσεις ενός πιεζοηλεκτρικού ελάσματος προηγουμένως εξετάστηκε από το Ray, το Roh και το Heyliger χρησιμοποιώντας θεωρίες πλήρους ελαστικότητας, χωρίς προσεγγίσεις σε μηχανικά και ηλεκτρικά πεδία. Μια ακριβής λύση που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας ακριβείς θεωρίες ελαστικότητας έδειξε ότι οι κατανομές του ηλεκτρικού και ελαστικού πεδίου ήταν συχνά κακώς σχεδιασμένες με χρήση απλουστευμένων θεωριών. Έδειξαν ότι το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό των στρωμάτων του αισθητήρα δεν ήταν μηδενικό και οι κατανομές τόσο του ηλεκτρικού όσο και του μηχανικού πεδίου ήταν προφανώς επηρεασμένες από τις σχετικές τιμές των διηλεκτρικών σταθερών των στρωμάτων σε ένα σταυρόκλωνο έλασμα PVDF τριών στρώσεων.

Για να αυξηθεί το μέγεθος της απόκλισης των ηλεκτρικών και μηχανικών πεδίων μέσα στις στρώσεις, πρέπει να χρησιμοποιούνται θεωρίες υψηλής τάξης στα μοντέλα ελάσματος. Ο Bisegna και ο Maceri έδειξαν ότι όταν ο λόγος του πάχους προς το πλάτος της πλάκας είναι μεγαλύτερος ή ίσος με το 1/5, οι FSDT δίνουν αποτελέσματα, τα οποία διαφέρουν από την ακριβή λύση κατά 20% για μετατοπίσεις, ηλεκτρικό δυναμικό, και συστατικά των τάσεων εντός του επιπέδου. Πιο πρόσφατα, ο Yang περιέλαβε ανώτερης τάξης (τετραγωνική) παραλλαγή ηλεκτρικού δυναμικού διαμέσου του πάχους των ενεργοποιητών και εξισώσεις δύο διαστάσεων για την καμπτική κίνηση των ελαστικών πλακών με μερικώς ηλεκτροδιοποιημένους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές που συνδέονται με τις επιφάνειες της κορυφής και του πυθμένα μιας παχιάς πλάκας. Αν και αμελητέα για τους ενεργοποιητές, αυτή η επίδραση ηλεκτρικής συμπεριφοράς ανώτερης τάξης μέσω του πάχους πρέπει να ληφθεί υπόψη για παχείς ενεργοποιητές. Ο Tiersten εξήγαγε τις προσεγγιστικές εξισώσεις για την εκτατική και καμπτική κίνηση μιας λεπτής πιεζοηλεκτρικά πλάκας που υποβλήθηκε σε μεγάλα ηλεκτρικά πεδία. Μέχρι κυβικής τάξεως όροι περιλαμβάνονται στην επέκταση του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος του πάχους της πλάκας για να περιγράψουν την ηλεκτρική συμπεριφορά υψηλότερης τάξεως, και έδειξε ότι για μια πολύ λεπτή πλάκα, οι τετραγωνικοί και κυβικοί όροι στην επέκταση μπορούν να αγνοηθούν.

Ο Wang και Quek υπέθεσαν ημιτονοειδή κατανομή κατά την εγκάρσια κατεύθυνση για την περίπτωση των βραχυκυκλωμένων ηλεκτροδίων κατά την εξέταση μιας μακριάς και λεπτής δοκού που έχει ενσωματωμένους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η διαμήκης κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στο πιεζοηλεκτρικό στρώμα δεν ήταν σταθερή.

### **3.Νανοδομημένα Κεραμικά**

Νανοδομημένα κεραμικά έχουν τεθεί σε ερευνητικό στάδιο επειδή οι μικροδομές νανοκλίμακας μπορεί να οδηγήσουν σε αλλαγές στις ιδιότητες όταν το χαρακτηριστικό μέγεθος είναι μικρότερο από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Μεταξύ των πολλών δυνατών



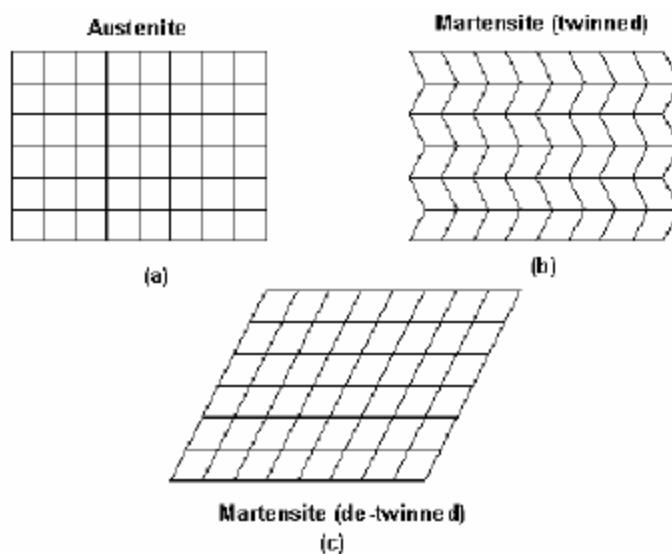
έξυπνων υλικών ναοκλίμακας, οι ναοσωλήνες άνθρακα (CNT) έχουν προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον στην ερευνητική κοινότητα, λόγω των αξιοσημείωτων μηχανικών, ηλεκτροχημικών, πιεζοαντιστασιακών, και άλλων φυσικών ιδιοτήτων. Οι πιθανές αλλαγές στις ιδιότητες (βελτιωμένη αντοχή και σκληρότητα, κλπ.) είναι αυτές που έχουν οδηγήσει την έρευνα στα ναοκεραμικά κατά την τελευταία δεκαετία. Ο Kang και άλλοι χρησιμοποίησαν ένα ναοέξυπνο υλικό για να αναπτύξουν έναν νέο αισθητήρα για το διαρθρωτικό έλεγχο υγείας.

## 5.2 Κράματα με μνήμη σχήματος (shape memory alloys)

### 5.2.1 Αρχή λειτουργίας των SMA

Τα Shape Memory Alloys (κράματα με πλαστική μνήμη ή μορφομνήμονα μεταλλικά κράματα), για παράδειγμα τα Ag-Cd, Au-Cd, Cu-Al-Ni, Cu-Sn, Cu-Zn-(X), In-Ti, Ni-Al, Ni-Ti, Fe-Pt, Mn-Cu και Fe-Mn-Si, είναι ένα σύνολο από μεταλλικά υλικά που έχουν την ικανότητα να επιστρέφουν στο σχήμα που είχαν, πριν υποστούν μία κατάλληλη θερμική επεξεργασία. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο μορφής μνήμης ή αλλιώς της «πλαστικής» μνήμης ή καλύτερα με τον αγγλικό όρο SME - Shape Memory Effect.

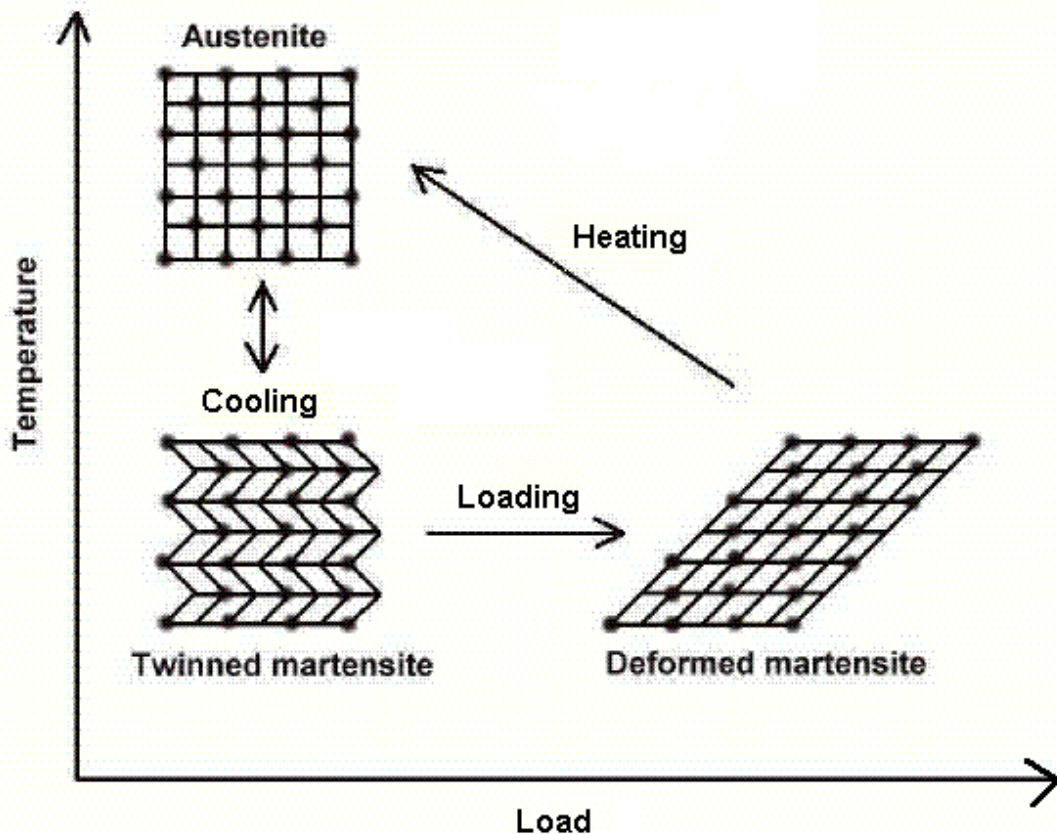
Το φαινόμενο αυτό προκύπτει λόγω μιας εξαρτώμενης μεταβολής της θερμοκρασίας και της εξωτερικής δύναμης στην κρυσταλλική δομή του υλικού μεταξύ δύο διαφορετικών φάσεων, μαρτενσίτη (φάση χαμηλής θερμοκρασίας) και οστενίτη (φάση υψηλής θερμοκρασίας). Η θερμοκρασία, όπου προκύπτει η φάση της μεταβολής, ονομάζεται θερμοκρασία μεταβολής. Στο σχήμα 3.1 βλέπουμε μια απλοποιημένη αναπαράσταση της κρυσταλλικής δομής ενός τέτοιου υλικού κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων.



Σχήμα 3.1 Η κρυσταλλική δομή των SMA σε διαφορετικές φάσεις

Στην οστενιτική φάση, η δομή του υλικού είναι συμμετρική. Κάθε «κόκκος» του υλικού είναι ένας κύβος με ορθές γωνίες (a). Όταν το κράμα κρυώσει, μεταβαίνει στη μαρτσονσιτική φάση και καταλήγει σε μία δομή με διαφορετικό σχήμα (b) και οι κόκκοι καταρρέουν στη δομή που αναπαρίσταται από τα διαμάντια. Σημειώνουμε ότι οι κόκκοι κλίνουν προς διαφορετικές διευθύνσεις για διαφορετικά στρώματα. Εάν μια εξωτερική δύναμη εφαρμοστεί, το κράμα θα παραμορφωθεί και θα οδηγηθεί σε μία εναλλακτική κατάσταση (c) καθώς οι κόκκοι επαναπροσανατολίζονται έτσι ώστε να ευθυγραμμιστούν όλοι στην ίδια διεύθυνση. Τώρα, εάν το κράμα θερμανθεί ξανά πάνω από τη θερμοκρασία μεταβολής, θα σχηματιστεί η οστενιτική φάση και η δομή του υλικού θα επιστρέψει στην αυθεντική κυβική μορφή (a), παράγοντας δύναμη.

Ένα παράδειγμα ενός σύρματος SMA αναπαρίσταται στο σχήμα 3.2. Εάν το σύρμα είναι κάτω από τη θερμοκρασία μεταβολής (δηλαδή βρίσκεται στη μαρτσονσιτική φάση), μπορεί να τεντωθεί με μία εξωτερική δύναμη. Τώρα, εάν το σύρμα θερμανθεί μέχρι να φτάσει στην οστενιτική φάση, θα παράξει δύναμη και θα επανέλθει στην αυθεντική μορφή του.

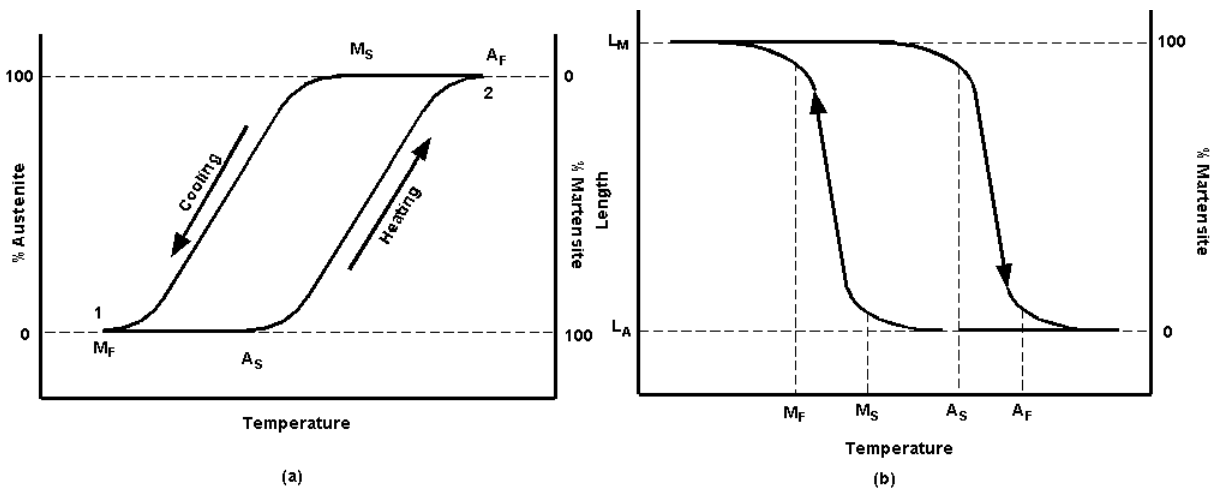


Σχήμα 3.2 Η κρυσταλλική δομή των SMA στις διαφορετικές φάσεις σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και το εξωτερικό φορτίο

### 5.2.2 Ο βρόγχος υστέρησης

Ο βρόγχος υστέρησης και η μη γραμμική συμπεριφορά του σύρματος φαίνονται στο σχήμα 3.3. Η μεταβολή στην κρυσταλλική δομή των SMA δεν είναι μια θερμοδυναμικώς αναστρέψιμη διαδικασία, λόγω των εσωτερικών τριβών και της δημιουργίας δομικών ελαττωμάτων. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει ο βρόγχος υστέρησης που φαίνεται στο σχήμα 3.3(a). Ξεκινώντας από το σημείο 1, το υλικό είναι 100% στη μαρτενιτική φάση. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσής του, η δομή του SMA ακολουθεί την κάτω καμπύλη. Όταν η θερμοκρασία φτάνει στην τιμή  $A_s$ , αρχίζει να δημιουργείται η οστενιτική φάση. Η φάση αυτή συνεχίζει να σχηματίζεται μέχρι να επιτευχθεί η θερμοκρασία  $A_f$  και τότε το υλικό είναι 100% σε οστενιτική φάση. Εφόσον το υλικό αρχίζει να ψύχεται από το σημείο 2, η σύνθεσή του ακολουθεί την πάνω καμπύλη. Όταν η θερμοκρασία πέσει στην τιμή  $M_s$ , ξεκινάει ο σχηματισμός της μαρτενιτικής φάσης και συνεχίζει μέχρι να επιτευχθεί η θερμοκρασία  $M_f$ . Τώρα, το υλικό είναι πάλι στην αρχική του κατάσταση-100% μαρτενσίτης. Αυτός ο βρόγχος υστέρησης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία μεταφράζεται άμεσα σε ένα βρόγχο υστέρησης βασισμένο στη σχέση μεταξύ παραμόρφωσης και θερμοκρασίας (Σχήμα 3.3(b)).

Εξαιτίας της ύπαρξης του βρόγχου υστέρησης, είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί και να ελεγχθεί ένας ενεργοποιητής από SMA. Για ένα δεδομένο τύπο SMA, ο βρόγχος υστέρησης εξαρτάται από τη σύνθεση του κράματος καθώς και από τη διαδικασία παραγωγής του. Τα περισσότερα SMA παρουσιάζουν ένα εύρος στο βρόγχο υστέρησης από 10 έως 50°C, με εξαίρεση κάποια είδη, που έχουν μεγάλο εύρος και χρησιμεύουν σε συγκεκριμένες εφαρμογές.



Σχήμα 3.3 Συμπεριφορά ενός σύρματος SMA σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

### 5.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των SMA

Τα SMA παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα, που μπορεί να εκμεταλλευτεί κανείς για την ένταξή τους σε κάποια εφαρμογή, ως εναλλακτική λύση σε σχέση με συμβατικούς ενεργοποιητές:

- Αμελητέο βάρος και μικρό μέγεθος
- Απουσία μηχανικών μερών τριβής
- Μεγάλη παραμόρφωση
- Αθόρυβη λειτουργία
- Υψηλός λόγος ισχύος προς βάρος καθώς και ισχύος προς όγκο
- Απλοί μηχανισμοί για την ενεργοποίησή τους
- Χαμηλό κόστος

Βέβαια, πρέπει να ληφθούν υπόψιν και να αναλυθούν ορισμένα μειονεκτήματά τους, προτού προβεί κανείς στο σχεδιασμό μιας εφαρμογής, όπως:

- Χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, (συγκριτικά με τους ηλεκτρομαγνητικούς ενεργοποιητές), δηλαδή μικρό διαθέσιμο ποσό απόλυτης δύναμης που αποκτάται από ένα SMA αγωγό.
- Μικρά ποσοστά τροπής
- Μικρό εύρος ζώνης ενεργοποίησης, εξαιτίας των αργών διαδικασιών μεταφοράς θερμικής ενέργειας που χρειάζονται για να συντελεστεί η αλλαγή κατάστασης των SMA.
- Μη γραμμικά φαινόμενα, όπως αυτό της υστέρησης.
- Χρόνος ζωής, που διαφέρει ανάλογα με τη χρήση τους και το ποσό της τάσης και της τροπής σε κάθε κύκλο καθώς επίσης και από τον τύπο της θερμομηχανικής διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθούν οι τελικές ιδιότητες των SMA.

Απ' όλα αυτά οι μη γραμμικότητες είναι ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια που πρέπει να υπερπηδηθεί όταν σχεδιάζονται SMA ενεργοποιητές. Αυτές παρεισφύρουν στη διαδικασία μέσα από το φαινόμενο υστέρησης που περιγράφηκε νωρίτερα, τη μη γραμμική μετάδοση θερμότητας και μέσα από κάθε μη γραμμική αλλαγή στις παραμέτρους που επηρεάζουν την κατάσταση του υλικού όπως η θερμοκρασία και η τάση. Αν πρέπει να ελεγχθεί η κίνηση του ενεργοποιητή, για παράδειγμα η μετατόπιση ενός ενεργοποιητή που παράγει γραμμική κίνηση, η υστέρηση και η μη γραμμικότητα επιφέρουν δυσκολίες. Γι' αυτόν τον λόγο, πολλοί SMA ενεργοποιητές λειτουργούν ως on-off διακόπτες, έχοντας μόνο δύο θέσεις κίνησης. Κάτι τέτοιο αποκτάται εύκολα με συνεχόμενη θέρμανση για τη διατήρηση πλήρους θερμής φάσης ή συνεχόμενη ψύξη για την απόκτηση πλήρους ψυχρής φάσης.

## 5.2.4 Μέθοδοι ενεργοποίησης των SMA

### 5.2.4.1 Θέρμανση του στοιχείου SMA

Η θέρμανση του SMA στοιχείου μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους: με ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το SMA, με ένα ξεχωριστό στοιχείο θέρμανσης ή με θέρμανση από το περιβάλλον μέσο. Όλοι αυτοί οι τρόποι προσφέρουν βολικές και ευέλικτες δυνατότητες για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του κράματος.

Όταν σχεδιάζεται ένας SMA ενεργοποιητής για έναν μηχανισμό, μία από τις πρώτες αποφάσεις που πρέπει να παρθούν είναι να διευκρινιστεί ποια θα είναι η πηγή που θα θερμάνει το SMA. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε ορισμένες εξειδικευμένες εφαρμογές, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή θέρμανσης. Αυτή η μέθοδος αποτελεί εξαιρετική επιλογή όταν σχεδιάζονται μηχανισμοί που ρυθμίζουν θερμοκρασία. Για παράδειγμα, ένα στοιχείο SMA μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα μέσο (όπως ο αέρας), του οποίου η θερμοκρασία πρέπει να ελέγχεται. Το στοιχείο SMA μπορεί να κατασκευαστεί έτσι, ώστε η θερμοκρασία ενεργοποίησής του να αντιστοιχεί σε κάποια κρίσιμη θερμοκρασία του μέσου. Όταν το μέσο φτάσει στην κρίσιμη αυτή θερμοκρασία, το στοιχείο SMA θα ενεργοποιηθεί και πιθανώς να ανοίξει μια βαλβίδα που θα επιφέρει περισσότερη ψύξη. Σε μια τέτοια περίπτωση το στοιχείο SMA δρα και ως αισθητήρας και ως ενεργοποιητής. Επιπλέον, δε χρειάζονται ηλεκτρονικά για αυτό το πολύ απλό σύστημα.

Σε άλλες εφαρμογές, μία συνηθισμένη πηγή θέρμανσης για να επιτευχθεί η θερμοκρασία ενεργοποίησης είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Η πηγή του ρεύματος μπορεί να είναι είτε DC είτε AC. Το ρεύμα  $I$  διαρρέει το στοιχείο SMA με αντίσταση  $R$ , λόγω της εφαρμογής μιας τάσης  $V$  και η αντίστοιχη ισχύς  $P$  μπορεί να βρεθεί από τις γνωστές σχέσεις:  $I=V/R$ ,  $P=V*I= I^2*R$

Αν και η μέθοδος αυτή είναι απλή, έχει δύο μειονεκτήματα. Πρώτον, η αντίσταση του SMA είναι μικρή, επομένως απαιτείται σχετικά μεγάλο ρεύμα. Μία πηγή ρεύματος ικανή να παρέχει αρκετά μεγάλο ρεύμα αυξάνει το συνολικό μέγεθος και κόστος του συστήματος ενεργοποίησης. Δεύτερον, το ρεύμα πρέπει να διαρρέει μόνο το στοιχείο SMA και όχι άλλα αγωγικά στοιχεία κοντά ή σε επαφή με το SMA. Συνεπώς, θα πρέπει το SMA να είναι ηλεκτρικά μονωμένο από το περιβάλλον του, πράγμα που έχει ειδικές απαιτήσεις για τα εξαρτήματα του ενεργοποιητή.

Ενσωματώνοντας ένα διάγραμμα ισχύος-χρόνου και διαιρώντας με το συνολικό χρόνο προκύπτει η μέση ισχύς. Η απαιτούμενη μέση ισχύς για να επιτευχθεί η θερμοκρασία ενεργοποίησης μπορεί να προσφέρεται από ένα σταθερό ή χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα. Ένα παράδειγμα χρονικά μεταβαλλόμενου σήματος που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για ηλεκτρική ενεργοποίηση είναι το Pulse Width Modulation (PWM). Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου συνίσταται σε ένα πιο ομοιόμορφο τρόπο θέρμανσης

του SMA στοιχείου. Όπως είναι φυσιολογικό, μεγαλύτερες τάσεις και μεγαλύτερα ρεύματα προκαλούν γρηγορότερη ενεργοποίηση των SMA.

#### 5.2.4.2 Ψύξη του στοιχείου SMA

Η ψύξη του στοιχείου SMA μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του περιβάλλοντος μέσου, με την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία του μέσου είναι χαμηλότερη από το εύρος των θερμοκρασιών μεταβολής του SMA.

Όταν η θερμοκρασία του μέσου είναι κοντά στις θερμοκρασίες μεταβολής, η ψύξη γίνεται αργά. Επιπλέον, χρειάζεται μικρότερο ρεύμα για να αυξηθεί η θερμοκρασία και να επιτευχθεί η φάση του οστενίτη. Εάν η θερμοκρασία του μέσου είναι πολύ χαμηλότερη από τις θερμοκρασίες μεταβολής, η ψύξη γίνεται γρηγορότερα αλλά χρειάζονται μεγαλύτερα ρεύματα.

Τα ενεργά στοιχεία ψύξης είναι απαραίτητα όταν πρέπει να ελαττωθεί πολύ γρήγορα η θερμοκρασία ή όταν η θερμοκρασία του μέσου είναι πολύ υψηλή για να μπορέσει να φτάσει σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες, ώστε να επιτευχθεί η μαρτενσιτική φάση.

Η επιβαλλόμενη ψύξη (για παράδειγμα με έναν ανεμιστήρα) είναι μια σχετικά απλή μέθοδος για ενεργή ψύξη. Ακόμα, σε μερικές εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ψύξη με ένα κινούμενο υγρό. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψιν πως όσο περισσότερο δυνατό είναι το σύστημα ψύξης, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το απαιτούμενο ρεύμα.

#### 5.2.5 Κράματα Ni-Ti

Στις αρχές του '60 ο William Buehler, ερευνητής στο εργαστήριο Naval Ordnance στο Silver Springs, στη Maryland, ανέπτυξε ένα νέο κράμα, το οποίο εισήγαγε στην ορθοδοντική ο Andreasen στις αρχές του '70 με το όνομα "Nitinol". Το όνομα προέρχεται από τα στοιχεία που αποτελούν το κράμα (Ni και Ti) και τα αρχικά του εργαστηρίου Naval Ordnance Laboratory.

Το αρχικό κράμα περιείχε 55% Ni και 45% Ti, πράγμα που σημαίνει αναλογία 1-1 των ατόμων των δύο στοιχείων.

*Μνήμη σχήματος:* Τα σύρματα Ni-Ti έχουν την ιδιότητα να επανέρχονται σε προηγούμενο σχήμα όταν θερμαίνονται πάνω από μια ορισμένη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία εξαρτάται από τις συνθήκες κατασκευής και το ποσοστό κοβαλτίου. Συνήθως το Co είναι 1.6% και  $E=33.6 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ .

#### *Υπερελαστικό NiTi:*

Χαρακτηριστικό των μετάλλων είναι η ελαστική παραμόρφωση κάτω από την επίδραση δύναμης. Όταν κάμπουμε ένα σύρμα (αλλά μέσα στην ελαστική περιοχή), όσο μεγαλύτερη δύναμη ασκούμε, τόσο περισσότερο κάμπεται το σύρμα. Τα υπερελαστικά σύρματα NiTi, όμως, παρουσιάζουν μια επίπεδη ανταπόκριση στην ελαστική περιοχή. Αυτό είναι ενδιαφέρον για την Ορθοδοντική γιατί η δύναμη που ασκεί ένα

υπερελαστικό σύρμα είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ενεργοποίησή του. Έτσι, ένα υπερελαστικό ελατήριο θα ασκεί συνεχώς την ίδια δύναμη, ενώ ένα κοινό ελατήριο θα ασκεί μεγάλη δύναμη στην αρχή, η οποία θα ελαττώνεται καθώς το δόντι μετακινείται.



Τα υπερελαστικά σύρματα εμφανίζουν δύο κρυσταλλικές δομές:

1. Ωστενίτης (austenite): χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα
2. Μαρτενσίτης (martensite): εξαγωνικό κρυσταλλικό σύστημα

Η υπερελαστικότητα οφείλεται σε μετασχηματισμό του υλικού από ωστενίτη σε μαρτενσίτη λόγω εφαρμογής τάσεων. Ο μαρτενσίτης έχει περίπου 40% του μέτρου ελαστικότητας του ωστενίτη.

### 5.3 Τσιμεντοειδή σύνθετα (engineered cementitious composites)

Τα Τσιμεντοειδή σύνθετα (ECC), που ονομάζονται επίσης εύκαμπτο σκυρόδεμα, είναι ένα εύκολα χυτευόμενο σύνθετο από κονίαμα ενισχυμένο με ειδικά επιλεγμένες κοντές τυχαίες ίνες, συνήθως ίνες πολυμερούς. Σε αντίθεση με το κανονικό σκυρόδεμα, τα ECC έχουν ικανότητα παραμόρφωσης της τάξεως 3-7%, σε σύγκριση με 0,1% για το σύνηθες τσιμέντο καμινεύσεως ασβεστόλιθου και πηλού (OPC). Το ECC επομένως δρα περισσότερο σαν ένα όλκιμο μέταλλο παρά σαν ένα εύθραυστο γυαλί (όπως κάνει το OPC σκυρόδεμα), οδηγώντας σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Το ECC, σε αντίθεση με το κοινό ινοπλισμένο σκυρόδεμα, είναι ένα μικρομηχανικά σχεδιασμένο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι οι μηχανικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ινών και μήτρας ECC περιγράφονται από ένα μικρομηχανικό μοντέλο, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες των υλικών και βοηθά στην πρόβλεψη ιδιοτήτων και την καθοδηγούμενη ανάπτυξη των ECC.

Τα συστατικά υλικά των τσιμεντοειδών σύνθετων είναι παρόμοια με εκείνα του ινοπλισμένου σκυροδέματος, συμπεριλαμβανομένων τσιμέντο, άμμο, νερό, ίνες, και μερικά χημικά πρόσθετα. Σε αντίθεση με το ινοπλισμένο σκυροδέμα, τα τσιμεντοειδή

σύνθετα δεν περιλαμβάνουν μεγάλο όγκο ινών. Η διαδικασία ανάμιξής τους είναι παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται για το κανονικό σκυρόδεμα. Τα τσιμεντοειδή σύνθετα είναι οικονομικότερα με μείωση της χρήσης των ινών, διατηρώντας παράλληλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά αντοχής και ολκιμότητας.

Η βασική διαφορά στις ιδιότητες των τσιμεντοειδών σύνθετων υλικών και του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι ότι μετά το ράγισμα του τσιμεντοειδούς σύνθετου, η παραμόρφωση σκληραίνει, ενώ το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν επιδεικνύει μια τέτοια συμπεριφορά. Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, η ρωγμή αναπτύσσεται με τη ρήξη των ινών εξαιτίας της οποίας η ικανότητα αντοχής τάσης είναι μειωμένη. Επιπλέον, τα τσιμεντοειδή σύνθετα έχουν υψηλή σκληρότητα θραύσης που είναι παρόμοια με εκείνη των κραμάτων αλουμινίου, και η ανοχή στη βλάβη είναι εξαιρετικά υψηλή.

### **Ιδιότητες**

Τα ECC έχουν μια ποικιλία από μοναδικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων ιδιοτήτων εφελκυσμού ανώτερες από άλλων ινοπλισμένων σύνθετων υλικών, ευκολία επεξεργασίας στο ίδιο επίπεδο με το συμβατικό τσιμέντο, χρήση μόνον ενός μικρού κλάσματος του όγκου των ινών (~ 2%), στενό πλάτος ρωγμής, και μια έλλειψη ανισοτροπικών ασθενών επίπεδων. Αυτές οι ιδιότητες οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην αλληλεπίδραση μεταξύ των ινών και της τσιμεντοειδούς μήτρας, η οποία μπορεί να είναι κατάλληλα προσαρμοσμένη μέσω μικρομηχανικού σχεδιασμού. Ουσιαστικά, οι ίνες δημιουργούν πολλές μικρορωγμές με ένα πολύ συγκεκριμένο πλάτος, παρά λίγες πολύ μεγάλες ρωγμές (όπως στο συμβατικό σκυρόδεμα.). Αυτό επιτρέπει στο ECC να παραμορφώνεται χωρίς καταστροφική αστοχία.

Αυτή η συμπεριφορά μικρορωγμών οδηγεί σε ανώτερη αντίσταση στη διάβρωση (οι ρωγμές είναι τόσο μικρές και πολυάριθμες που είναι δύσκολο για επιθετικά μέσα να διεισδύσουν και να επιτεθούν στο χάλυβα ενίσχυσης) καθώς στην αυτο-ίαση. Στην παρουσία νερού (κατά τη διάρκεια μιας νεροποντής, για παράδειγμα) εκτέθηκαν πρόσφατα μη αντιδρώντα σωματίδια τσιμέντου λόγω ενυδάτωσης ρωγμών και σχηματίζουν μια σειρά από προϊόντα (ένυδρο πυριτικό ασβέστιο, ασβεστίτη, κλπ) που επεκτείνουν και γεμίζουν τη ρωγμή. Τα προϊόντα αυτά εμφανίζονται ως ένα λευκό υλικό «σημάδι» που γεμίζει τη ρωγμή. Αυτή η συμπεριφορά αυτο-ίασης όχι μόνο δε σφραγίζει τη ρωγμή για να αποτρέψει μεταφορά των υγρών, αλλά ανακτά και μηχανικές ιδιότητες. Αυτή η αυτο-ίαση έχει παρατηρηθεί σε μία ποικιλία συμβατικών τσιμέντων και σκυροδεμάτων. Ωστόσο, πάνω από ένα ορισμένο πλάτος ρηγμάτωσης, η αυτοθεραπεία γίνεται λιγότερο αποτελεσματική. Είναι τα αυστηρά ελεγχόμενα πλάτη ρωγμών που φαίνονται στο ECC που εξασφαλίζουν την καλή επούλωση όλων των ρωγμών όταν εκτίθενται στο φυσικό περιβάλλον.

Όταν συνδυάζονται με ένα πιο αγώγιμο υλικό (μεταλλικά σύρματα, νανοσωλήνες άνθρακα, κλπ) όλα τα υλικά τσιμέντου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ζημιών. Αυτό βασίζεται κυρίως στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα θα αλλάξει όταν η



αστοχία εμφανίζεται. Η προσθήκη του αγωγίμου υλικού γίνεται για να αυξήσει την αγωγιμότητα σ' ένα επίπεδο όπου τέτοιες αλλαγές θα μπορούν να εντοπίζονται εύκολα. Αν και δεν είναι μια ιδιότητα των ίδιων των ECC, τα αγωγή ECC για εφαρμογές ανίχνευσης βλαβών αναπτύσσονται από διάφορες ερευνητικές ομάδες.

## **Τύποι ECC**

Υπάρχει ένας αριθμός από διαφορετικές ποικιλίες των ECC, όπως οι εξής:

- Ελαφριά (δηλαδή χαμηλής πυκνότητας) ECC έχουν αναπτυχθεί μέσω της προσθήκης κενών αέρος, φυσαλίδες υάλου, σφαίρες πολυμερούς, ή / και ελαφρύ συσσωμάτωμα. Σε σύγκριση με άλλα ελαφριά τσιμέντα, το ελαφρύ ECC έχει ανώτερη θλίψη και αντοχή σε εφελκυσμό, έλεγχο πλάτους ρωγμών και ανοχή στη βλάβη. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν πλωτά σπίτια, φορηγίδες, και κανό.
- «Αυτό-συμπιεζόμενο σκυρόδεμα» αναφέρεται σε ένα σκυρόδεμα που μπορεί να ρέει υπό το δικό του βάρος. Για παράδειγμα, ένα αυτο-συμπιεζόμενο υλικό θα είναι σε θέση να καλύψει ένα καλούπι που περιέχει περίτεχνα προτοποθετημένο χαλύβδινο οπλισμό χωρίς την ανάγκη δόνησης ή ανάδευσης για να εξασφαλισθεί ομοιόμορφη κατανομή. Το αυτοσυμπιεζόμενο ECC αναπτύχθηκε μέσω της χρήσης χημικών προσμίξεων για να μειωθεί το ιζώδες και μέσω του ελέγχου αλληλεπιδράσεων σωματιδίων με αναλογίες μίγματος.
- Ψεκάσιμα ECC, τα οποία μπορεί να ψεκάζονται πνευματικά από ένα σωλήνα, έχουν αναπτυχθεί με τη χρήση διαφόρων υπερπλαστικοποιητικών παραγόντων και προσμίξεις μείωσης ιζώδους. Σε σύγκριση με άλλα ψεκάσιμα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά, τα ψεκάσιμα ECC έχουν ενισχύσει και την αντλησιμότητα εκτός από τις μοναδικές μηχανικές ιδιότητές τους. Τα ψεκάσιμα ECC έχουν χρησιμοποιηθεί για εργασίες μετασκευής/επισκευής και επενδύσεις σηράγγων / αποχετεύσεων.
- Ένα εξωθήσιμο ECC για χρήση στην εκβολή των σωλήνων αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 1998. Εκβαλλόμενοι σωλήνες ECC έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα φορτίου και μεγαλύτερη παραμόρφωση απ' οποιουδήποτε άλλους εκβαλλόμενους ινοπλισμένους σύνθετους σωλήνες.

## **Εφαρμογές των τσιμεντοειδών σύνθετων**

Τα τσιμεντοειδή σύνθετα χρησιμοποιούνται στα στοιχεία διάτμησης που υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση, στα μηχανικά στοιχεία της δοκού και το συνδυασμό στήλης και για γενικές κατασκευαστικές επισκευές. Αυτά τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατασκευές που έχουν υψηλή απορρόφηση ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων αποσβεστήρων, στοιχείων συνδέσμων από χάλυβα και για υβριδικές συνδέσεις από χάλυβα. Εκτός από τις δομικές εφαρμογές, αυτά τα σύνθετα χρησιμοποιούνται ως στρώμα θωράκισης για την αύξηση της διαβρωτικής αντίστασης των κατασκευών. Άλλοι πιθανοί στόχοι των τσιμεντοειδών σύνθετων περιλαμβάνουν υπόγειες κατασκευές, πεζοδρόμια αυτοκινητόδρομων, και καταστρώματα γεφυρών.



Πιο συγκεκριμένα, τα ECC έχουν βρει χρήση σε πολλές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας στην Ιαπωνία, την Κορέα, την Ελβετία, την Αυστραλία και τις ΗΠΑ. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Το Φράγμα Mitaka κοντά στη Χιροσίμα που είχε επισκευαστεί με ECC το 2003. Η επιφάνεια του τότε εξηντάχρονου φράγματος υπέστη σοβαρές ζημιές με ενδείξεις ρωγμών, θρυμματισμό, και κάποια διαρροή νερού. Ένα παχύ (20mm) στρώμα των ECC εφαρμόστηκε με ψεκασμό πάνω από την επιφάνεια των 600m<sup>2</sup>.
- Επίσης το 2003, ένας γήινος τοίχος αντιστήριξης στο Gifu, Ιαπωνία, επισκευάστηκε χρησιμοποιώντας ECC. Το συνηθισμένο τσιμέντο portland δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί λόγω της σοβαρότητας της ρηγμάτωσης στην αρχική κατασκευή, η οποία θα είχε προκαλέσει ανακλαστική ρηγμάτωση. Το ECC είχε ως στόχο να ελαχιστοποιήσει αυτόν τον κίνδυνο. Μετά από ένα χρόνο παρατηρήθηκαν μόνο μικρορωγμές ανεκτού πλάτους.
- Το ψηλό κτίριο διαμερισμάτων Glorio Rorrongi στο Τόκιο με ύψος 95m (312 πόδια) περιέχει συνολικά 54 δοκάρια σύζευξης ECC (2 ανά όροφο) που προορίζονται για τον περιορισμό ζημιών από σεισμούς. Οι ιδιότητες του ECC (υψηλή ανοχή σε βλάβη, υψηλή ενέργεια απορρόφησης, και ικανότητα να παραμορφώνεται υπό διάτμηση) του δίνουν ανώτερες ιδιότητες σε αντισεισμικές εφαρμογές σε σύγκριση με το κοινό τσιμέντο Portland. Παρόμοιες δομές περιλαμβάνουν το 41-όροφο Πύργο Nabeaure Yokohama (4 δοκάρια σύζευξης ανά όροφο).
- Η 1km (0,62 μίλια) μακριά Γέφυρα Mihara στο Οκάιντο, Ιαπωνία παραδόθηκε στην κυκλοφορία το 2005. Το ενισχυμένο από χάλυβα κατάστρωμα του δρόμου περιέχει σχεδόν 800 m<sup>3</sup> υλικό ECC. Η εφελκυστική ολκιμότητα και ο αυστηρός έλεγχος συμπεριφοράς των ρωγμών του ECC οδήγησε σε μείωση κατά 40% σε υλικά που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής.
- Ομοίως, ένα κατάστρωμα γέφυρας από ECC πάχους 225mm στο διακρατικό 94 στο Μίσιγκαν ολοκληρώθηκε το 2005. 30 m<sup>3</sup> του υλικού χρησιμοποιήθηκαν παραδόθηκαν επί τόπου στο πρότυπο μίξης φορτηγών. Λόγω των μοναδικών μηχανικών ιδιοτήτων των ECC, αυτό το κατάστρωμα χρησιμοποίησε επίσης λιγότερο υλικό από ένα προτεινόμενο κατάστρωμα κατασκευασμένο από κοινό τσιμέντο Portland. Τόσο το Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν όσο και το Υπουργείο Μεταφορών του Μίσιγκαν παρακολουθούν τη γέφυρα σε μια προσπάθεια να

ελέγξουν τη θεωρητική ανώτερη αντοχή των ECC. Μετά από 4 χρόνια παρακολούθησης, η απόδοση παρέμεινε αμείωτη.

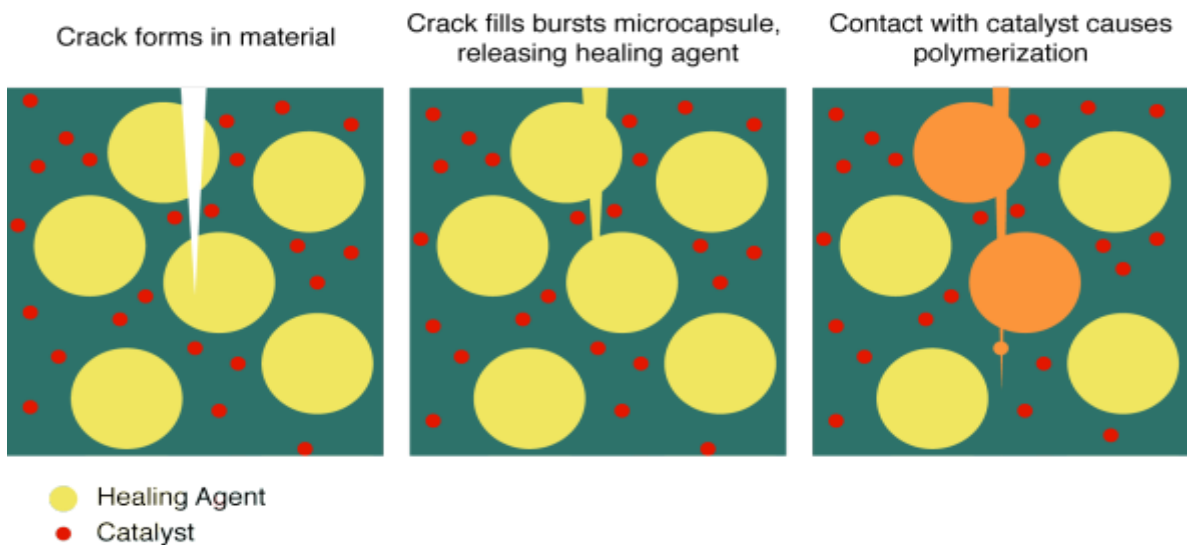
#### 5.4 Υλικά με ικανότητα «αυτο-ίασης» (self-healing materials)

Υλικά με ικανότητα «αυτοίασης» είναι μια κατηγορία έξυπνων υλικών που έχουν την κατασκευαστικά ενσωματωμένη ικανότητα να αποκαθιστούν βλάβες που προκαλούνται από μηχανική χρήση με την πάροδο του χρόνου. Η έμπνευση προέρχεται από βιολογικά συστήματα, τα οποία έχουν την ικανότητα να επουλωθούν, αφού τραυματιστούν. Η εμφάνιση των ρωγμών και άλλων τύπων βλάβης σε μικροσκοπικό επίπεδο φάνηκε να αλλάζει θερμικές, ηλεκτρικές και ακουστικές ιδιότητες, και τελικά να οδηγεί σε ολοκληρωτική αστοχία κλίμακας του υλικού. Συνήθως, οι ρωγμές είναι συγκολλημένες με το χέρι, κάτι το οποίο είναι δύσκολο επειδή οι ρωγμές είναι συχνά ζόρικο να ανιχνευθούν. Ένα υλικό (πολυμερές, κεραμικό, κλπ.) που μπορεί να διορθώσει εγγενώς βλάβη που προκαλείται από τη συνήθη χρήση θα μπορούσε να μειώσει το κόστος παραγωγής ενός αριθμού διαφορετικών βιομηχανικών διεργασιών μέσω μεγαλύτερου μέρους διάρκειας ζωής, να μειώσει την αναποτελεσματικότητα με την πάροδο του χρόνου που προκαλείται από αποικοδόμηση, καθώς και να εμποδίσει δαπάνες από την αστοχία υλικού. Για να οριστεί ένα υλικό ως αυτοεπουλώμενο, είναι απαραίτητο η διαδικασία επούλωσης να λαμβάνει χώρα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Τρεις βασικοί τύποι των αυτοεπουλώμενων υλικών είναι:

- *Μικροενθλακωμένα Συστήματα* - υλικό που περιέχει λίγες κάψουλες γεμάτες με ένα θεραπευτικό παράγοντα που υποθηκεύει όταν έρχονται σε επαφή με καταλύτες επίσης ενσωματωμένους στο υλικό.

#### Microencapsulated Materials - self healing matrix



- *Μικροαγγειακά Συστήματα* - υλικά γεμάτα με τριχοειδή αγγεία γεμισμένα με θεραπευτικούς παράγοντες.  
Μία άλλη παραλλαγή είναι να δημιουργήσουμε ένα υλικό με ενσωματωμένα τριχοειδή του θεραπευόμενου υλικού που μπορεί να έρθει σε επαφή με ενσωματωμένες καταλυτικές ουσίες για να προκαλέσει αυτοεπουλώμενη συγκόλληση. Φαίνεται ότι αυτή η διαδικασία είναι περισσότερο κοπιαστική στην κατασκευή, αλλά κάνει για μερικά καταπληκτικά διαγράμματα.
- *Μηχανοαποκρινόμενα Πολυμερή* - τροποποιήσεις που έγιναν στο χημικό επίπεδο που ελέγχει τον τρόπο που ένα υλικό αντιδρά υπό πίεση - απλό παράδειγμα είναι η αλλαγή χρώματος πριν την αστοχία.

### **Αυτοίαση σε πολυμερή και ινοπλισμένα σύνθετα πολυμερή**

#### 1) Παράγοντες επούλωσης βασισμένοι στο νερό

Εντελώς αυτόνομα συνθετικά αυτο-θεραπευόμενα υλικά αναφέρονται το 2001 με παράδειγμα ένα εποξεικό σύστημα που περιέχει μικροκάψουλες. Αυτές οι μικροκάψουλες πληρώθηκαν με ένα μονομερές (υγρό). Εάν μια μικρορηγμάτωση συμβαίνει σε αυτό το σύστημα, η μικροκάψουλα θα διασπασθεί και το μονομερές θα γεμίσει τη ρωγμή. Στη συνέχεια θα πολυμεριστεί, ξεκινώντας από σωματίδια καταλύτη που επίσης διασπείρονται μέσω του συστήματος. Αυτό το πρότυπο σύστημα ενός αυτό-θεραπευόμενου σωματιδίου αποδείχθηκε ότι λειτουργεί πολύ καλά σε καθαρά πολυμερή και επιστρώσεις πολυμερούς. Μια κοίλη προσέγγιση με ίνες γυαλιού μπορεί να είναι πιο κατάλληλη για τις βλάβες των επιπτώσεων αυτο-ίασης σε ινοπλισμένα σύνθετα πολυμερή. Βλάβη λόγω κρούσεως μπορεί να προκαλέσει μια σημαντική μείωση της αντοχής σε θλίψη με μικρή ζημιά εμφανή στο γυμνό μάτι. Οι κοίλες ίνες υάλου που περιέχουν υγρούς θεραπευτικούς παράγοντες ενσωματώνονται μέσα σε ένα σύνθετο έλασμα. Μελέτες έχουν δείξει σημαντικές δυνατότητες.

#### 2) Παράγοντες επούλωσης στερεάς κατάστασης

Εκτός από τις μεμονωμένες στρατηγικές απορρόφησης παράγοντα επούλωσης που περιγράφονται ανωτέρω, εκτελούνται επίσης έρευνες σε "εγγενώς" αυτο-θεραπευόμενα υλικά. Για παράδειγμα, υπερμοριακά πολυμερή είναι υλικά που σχηματίζονται από αναστρέψιμα συνδεδεμένους μη-ομοιοπολικούς δεσμούς (δηλαδή δεσμό υδρογόνου), που θα διασπαστούν σε αυξημένες θερμοκρασίες. Η επούλωση αυτών των υλικών με υπερμοριακή βάση επιτυγχάνεται με θέρμανσή τους και με το να επιτραπεί να σπάσουν οι μη-ομοιοπολικοί δεσμοί. Κατά την ψύξη, νέοι δεσμοί θα σχηματιστούν και το υλικό θα θεραπεύσει δυνητικά οποιαδήποτε ζημιά. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δε χρειάζονται αντιδραστικοί χημικοί ή (τοξικοί) καταλύτες. Ωστόσο, αυτά τα υλικά δεν είναι «αυτόνομα», δεδομένου ότι απαιτούν την παρέμβαση ενός εξωτερικού παράγοντα για να ξεκινήσει μια απόκριση επούλωσης.

### 3) Βιομημητικές προσεγγίσεις σχεδιασμού

Τα αυτο-θεραπευόμενα υλικά είναι ευρέως διαδεδομένα στα φυσικά συστήματα, και η έμπνευση μπορεί να προέλθει από αυτά τα συστήματα για το σχεδιασμό. Υπάρχουν στοιχεία στην ακαδημαϊκή βιβλιογραφία από αυτές τις βιομημητικές προσεγγίσεις σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των αυτο-θεραπευόμενων συστημάτων πολυμερών σύνθετων υλικών. Στη βιολογία, για την ελάχιστη ενέργεια για την άντληση ρευστού μέσω των σωλήνων ισχύει ο νόμος του Murray. Η απόκλιση από το νόμο του Murray είναι μικρή, ωστόσο, η αύξηση της διαμέτρου κατά 10% οδηγεί μόνο σε μια πρόσθετη απαίτηση ισχύος της τάξεως 3% -5%. Ο νόμος του Murray ακολουθείται σε ορισμένα μηχανικά σκάφη, και χρησιμοποιώντας τον νόμο του Murray μπορούμε να μειώσουμε την υδραυλική αντίσταση σε όλα τα σκάφη. Η δομή DIW μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μιμηθεί ουσιαστικά τη δομή του δέρματος. Ο Toohey το έκανε αυτό με ένα εποξεικό υπόστρωμα που περιέχει ένα πλέγμα από μικροδιαύλους δικυκλοπενταδιένιου (DCPD), και ενσωμάτωσε καταλύτη Grubbs στην επιφάνεια. Αυτό έδειξε μερική ανάκαμψη της σκληρότητας μετά τη θραύση, και θα μπορούσε να επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, λόγω της ικανότητας να αναπληρωθούν τα κανάλια μετά τη χρήση. Η διαδικασία δεν επαναλαμβάνεται επ'άπειρον, επειδή το πολυμερές στο επίπεδο ρωγμής από προηγούμενες θεραπείες θα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.

### **Αυτοθεραπεία και το μέλλον**

Αυτοθεραπευόμενες εποξειδικές μπορούν να ενσωματωθούν στα μέταλλα προκειμένου να αποτραπεί η διάβρωση. Ένα μεταλλικό υπόστρωμα δείχνει σημαντική αποικοδόμηση και σχηματισμό σκουριάς μετά από 72 ώρες από την έκθεση. Αλλά αφού επικαλύπτεται με την αυτοθεραπευόμενη εποξειδική, δεν υπάρχει ορατή ζημία υπό SEM μετά από 72 ώρες από την ίδια έκθεση.

Προφανώς, καμία από τις περιπτώσιολογικές μελέτες δεν έχει το επίπεδο λειτουργικότητας που ανταγωνίζεται με φυσικά υλικά, όπως το δέρμα και τα οστά, αλλά δείχνουν να υπάρχουν πολλά που συμβαίνουν σε αυτό το θέμα. Το αυτοεπουλώμενο χρώμα του αυτοκινήτου είναι προφανές, καθώς και η μείωση του ποσοστού αστοχίας των ημιαγωγών ακούγεται ενδιαφέρονσα, αλλά είναι αξιοπερίεργο πώς οι σχεδιαστές θα σκεφτόταν διαφορετικά αν ήταν διαθέσιμα στο επίπεδο των καταναλωτικών πλαστικών. Χρειαζόμαστε φωτογραφικές μηχανές και κινητά τηλέφωνα για αυτοθεραπεία; Υποθέτω η πραγματική αξία θα βρίσκεται στο επίπεδο των υποδομών: αυτοθεραπευόμενοι σωλήνες, επενδύσεις για ηλεκτρικά καλώδια και απόβλητα ακούγονται λίγο βαρετά, αλλά η γήρανση των υποδομών στις πόλεις είναι ένα τεράστιο ζήτημα. Το Τορόντο αντιμετωπίζει επί του παρόντος 1,7 εκτιμώμενα δισεκατομμύρια δολάρια για την επισκευή σκουριασμένων σωλήνων νερού του. Αυτή είναι μια τεράστια, αν όχι απίθανη, ευκαιρία για καινοτομία.

## Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές έξυπνων υλικών

### 6.1 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία

Η εφαρμογή έξυπνων υλικών σε διάφορα εξαρτήματα αυτοκινήτων είναι σημαντική. Κάποιες ενδεικτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν ενεργές επιφάνειες οχημάτων, όπως σπόιλερ και εισαγωγές αέρα που προσαρμόζονται για τη διαχείριση της ροής αέρα, τη βελτιωμένη αεροδυναμική και τις επιδόσεις καθώς και μηχανισμούς ανοίγματος καπό, θυρών και ντουλαπιών για πιο άνετη πρόσβαση. Τα έξυπνα υλικά θα αλλάξουν την εμφάνιση και αίσθηση των αυτοκινήτων και επαγγελματικών οχημάτων μας. Με αυτά τα νέα υλικά, η λειτουργικότητα μπορεί να προγραμματιστεί «εσωτερικά», επιτρέποντας σχεδιαστικές καινοτομίες, βελτιωμένη απόδοση και νέα, αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά που θα κάνουν τα αυτοκίνητα πιο συναρπαστικά σε εμφάνιση και λειτουργία σε σχέση με του παρελθόντος

Ενεργοποιητές και αισθητήρες από τέτοια υλικά έχουν τη δυνατότητα να βελτιώνουν τις επιδόσεις του αυτοκινήτου, την οικονομία καυσίμου, προσφέροντας νέα χαρακτηριστικά άνεσης και ευκολιών. Αυτοί οι ενεργοποιητές και οι αισθητήρες μπορούν να παρέχουν σημαντικά οφέλη όταν χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση συμβατικών ηλεκτρικών και υδραυλικών συσκευών, μειώνοντας τη μάζα του οχήματος, το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του εξαρτήματος, και βελτιώνοντας την ευελιξία σχεδίασης, τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία.

Οι επιστήμονες έχουν προχωρήσει σε τεχνολογικές εξελίξεις με «έξυπνα» υλικά, που θα είναι έτοιμα για μαζική παραγωγή σε οχήματα. Αυτά τα Κράματα Μνήμης Σχημάτων - Shape Memory Alloys (SMA) και τα πολυμερή μπορούν να αλλάζουν το σχήμα -Shape Memory Polymers (SMP), την αντοχή και / ή την ακαμψία τους υπό την επίρεια θερμότητας, μηχανικής καταπόνησης, ενός μαγνητικού πεδίου ή ηλεκτρικής τάσης. Αυτό ανοίγει νέους ορίζοντες για πολλά κινούμενα στοιχεία του αυτοκινήτου, καθώς τα κράματα SMA και τα πολυμερή ειδικότερα, «θυμούνται» το αρχικό σχήμα τους και μπορούν να επιστρέφουν σε αυτό.

Τα έξυπνα υλικά βασίζονται σε καινοτομίες προηγούμενων υλικών που χρησιμοποιούνται στο παρελθόν. Κάποια παραδείγματα περιλαμβάνουν πρωτότυπες μεθόδους διαμόρφωσης αλουμινίου που επιτυγχάνουν βελτιωμένα πάνελ αμαξώματος και ελαφριά, πολυμερή νανο-συνθετικά που προσφέρουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες με χαμηλότερο κόστος, και μαγνητορολογικά υγρά (MRF) για βελτιωμένα συστήματα πλαισίου (π.χ. αμορτισέρ). Τα εγγενή χαρακτηριστικά των κραμάτων SMA και των πολυμερών θα μπορούν να φέρουν επανάσταση στον τομέα των προηγμένων υλικών αυτοκινήτων, και τελικά να οδηγήσουν σε υποσυστήματα οχημάτων που θα αυτο-επισκευάζονται σε περίπτωση ζημιάς ή θα σχεδιάζονται με δυνατότητα να αλλάζουν χρώμα ή εμφάνιση.

Η εφαρμογή των πολυμερών με μνήμη σχήματος, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να επιστρέφουν από μια κατάσταση παραμόρφωσης σε μία αρχική, εξαιτίας ενός εξωτερικού ερεθίσματος, όπως για παράδειγμα επιβολής θερμοκρασίας, περιλαμβάνει αυτοεπισκευαζόμενα δομικά εξαρτήματα ενός οχήματος, όπως για παράδειγμα τα φτερά του αυτοκινήτου, των οποίων τα βαθουλώματα επισκευάζονται ύστερα από επιβολή εξωτερικής θερμότητας. Ύστερα από μία ανεπιθύμητη παραμόρφωση, όπως ένα βαθουλώμα σε έναν προφυλακτήρα, αυτά τα υλικά «θυμούνται» το αρχικό τους σχήμα. Η επιβολή θερμότητας ενεργοποιεί τη «μνήμη» τους. Στο παράδειγμα του βαθουλώματος, το φτερό μπορεί να επισκευαστεί ακόμη και με χρήση ενός απλού στεγνωτήρα μαλλιών. Η επιβολή αυτή θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα μία προσωρινή μορφή, η οποία αλλάζει ξανά και επανέρχεται στην αρχικά σχεδιασμένη μορφή, οπότε το πλαστικό αυτό μέρος επισκευάζεται από μόνο του. Έτσι, για τον «ατζαμή οδηγό» οι παραμορφώσεις λόγω των μικρών συγκρούσεων μπορούν να εξαλειφθούν με την αντιμετώπιση του μαρσαρίσματος, μιας και η επίδραση της μνήμης σχήματος επιτρέπει στο αρχικό σχήμα της δομής να επανέλθει. Το κόστος βεβαίως και πάλι θα επηρεάσει την πιθανή ευρεία χρήση αυτής της τεχνολογίας.

Οι εφαρμογές, επίσης, των μαγνητορεολογικών ρευστών στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι ποικίλλες. Εάν τα αμορτισέρ των αναρτήσεων ενός οχήματος περιείχαν μαγνητορεολογικό ρευστό λάδι, και περιβάλλονταν ολόκληρο από ηλεκτρομαγνήτη, η πυκνότητα του ρευστού, και ως εκ τούτου, το μέγεθος της απόσβεσης των αμορτισέρ, δύναται να μεταβάλλεται ανάλογα με τις οδηγικές προτιμήσεις του οδηγού ή το μεταφερόμενο φορτίο του οχήματος, ή μπορεί να μεταβάλλεται προκειμένου να υπάρχει έλεγχος της σταθερότητας του οχήματος. Αυτό στην ουσία είναι ένας μαγνητορεολογικός αποσβεστήρας. Για παράδειγμα, μια μαγνητο – ανάρτηση, επιτρέπει τη ρύθμιση του συντελεστή απόσβεσης κάθε χιλιοστό του δευτερολέπτου ως απόκριση στις εξωτερικές συνθήκες. Η General Motors (σε συνεργασία με την Delphi Corporation) ήταν η πρώτη που ανέπτυξε αυτήν την τεχνολογία με σκοπό την εφαρμογή της στα οχήματά της.

Η αρχή έγινε με την Cadillac Seville STS και Chevrolet , με ονομασία "MagneRide" και "Magnetic Selective Ride Control (MSRC)" αντίστοιχα το 2003. Άλλες εταιρίες πλήρωσαν για τη χρήση στα μοντέλα τους αυτής της τεχνολογίας (Audi Ferrari) ενώ το 2007 ανέπτυξε αντίστοιχη τεχνολογία. Η General Motors καθώς και άλλες αυτοκινητοβιομηχανίες κάνουν προσπάθειες προκειμένου να αναπτύξουν σύστημα για το συμπλέκτη 4X4 οχημάτων, το οποίο θα βασίζεται και αυτό σε μαγνητορεολογικά ρευστά. Αυτό το σύστημα συμπλέκτη θα χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνήτες οι οποίοι θα στερεοποιούν το ρευστό το οποίο με τη σειρά του θα κλειδώνει τον άξονα μετάδοσης κίνησης. Επίσης η Porsche εισήγαγε «μαγνητορεολογικές» βάσεις για τον κινητήρα στα μοντέλα Porsche GT3 και GT2. Στο μέλλον προβλέπεται να κατασκευαστούν μαγνητορεολογικές βάσεις οι οποίες θα γίνονται πιο σκληρές προκειμένου να παρέχεται καλύτερη αίσθηση κατά την αλλαγή ταχυτήτων. Αυτό θα γίνεται μέσω μείωσης της σχετικής κίνησης μεταξύ του κινητήρα και του σασί. Τον Σεπτέμβριο του 2010 η Acura (Honda) άρχισε να διαφημίζει τα οχήματά της τονίζοντας τη μαγνητορεολογική τεχνολογία που χρησιμοποιούσε στα νέα μοντέλα της.

Η χρήση των μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων (MEMS – micro-electrical-mechanical systems) σαν αισθητήρες στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι εξίσου σημαντική. Για παράδειγμα, οι συσκευές MEMS χρησιμοποιούνται, για την ανάπτυξη των αερόσακων και του συστήματος που ξεκλειδώνει τα φρένα του αυτοκινήτου (ABS). Κάποιες ενδεικτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν ενεργές επιφάνειες οχημάτων, όπως σπόιλερ και εισαγωγές αέρα που προσαρμόζονται για τη διαχείριση της ροής αέρα, τη βελτιωμένη αεροδυναμική και τις επιδόσεις καθώς και μηχανισμούς ανοίγματος καπό, θυρών και ντουλαπιών για πιο άνετη πρόσβαση.

Μερικά «αληθινά» έξυπνα υλικά – ηλεκτροχρωμικά υλικά – χρησιμοποιούνται στον αυτόματο φωτισμό και τον έλεγχο της θερμότητας στην αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ. οι καθρέφτες που θαμπώνουν και τα πίσω παράθυρα). Μια λιγότερο ώριμη εφαρμογή είναι η χρήση ενεργοποιητών σαν υποκατάστατα μικρών κινητήρων, όπου τα πλεονεκτήματα είναι το μειωμένο βάρος και οι λιγότερες βλάβες λόγω της μειωμένης πολυπλοκότητας. Επίσης η χρήση των έξυπνων υλικών για τη μείωση του θορύβου και της δόνησης είναι λιγότερο ώριμη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτιωμένη άνεση και τα οφέλη ως προς την ασφάλεια, ειδικά για τους επαγγελματίες οδηγούς.

Σήμερα, γίνεται μια προσπάθεια στην αυτοκινητοβιομηχανία προς το φρενάρισμα και την οδήγηση «με σύρμα». Έχει υιοθετηθεί μια υβριδική και εξελικτική προσέγγιση, με τους ηλεκτρικούς κινητήρες να αντικαθιστούν τα μηχανικά μέσα των κινούμενων υδραυλικών. Ο απώτερος σκοπός είναι η πλήρης αντικατάσταση των υδραυλικών με συστήματα που είναι όλα ηλεκτρικά. Η χρήση των έξυπνων υλικών μπορεί να βοηθήσει σ' αυτόν τον σκοπό, όπου για παράδειγμα, θα απαιτηθεί έλεγχος της κατάστασης στο τακάκι του δισκόφρενου προκειμένου να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα των φρένων. Αυτό θα χρειαστεί μέτρηση της θερμοκρασίας, του πάχους του τακακίου και της δύναμης των φρένων.

Έχουν αναπτυχθεί συστήματα ενεργούς διαθεσιμότητας για τη βελτίωση του ελέγχου του αυτοκινήτου και την άνεση του οδηγού. Η δυσκαμψία και η απόσβεση μπορούν να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας συστήματα που περιλαμβάνουν ηλεκτρο-μαγνητο-ρεολογικά υγρά, όμως έχουν προβλήματα με τη διάρκεια ζωής, τη συναρμολόγηση των σωματιδίων, την υπερβολική κατανάλωση ενέργειας και το κόστος. Οι περαιτέρω εξελίξεις σ' αυτά τα υλικά, και ίσως τα συστήματα που περιλαμβάνουν πιεζοηλεκτρικά υλικά θα μπορούσαν να ωφελήσουν τον κλάδο.

Επιλογικά, οι εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία τείνουν να απαιτούν υψηλό όγκο και υψηλή απόδοση, την ικανότητα να λειτουργούν σε ένα εχθρικό περιβάλλον και χαμηλό κόστος. Τα έξυπνα υλικά είναι πιθανό να επιτύχουν σ' αυτόν τον κλάδο αν μπορούν να αποδώσουν περισσότερες από μια λειτουργίες ή αν μπορούν να ενταχθούν με τέτοιο τρόπο που μειώνει τα κόστη συναρμολόγησης και παραγωγής.



## **6.2 Εφαρμογές στην ναυσιπλοΐα**

Οι περισσότερες εφαρμογές έχουν σχέση με την άμυνα και είναι μετρίου μεγέθους. Περιλαμβάνουν τη μέτρηση της τάνυσης σε ένα σύνθετο πηδάλιο, χρησιμοποιώντας ενσωματωμένες οπτικές ίνες Bragg σε μορφή πλέγματος (FOBG), μέτρηση της τάνυσης σε μεγάλη ίνα άνθρακα σύνθετου καταρτιού ενός γιωτ και τη μείωση της δόνησης σε πλοίο και αποβάθρες υποβρύχιου εξοπλισμού, υποβρύχια λαθραία οχήματα με ειδικούς τεχνητούς μύες σχεδιασμένους για κολύμβηση φτιαγμένους από ειδικά πολυμερή σώματα. Τα έξυπνα υλικά όμως δε χρησιμοποιούνται ακόμα ευρέως σ' αυτόν τον κλάδο. Μια πιθανή μελλοντική εφαρμογή είναι η αυτο-επιδιόρθωση των κατεστραμμένων κατασκευών κυρίως υποβρυχίως. Υπό ανάπτυξη βρίσκεται η εφαρμογή των έξυπνων υλικών σε υποβρύχια λαθραία οχήματα με ειδικούς τεχνητούς μύες σχεδιασμένους για κολύμβηση φτιαγμένους από ειδικά πολυμερή σώματα.

## **6.3 Εφαρμογές στη σιδηροδρομική**

Σημαντικός στη φάση ελέγχου της κατάστασης είναι ο έλεγχος στα τακάκια των φρένων, ο έλεγχος της κεραίας ρευματοληψίας της ηλεκτράμαξας, ο καθορισμός της ποιότητας της διαδρομής, μέτρηση της κατατομής της ρόδας, ο έλεγχος της μηχανής πάνω στη γραμμή.

Ο έλεγχος της κατάστασης της τροχιάς (και της ράγας) είναι ένα προφανές παράδειγμα όπου τα έξυπνα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης έχει διεξαχθεί έρευνα για την ενεργή απόσβεση της κεραίας ρευματοληψίας της ηλεκτράμαξας και την αντικατάστασή της με πιεζοηλεκτρικά υλικά.

## **6.4 Εφαρμογές στην αεροπορική βιομηχανία**

Μεγάλες αεροπορικές βιομηχανίες έχουν αναπτύξει εφαρμογές χρησιμοποιώντας έξυπνα υλικά με αποτέλεσμα να μειώνεται ο θόρυβος του κινητήρα του αεροπλάνου. Αεροπλάνα που θα ελέγχουν την καταπόνησή τους σε όλη τη διάρκεια της πτήσης και θα έχουν έτοιμη την αναφορά τους στον υπολογιστή σε συνδυασμό με υλικά που θα αυτοεπισκευάζονται προετοιμάζει η τεχνολογία για τον επόμενο αιώνα. Και θα πετύχει εκείνο που μέχρι σήμερα δεν έχει γίνει πραγματικότητα: να μειωθεί ή και να αποτραπεί η επικίνδυνη καταπόνηση. Μέχρι σήμερα, όσο και αν εξελίχθηκε η τεχνολογία στην κατασκευή και επιθεώρηση των αεροσκαφών, ποτέ δεν έπαψαν να γίνονται ατυχήματα, συχνά μάλιστα με πολλά θύματα.

Όπως εμφανίζεται η γήρανση σε κάθε ζωντανό οργανισμό έτσι και σε σύνθετες κατασκευές η κόπωση των υλικών συχνά έχει ολέθρια αποτελέσματα. Οι προσπάθειες της επιστήμης συγκεντρώνονται στις οπτικές ίνες που, διατρέχοντας ουσιαστικά ένα μεγάλο μέρος τους αεροπλάνου, θα προσθέσουν υψηλής τεχνολογίας νευρικό σύστημα στα έως χθες «άψυχα» αεροπλάνα. Οι οπτικοί αισθητήρες θα βλέπουν για αεροδυναμικές δυνάμεις, θα προσδιορίζουν ζημιές που οφείλονται σε χτυπήματα θα

μπορούν ακόμη και να ψάχνουν για αλλαγές στα υλικά λόγω διάβρωσης. Δικαιολογημένα λοιπόν η κόπωση των υλικών στα αεροπλάνα απασχολεί πολύ σοβαρά σχεδιαστές, μηχανικούς και το ειδικό προσωπικό εδάφους στα αεροδρόμια.



Πολύ εντυπωσιακό εδώ να τονιστεί είναι ότι τα αεροπλοια του μέλλοντος θα μεταφέρουν ολόκληρα κτίρια από μια περιοχή σε μια άλλη. Αυτές οι περίτεχνες ιπτάμενες συσκευές δε θα είναι τίποτα άλλο παρά η νέα γενιά αεροπλοίων που θα μπορούν να μεταφέρουν φορτίο μεγαλύτερο από 150 τόνους. Το σχήμα τους δε θα θυμίζει σε τίποτα τα γνώριμα αεροπλοια, αλλά θα μοιάζει με εκείνο του ιπτάμενου δίσκου ώστε να μπορούν να μεταφέρουν μεγάλο φορτίο και να παραμένουν σταθερά ανεξαρτήτως της διεύθυνσης και της έντασης των ανέμων. Ήδη μια εταιρία στην Αυστραλία ετοιμάζει ένα τέτοιου τύπου αεροπλοιο το οποίο θα έχει διάμετρο περίπου 150 μέτρα. Μάλιστα η απόσταση που θα μπορεί να διανύει μεταφέροντας το φορτίο θα ξεπερνά τα 1500 χιλιόμετρα. Οι υπεύθυνοι της εταιρίας SkyLifter πιστεύουν ότι τέτοιου τύπου αεροπλοια θα μπορούν να φανούν χρήσιμα για τη μεταφορά σταθμών πρώτων βοηθειών ή πρόχειρων νοσοκομείων σε περιοχές όπου έχει γίνει μεγάλη φυσική καταστροφή.

Σήμερα, τα μεγάλα μεταγωγικά ελικόπτερα έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν μέχρι 30 τόνους φορτίο. Τα μελλοντικά αεροπλοια θα μεταφέρουν πενταπλάσιο φορτίο και οι προωθητήρες που θα χρησιμοποιούν θα λειτουργούν με βιοντίζελ. Στην επιφάνεια του δίσκου θα υπάρχουν ηλιακοί συλλέκτες για να διοχετεύουν ρεύμα στα ηλεκτρονικά συστήματα διακυβέρνησης του σκάφους.

## 6.5 Εφαρμογές στον κατασκευαστικό κλάδο

Στον κλάδο των κατασκευών, οι εφαρμογές της έξυπνης τεχνολογίας χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: εποπτεία της ποιότητας της κατασκευής (συμπεριλαμβανομένου του εντοπισμού ζημιάς), έλεγχος της δόνησης και έλεγχος του περιβάλλοντος του χρήστη (οπτικό, θερμικό, ηλεκτρο-μαγνητικό, ακουστικό κ.λ.π.). Υπάρχει επίσης διαχωρισμός μεταξύ των εφαρμογών που σχετίζονται πρωταρχικά με κατασκευές που φέρουν

μεγάλο φορτίο και εκείνες που έχουν σχέση με τον εσωτερικό και εξωτερικό σχεδιασμό του κτίσματος και της λειτουργίας.

Είναι πολύ σημαντικό ότι τα έξυπνα υλικά μειώνουν το κόστος κατασκευών. Εν μέσω κρίσης στις οικοδομές, η κατασκευή κατοικιών στρέφεται προς τα προκάτ, τον πηλό, ακόμη και το χαρτί. Μετά τον εκκωφαντικό κρότο της φούσκας των ακινήτων, μια νέα τάση, αυτή των σπιτιών από φθηνά υλικά- μερικά από τα οποία είναι και φιλικά προς το περιβάλλον- φαίνεται να κερδίζει όλο και περισσότερους οπαδούς. Από τις ΗΠΑ, όπου κατασκευάζουν στούντιο με σάκους με χώμα, έως τις ελβετικές χάρτινες «γκαρσονιέρες» και τα διαμερίσματα από πηλό στην Κρήτη, η τάση για φθηνές κατοικίες μοιάζει να καλπάζει ολοταχώς. Την ίδια ώρα, με γοργούς ρυθμούς τρέχουν και οι πειραματισμοί με ανακυκλούμενα δομικά υλικά, όπως μετόν με χαρτί, φλοιούς ρυζιού, πλαστικό, αλλά και οξειδίο του μαγνησίου το οποίο απορροφά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αναμένεται να είναι φθηνότερο από το κανονικό τσιμέντο.

Όμως, το πόσο οικονομικά είναι τα δομικά υλικά δε μας δείχνει και το τελικό κόστος της κατοικίας: «Ένα σπίτι μπορεί να είναι πάμφθιμο με συμβατικά υλικά και ακριβό με υλικά χαμηλού κόστους. Μεγάλο ρόλο παίζει η τεχνογνωσία που έχει το τεχνικό προσωπικό στα υλικά που χρησιμοποιούνται», επισημαίνει ο διευθυντής του Εργαστηρίου Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Αθ. Τριανταφύλλου.

Ωστόσο, για την πραγματική επανάσταση των φθηνών σπιτιών, ο δρόμος είναι ακόμα μακρύς καθώς, όπως επισημαίνουν οι ειδικοί, δεν έχει βρεθεί προς το παρόν το νέο υλικό που θα ανατρέψει το καθεστώς του... μετόν και του συμβατικού τρόπου δόμησης.

«Γίνονται πολλές προσπάθειες για να βρεθούν νέα υλικά, αλλά καμία από αυτές δεν έχει αποδειχθεί ότι είναι πρόσφορη για τις κλιματικές συνθήκες και τη σεισμικότητα της χώρας μας. Η πλέον οικονομικά συμφέρουσα λύση για ισόγειες και διώροφες κατοικίες είναι τα λιθοσώματα για την τοιχοποιία με πατώματα από μετόν σε συνδυασμό πάντα με τη λήψη μέτρων ώστε να καθίσταται η κατοικία αντισεισμική. Υπολογίζω ότι σε αυτή την περίπτωση, το κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο ανέρχεται στα 900-1.200 ευρώ- ανάλογα με το πόσο πολυτελή υλικά θα χρησιμοποιήσουμε στο εσωτερικό της οικίας. Είναι πιο οικονομικό, δεδομένου ότι μια κλασική κατασκευή πλησιάζει τα 1.100-1.500 ευρώ ανά τ.μ.», λέει στα «ΝΕΑ» ο κ. Θ. Δραγκιώτης, μέλος της διοικούσας επιτροπής του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας.

Επιπλέον, έξυπνα υλικά και δομές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση των κατασκευών πολιτικού μηχανικού για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας. Η παρακολούθηση της τρέχουσας και μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς μιας γέφυρας, θα οδηγούσε στην αύξηση της ασφάλειας κατά τη διάρκεια της ζωής της, δεδομένου ότι θα παρείχε έγκαιρη προειδοποίηση των διαρθρωτικών προβλημάτων σε ένα στάδιο όπου οι μικροεπισκευές θα ενίσχυαν την ανθεκτικότητα, και όταν

χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις κατασκευές αποκατάστασης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ελέγχει με ασφάλεια την κατασκευή πέρα από την αρχική ζωή σχεδίασης. Αυτό θα επηρέαζε το κόστος ζωής αυτών των κατασκευών με τη μείωση του αρχικού κόστους κατασκευής (αφού οι έξυπνες κατασκευές θα επέτρεπαν μειωμένους συντελεστές ασφαλείας στο αρχικό σχέδιο), καθώς και την επέκταση της ασφαλούς ζωής της κατασκευής. «Έξυπνα» υλικά και κατασκευές έχουν επίσης ένα ευρύ φάσμα πιθανών οικιακών εφαρμογών, όπως σε συσκευασίες των τροφίμων για την παρακολούθηση της ασφαλούς αποθήκευσης και το μαγείρεμα.

Τα παραπάνω παραδείγματα αφορούν μόνο «έξυπνες» δομές. Ωστόσο, τα έξυπνα υλικά και δομές προσφέρουν τη δυνατότητα στις κατασκευές, οι οποίες όχι μόνον αισθάνονται, αλλά και προσαρμόζονται στο περιβάλλον τους. Τέτοια προσαρμοστικά υλικά και κατασκευές οφελούνται από έξυπνες απόψεις όπως τονίστηκε πιο πάνω, αλλά, επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να κινούνται, να δονούνται, και να παρουσιάζουν ένα πλήθος άλλων αποκρίσεων σε πραγματικό χρόνο.

Οι πιθανές εφαρμογές αυτών των προσαρμοστικών υλικών και δομών κυμαίνονται από την ικανότητα να ελέγχουν τον τύπο του αεροελαστικού ενός φτερού αεροσκάφους, ελαχιστοποιώντας έτσι την έλξη και τη βελτίωση της λειτουργικής αποδοτικότητας, τον έλεγχο των δονήσεων ελαφριών δομών, όπως οι δορυφόροι. Το εγχώριο περιβάλλον είναι επίσης μια δυνητική αγορά για τα υλικά και τις κατασκευές, με τη δυνατότητα της αφής υλικών για τα καθίσματα, τις οικιακές συσκευές και άλλα προϊόντα. Αυτές οι έννοιες μπορεί να φαίνεται «ουρανοκατέβατες», αλλά η τεχνολογία εξελίσσεται πολύ γρήγορα.

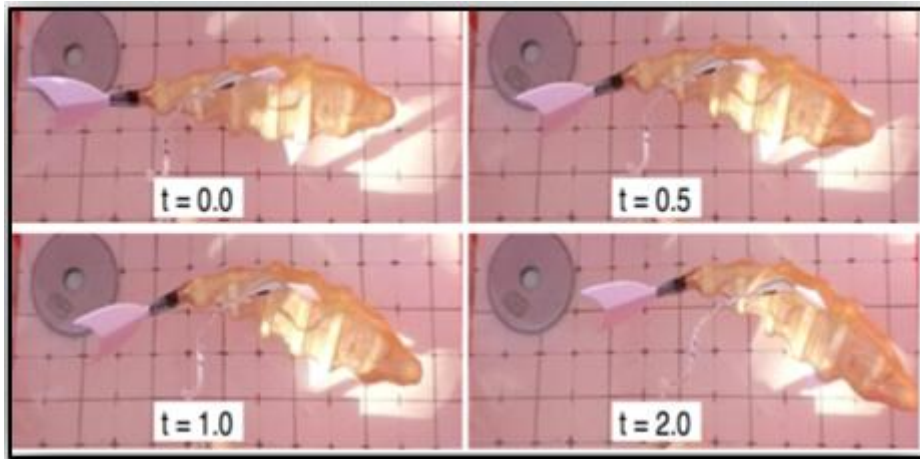
## **6.6 Εφαρμογές στα Ρομποτικά Συστήματα**

Υπάρχει ακόμη περιορισμένος αριθμός ερευνών όσον αφορά τη χρήση έξυπνων υλικών στη ρομποτική. Αυτά τα υλικά δίνουν την δυνατότητα κατασκευής πολύ ελαφριών ρομπότ. Η αχίλλειος πτέρνα αυτής της τεχνολογίας είναι η χαμηλή αυτονομία, οι χαμηλοί χρόνοι απόκρισης και η υψηλή υστέρηση. Το κράμα Nitinol εφαρμόζεται επίσης στη ρομποτική και σε μερικά μαγικά τρικ, ειδικά αυτά που περιλαμβάνουν παραγωγή θερμότητας και μεταβολή σχήματος.

Χαρακτηριστικός τομέας εφαρμογής των έξυπνων υλικών είναι η Βιοεμπνευσμένη Βιορομποτική. Η έρευνα της βιολογικά εμπνευσμένης ρομποτικής έρευνας είναι κυρίως επικεντρωμένη στο βιομιμητικό ζήτημα των βιολογικών συστημάτων. Μπορούμε να επωφεληθούμε από τις νέες εξελίξεις στα υλικά, την τεχνολογία κατασκευής και τους αισθητήρες, ώστε να προσεγγίσουμε τη βιο-έμπνευση με ένα τεχνητό αντίγραφο από την άποψη μορφολογίας, μετακίνησης και συμπεριφοράς.

- Το ρομποτικό ψάρι μπορεί να μιμηθεί τους carangiform και υπο-carangiform κολυμβητές, και ενεργοποιείται από την τεχνητή τεχνολογία των μυών. Η θέση

και η λειτουργία των μυών μιμείται τους κόκκινους αργοσυσπόμενους μύες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια σταθερής κολύμβησης. Ο σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να μελετήσει και να αναπαράγει πρότυπα κολύμβησης για τα ψάρια, προκειμένου να αναλύσει την αποτελεσματική υποβρύχια κίνηση και ευελιξία. Το μοντέλο είναι κατασκευασμένο από ευλύγιστη κατασκευή, που χωρίζεται σε τρία τμήματα, που το καθένα ενεργοποιείται από δύο ανταγωνιστές μύες που κατασκευάζονται με την τεχνολογία έξυπνων υλικών, συγκεκριμένα με Κράματα Μνήμης Σχήματος (SMAS).

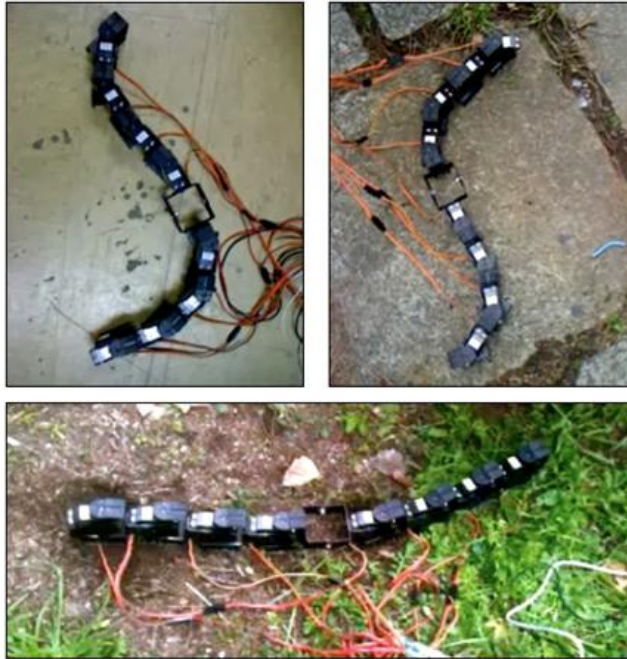


*Βιομημητικός Σχεδιασμός Ψαριού, χρησιμοποιώντας Έξυπνα Υλικά*

- Σε γενικές γραμμές, τα ψάρια μπορούν να προσαρμοστούν σε ένα συγκεκριμένο έδαφος που χρησιμοποιεί μεταβολές στο σχήμα των μυών τους. Αυτή η δυνατότητα παρέχει ψάρια με μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα σε τραχύ έδαφος σε ανώμαλες επιφάνειες σε σύγκριση με ζώα που διαθέτουν πόδια, για να μην αναφέρουμε τα τροχοφόρα ρομπότ.

Χρησιμοποιούμε ένα ψάρι που μοιάζει με ρομπότ για:

- Ενεργειακά αποδοτική μετακίνηση
- Πρότυπο επιφανειακής τριβής
- Κατανεμημένο έλεγχο.

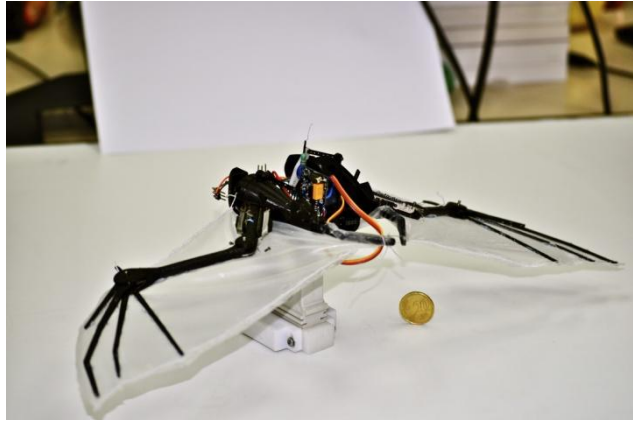


*Άτροχα ρομπότ που μοιάζουν με φίδι*

- Το BaTbot είναι ένα βιο-εμπνευσμένο σαν νυχτερίδα εναέριο όχημα που χρησιμοποιεί έξυπνα υλικά που επιτρέπουν στο ρομπότ να αλλάξει μορφολογία πτερυγίων κατά τη διάρκεια του πετάγματος. Τα Κράματα Μνήμης Σχήματος έχουν μύες που χρησιμοποιούνται ως το μυϊκό σύστημα ενεργοποίησης που ισχυροποιεί τη σκελετική-πτερυγωτή δομή της νυχτερίδας.

Η έρευνα αυτή προσανατολίζεται προς:

- Ανάλυση σε ιστούς εντός ζώντος οργανισμού της κινηματικής του πετάγματος της νυχτερίδας
- Κατανόηση της αεροδυναμικής της νυχτερίδας.
- Δυναμική / αεροδυναμική διαμόρφωση του πετάγματος και της μορφολογίας των φτερών.
- Βελτίωση της απόδοσης της τρέχουσας τεχνολογίας ενεργοποίησης των Κραμάτων με Μνήμη Σχήματος.
- Ανάπτυξη ενός βιο-εμπνευσμένου ρομπότ νυχτερίδα.
- Έλεγχο πετάγματος νυχτερίδας σχετικά με την ενεργοποίηση των Κραμάτων με Μνήμη Σχήματος, και μη γραμμική φυσική συμπεριφορά νυχτερίδας.



*BaTboT: ένα βιοεμπνευσμένο υλικό με πτερωτή μορφή πετάει.*

## **6.7 Εφαρμογές στη βιομηχανία παραγωγής σωλήνων**

Η πρώτη εμπορική εφαρμογή των Κραμάτων με Μνήμη Σχήματος είναι οι σωλήνες, όπως σωλήνες για δίκτυο πετρελαίου για εφαρμογή σε βιομηχανίες, καθώς και σωλήνες μεταφοράς νερού που χρησιμοποιούνται σε καταναλωτικές και εμπορικές εφαρμογές. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 είχαμε την εμπορική εκμετάλλευση του Nitinol (κράμα Ni-Ti) ως νέα τεχνολογία σε μια πληθώρα καρδιαγγειακών εφαρμογών. Ενώ το Nitinol είναι πιο ακριβό σε σχέση με το ασάλι, οι ιδιότητες του έδωσαν μια πιο ελκυστική εναλλακτική λύση στα μπαλονάκια για αρτηρίες. Κατά μέσο όρο το 50% των περιφερειακών αγγειακών stent που κυκλοφορούν στην παγκόσμια αγορά είναι φτιαγμένα από Nitinol.

## **6.8 Εφαρμογές στον αθλητισμό και τον τομέα αναψυχής**

Ο τομέας του αθλητισμού πάντα αγκάλιαζε νέα δομικά υλικά όπως κράματα αργιλίου, κράματα τιτανίου, προηγμένα πολυμερή, γυαλί και σύνθετα από άνθρακα. Τα υλικά αυτά σπάνια αναπτύσσονται από τη βιομηχανία του αθλητισμού και έχουν την τάση να προέρχονται από εκεί που αναπτύχθηκαν τα υλικά για στρατιωτικές, αεροδιαστημικές και μεταφορικές εφαρμογές. Το κύριο εμπόδιο είναι η έλλειψη επίγνωσης και κατανόησης των ιδιοτήτων και των εφαρμογών των έξυπνων υλικών από αυτούς που εργάζονται στη βιομηχανία των σπορ (τους χρήστες εξοπλισμού, τους σχεδιαστές εξοπλισμού και τους επιστήμονες των σπορ). Υπάρχει επίσης έλλειψη δημοσιευμένης εργασίας για τα έξυπνα υλικά στην επιστήμη των σπορ και στο πεδίο της μηχανολογίας.

Τα έξυπνα υλικά συχνά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή έξυπνων συστημάτων και περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα υλικών όπως πιεζοηλεκτρικά, μαγνητοσυσταλτικά, κράματα με μνήμη σχήματος και πολυμερή, θερμο-χρωμικά και ηλεκτρο-χρωμικά υλικά, και αγωγή πολυμερή. Η πιεζοηλεκτρική ρακέτα του τένις που κατασκευάστηκε από τον Head είναι ένα καλό παράδειγμα ενός έξυπνου συστήματος στον αθλητισμό. Σ' αυτήν τη ρακέτα του τένις είναι ενσωματωμένες πιεζοηλεκτρικές ίνες που συνδέονται σε ηλεκτρόδια, τα οποία στοχεύουν στη μείωση των κραδασμών στο βραχίονα του

παίκτη (εικάζεται ότι οι κραδασμοί μειώνονται κατά το ήμισυ σε σχέση με τις συμβατικές ρακέτες).

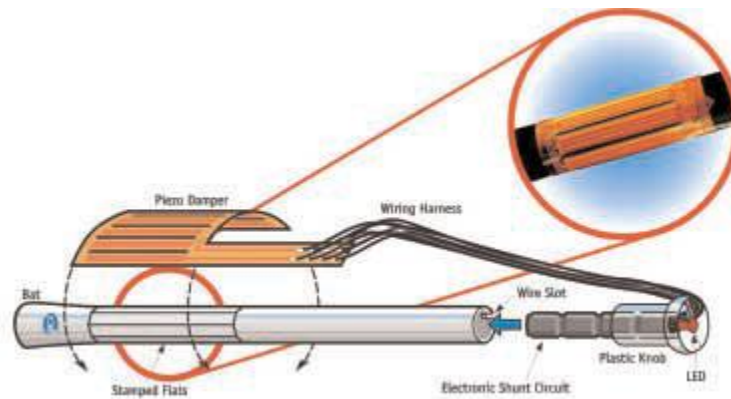


Ένας άλλος σημαντικός τομέας εφαρμογής των έξυπνων υλικών στον τομέα του αθλητισμού και της αναψυχής είναι η εφαρμογή των Κραμάτων Μνήμης Σχήματος (SMAS), τα οποία είναι ικανά να ανακτήσουν μόνιμες παραμορφώσεις ως αποτέλεσμα μιας φάσης μετάπτωσης όταν θερμαίνονται. Τα κράματα έχουν χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπως σκελετούς γυαλιών και στηθόδεσμων, λόγω των υπερελαστικών τους ιδιοτήτων. Άτομα από το χώρο του γκολφ έχουν επίσης χρησιμοποιήσει Κράματα Μνήμης Σχήματος, λόγω των υψηλών ιδιοτήτων απόσβεσης που συνδέονται με τη μετάβαση φάσεως του υλικού αυτού. Ο Grado Zero Espace έχει χρησιμοποιήσει ακόμα και Κράματα Μνήμης Σχήματος για να κατασκευάσει ένα πουκάμισο με μνήμη.

Το ένδυμα είναι κατασκευασμένο από ένα ύφασμα που αποτελείται από νάιλον και υφαίνεται με κράμα μνήμης σχήματος νικελίου-τιτανίου. Αν το ύφασμα είναι τσαλακωμένο, το προηγούμενο σχήμα μπορεί να αποκατασταθεί χρησιμοποιώντας θερμό αέρα. Η εταιρεία έχει επίσης χρησιμοποιήσει ένα υλικό μεμβράνης, το Diaplex, που παράγεται από τη Mitsubishi Heavy Industries για ρούχα ψυχρού καιρού που μπορούν να αυτο-ρυθμίσουν την εσωτερική θερμοκρασία τους και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Η μεμβράνη πλαστικοποιείται από μια μνήμη σχήματος πολυμερούς πολυουρεθάνης της οποίας η διαπερατότητα σε υδρατμούς και θερμότητα αυξάνει με τη θερμοκρασία. Αυτό επιτρέπει στο ύφασμα να είναι αδιάβροχο, αντιανεμικό και να αναπνέει. Κατά ένα παρόμοιο τρόπο με τα SMAS, το πολυμερές αλλάζει δομή σε μία θερμοκρασία μετάπτωσης. Μετά από επίπονες δραστηριότητες, ή λόγω της αύξησης της εξωτερικής θερμοκρασίας, το ένδυμα φθάνει τη θερμοκρασία μετάβασης και γίνεται διαπερατό στον ατμό νερού και τη θερμότητα, έτσι ψύχει τον χρήστη. Καθώς η εσωτερική θερμοκρασία πέφτει, το υλικό επιστρέφει σε μια λιγότερο διαπερατή δομή, κρατώντας το χρήστη ζεστό.



Επίσης, τα έξυπνα υλικά έχουν εφαρμογή στις όψεις των μαστουριών του γκολφ λόγω των υπερελαστικών και της υψηλής απόσβεσης των ιδιοτήτων, σε ρόπαλα του μπιέζμπολ και σε σανίδες του σκι προκειμένου να μειώσουν τους κραδασμούς σ' αυτά τα αθλητικά είδη, αυξάνοντας την άνεση του χρήστη και τη μείωση των τραυματισμών.



Ένα μικρό ηλεκτρικό ρόπαλο του μπιέζμπολ.

## 6.9 Εφαρμογές για στρατιωτικούς σκοπούς

Οριοθετείται ένας αριθμός ευδιάκριτων στρατιωτικών εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται έξυπνα υλικά και ευφυή συστήματα, μεταξύ των οποίων:

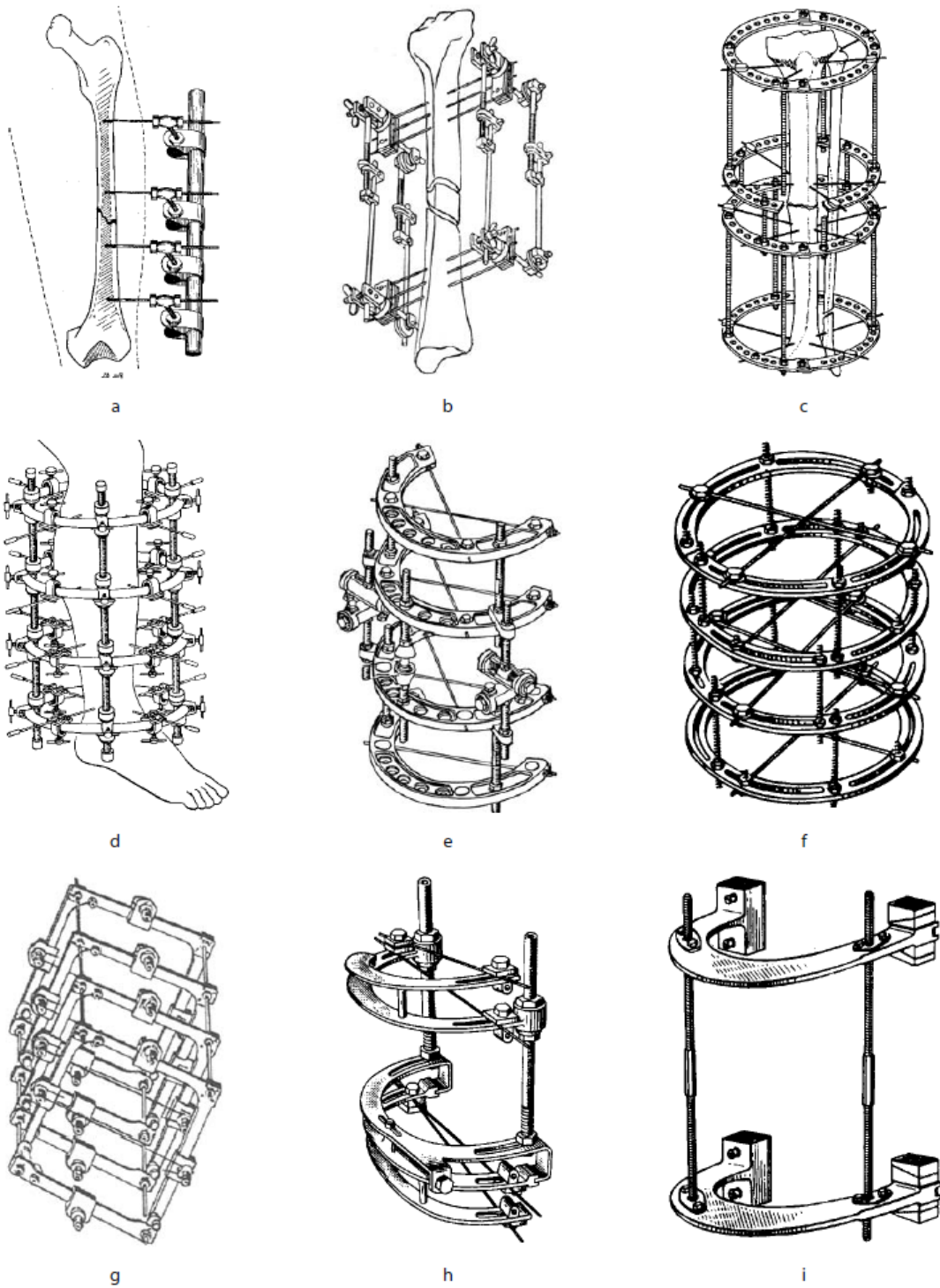
- *Έξυπνο δέρμα.* Στην μάχη οι στρατιώτες θα μπορούσαν να φορέσουν ένα T-shirt κατασκευασμένο από ειδικό οπτικό υλικό που μπορεί να ανιχνεύσει μια ποικιλία σημάτων από το ανθρώπινο σώμα, όπως είναι η ανίχνευση των χτυπημάτων από σφαίρες. Μπορεί να επισημανθεί τότε η φύση της πληγής ή του τραυματισμού, να αναλυθεί η έκτασή τους, να αποφασισθεί σχετικά με τον επείγοντα χαρακτήρα να αντιδράσει, και μάλιστα να αναληφθεί κάποια δράση για τη σταθεροποίηση της ζημίας.
- *Αυτόνομα Έξυπνα συστήματα.* Έξυπνα οχήματα ξηράς, θαλάσσης ή διαστήματος θα είναι χαρακτηριστικά των μελλοντικών μαχών. Αυτά τα συστήματα μεταφοράς, επανδρωμένα ή μη, και εξοπλισμένα με αισθητήρες, ενεργοποιητές και εξελιγμένους ελέγχους, θα βελτιώσουν την επιτήρηση και ταυτοποίηση στόχου, καθώς και την επάνδρωση των μαχών.
- *Λαθραίες Εφαρμογές.* Τα έξυπνα οχήματα που αναφέρονται παραπάνω θα μπορούσαν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας λαθραίες τεχνολογίες για την προστασία τους: το B-2 λαθραίο βομβαρδιστικό ή το F-117 λαθραίο μαχητικό αποτελούν καλά παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας. Και, εξίσου σημαντικό, τα έξυπνα συστήματα είναι απαραίτητα για την ταχεία και αξιόπιστη αναγνώριση του χώρου ή λαθραίων υποβρύχιων στόχων. Η ταυτοποίηση και ανίχνευση των στόχων αυτών, καθώς και η μεταγενέστερη απόφαση να αναλάβουν δράση με ή χωρίς την παρέμβαση του χειριστή, είναι μια άλλη πιθανή εφαρμογή των έξυπνων συστημάτων.

## 6.10 Εφαρμογές στην ιατρική και την οδοντιατρική

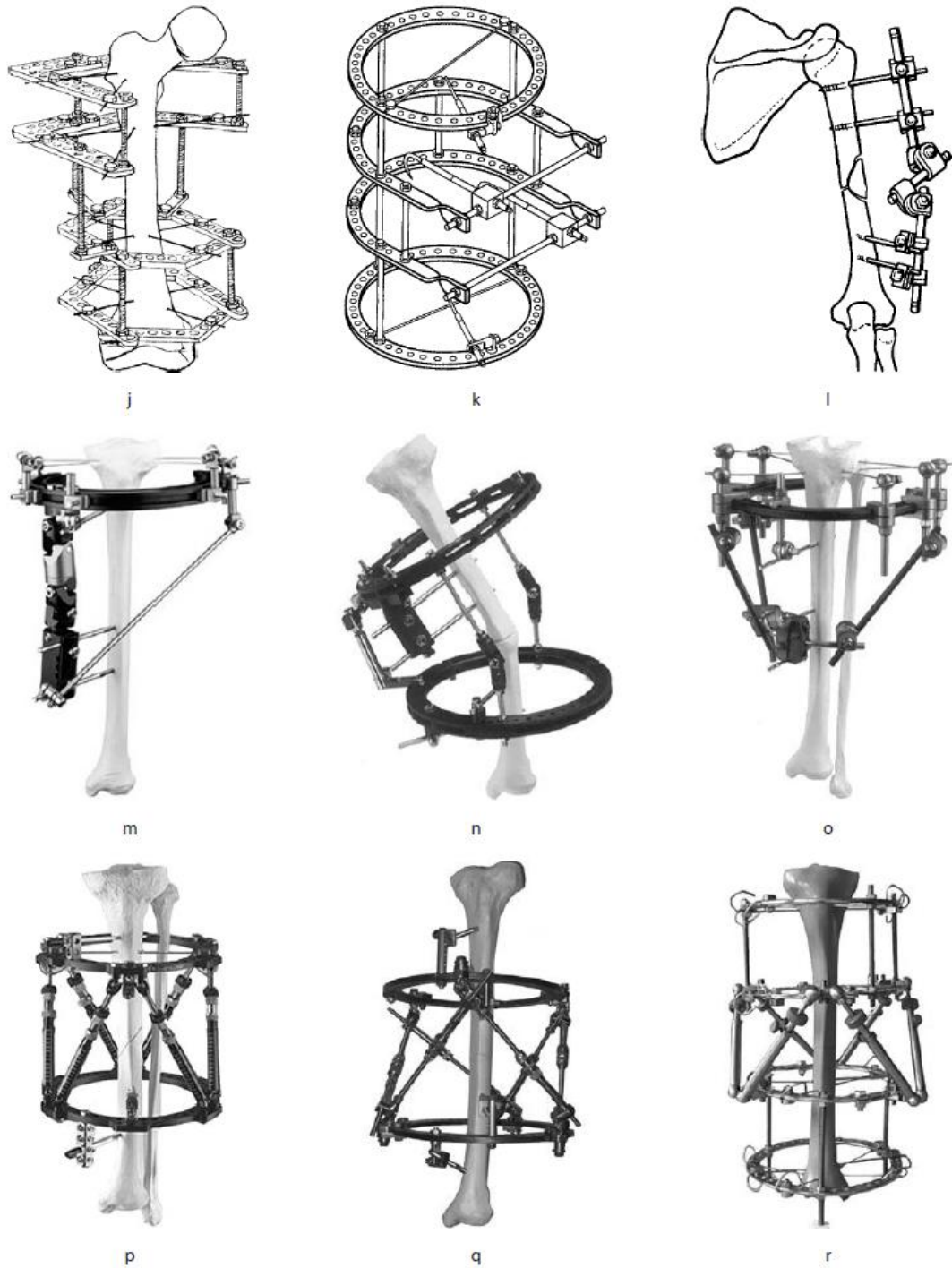
### 6.10.1 Εφαρμογές σε πλατφόρμες οστεογένεσης

Στις μέρες μας, η ρομποτική χειρουργική αναγνωρίζεται ευρέως ως τεράστια πρόκληση για τη ρομποτική έρευνα. Ο τομέας αυτός ελκύει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητικών ομάδων ανά τον κόσμο και ήδη έχουν επιτευχθεί εντυπωσιακά αποτελέσματα, από τεχνολογικής απόψεως. Η διατατική οστεογένεση (μέθοδος Pizarov) αποτελεί μια επαναστατική μέθοδο επιμήκυνσης των οστών και βασίζεται στις αρχές που εφάρμοσε ο Ρώσος καθηγητής και ακαδημαϊκός Gavriil Abramovich Pizarov, εμπνευστής και δημιουργός της μεθόδου και της συσκευής που φέρει το όνομά του και διαμόρφωσε μια νέα εποχή στην ορθοπεδική χειρουργική. Για να σχεδιαστεί επομένως μία κατασκευή, που θα είναι ισοδύναμη με μία πλατφόρμα Pizarov, είναι απαραίτητη η μελέτη και η κατανόηση της συγκεκριμένης μεθόδου.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα στην ανάπτυξη των συσκευών Pizarov είναι, πέρα από το μεγάλο βάρος και τον όγκο τους, που ταλαιπωρούν τον ασθενή, και οι περιορισμένες δυνατότητες των κλασικών τρόπων ενεργοποίησης (DC κινητήρες, υδραυλικοί, πνευματικοί ενεργοποιητές). Μάλιστα, η πιο συνηθισμένη μέθοδος ενεργοποίησής τους, οι DC κινητήρες, συντελούν σημαντικά στην αύξηση του βάρους και του όγκου της συσκευής. Γι' αυτόν το λόγο, οι επιστήμονες έχουν στρέψει τελευταία την προσοχή τους στη χρήση νέας γενιάς μικρών, μεγάλης δύναμης, βιομιμητικών, τεχνητών μυϊκών ενεργοποιητών από έξυπνα υλικά. Η χρήση τέτοιων προηγμένων ενεργοποιητών βασισμένων στα έξυπνα υλικά μπορεί πράγματι να συμβάλλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη πρωτοποριακών ρομποτικών συστημάτων για τη χειρουργική και δη συσκευών Pizarov.



Συσκευές σταθεροποίησης (external fixators) a. Lambotte, b. Hoffman-Vidal, c. Ilizarov, d. Kalnberz, e. Volkov-Oganessian, f. Demianov, g. Tkachenko, h. Gudushauri, i. Sivash



j. Lee, k. Barabash, l. Synthes, m. Biomet, n. OrthoFix, o. Stryker, p. Taylor spatial frame, q. SUV-frame, r. Poli Hex

Κατόπιν αξιολόγησης όλων των διαθέσιμων συσκευών εξωτερικής οστεοσύνθεσης, προκύπτει το συμπέρασμα πως η συσκευή του G.A. Pizarov (Gavriil Abramovich Pizarov) είναι η πιο ολοκληρωμένη. Αν και το σύνολο των εξαρτημάτων της φαίνεται πολύ περίπλοκο με την πρώτη ματιά, η συσκευή αυτή καθιστά δυνατή τη συναρμολόγηση οποιουδήποτε τύπου από τις συσκευές για οστεοσύνθεση που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Επιπλέον, επιτρέπει την εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου οστεοσύνθεσης είτε κατ'αποκλειστικότητα είτε σε συνδυασμό, ταυτόχρονα στο ίδιο

άκρο. Η συσκευή Pizaron αποτελείται από σύρματα, μπουλόνια, μεταλλικούς δακτυλίους, νηματοειδείς ράβδους, στρόφιγγες και ενισχυτικά μεταλλικά ελάσματα. Όλα τα παραπάνω εξαρτήματα επιτρέπουν τη δημιουργία περισσότερων από 800 διαφορετικών διατάξεων. Η συσκευή από μηχανικής άποψης είναι δύσκαμπτη για κάμψη (λύγισμα) και για στρέψη, αλλά είναι λιγότερο δύσκαμπτη για αξονική επιβάρυνση, η οποία θεωρείται ότι βοηθάει την οστεογένεση.



Ο προεγχειρητικός σχεδιασμός είναι πολύ βασικός για να εφαρμοστεί με επιτυχία η μέθοδος Pizaron. Η επέμβαση αποτελείται από μία αρχική εγχείρηση, κατά τη διάρκεια της οποίας προκαλείται χειρουργικά κάταγμα στο οστό και προσαρμόζεται η συσκευή Pizaron. Πρέπει να δοθεί προσοχή κατά την εισαγωγή των συρμάτων, προκειμένου να μην προκληθούν ζημιές σε ζωτικά νεύρα και αιμοφόρα αγγεία. Επίσης, πρέπει να προσαρμοστεί πολύ προσεκτικά το δέρμα, έτσι ώστε να μην υπάρξει τάνυση στη διεπιφάνεια δέρματος και σύρματος. Στη συνέχεια σταθεροποιούνται τα σύρματα και εφαρμόζεται τάνυση στα μεταλλικά δακτυλίδια, τα οποία συνδέονται με τις νηματοειδείς ράβδους. Καθώς το οστό αναπτύσσεται, το πλαίσιο ρυθμίζεται περιστρέφοντας τα παξιμάδια στις σφήνες, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το διάστημα ανάμεσα στα δύο δακτυλίδια. Το πλαίσιο Pizaron μπορεί να κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπει την κατάλληλη διόρθωση σε οποιαδήποτε παραμόρφωση ή επιμήκυνση.

Σε περιπτώσεις επιμήκυνσης άκρου, το νέο οστό θα ξεκινήσει να φαίνεται μέσα σε τρεις ή τέσσερις εβδομάδες, από την εκκίνηση της διαδικασίας της διάτασης. Όταν θα έχει επιτευχθεί το επιθυμητό μήκος ή όταν θα έχει διορθωθεί η γωνιακή παραμόρφωση,

η συσκευή θα πρέπει να παραμείνει στη θέση της μέχρι να ολοκληρωθεί η φάση της ενοποίησης του οστού. Το πλαίσιο Ilizarov μπορεί να αντέξει όλο το βάρος του ασθενούς, ο οποίος αρχικά μπορεί να χρησιμοποιήσει πατερίτσες, ενώ ο πόνος μειώνεται σταδιακά. Με την ολοκλήρωση της θεραπείας, μία δεύτερη εγχείρηση είναι απαραίτητη, για να αφαιρεθεί η συσκευή.



Το πλαίσιο Taylor, το οποίο εφευρέθηκε από τον Dr. John Charles Taylor στα μέσα της δεκαετίας του '90, είναι μία εξωτερική σταθεροποιητική συσκευή που χρησιμοποιείται για να εφαρμοστεί η μέθοδος Ilizarov. Η συσκευή, που είναι κινηματικά ισοδύναμη με την πλατφόρμα Stewart, αποτελείται από δύο κυκλικές βάσεις ή δακτυλίους, έξι πτυσσόμενες συνδετικές ράβδους και δώδεκα καθολικούς συνδέσμους, οι οποίοι συνδέουν τις ράβδους με τις βάσεις. Οι έξι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τις παραμορφώσεις, σχετίζονται με τις μετατοπίσεις πάνω στις ράβδους στην αντίστροφη κινηματική.

Προεγχειρητικά, ο χειρουργός καθορίζει την επιθυμητή διόρθωση και προσδιορίζει το ουδέτερο σχήμα του πλαισίου, το οποίο είναι το επιδιωκόμενο σχήμα όταν θα έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της απόσπασης. Στη συνέχεια, ένα πρόγραμμα στον υπολογιστή υπολογίζει τα μήκη των ραβδών στο αρχικό και στο τελικό σχήμα. Κατά τη διάρκεια της εγχείρησης, όπως και με άλλα πλαίσια Ilizarov, το πλαίσιο Taylor εφαρμόζεται στο παραμορφωμένο οστό με σύρματα και σφήνες. Μετεγχειρητικά, αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία διόρθωσης, οποιαδήποτε εναπομένονσα παραμόρφωση μπορεί να διορθωθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη ενός νέου σχεδίου, που θα αλλάξει το πλαίσιο Taylor, από το σχήμα στο οποίο κατέληξε το πλαίσιο μετά τη διαδικασία διόρθωσης, σε ένα τελικό σχήμα, το οποίο θα είναι παρόμοιο με το αρχικό ουδέτερο σχήμα της πρώτης διόρθωσης. Αυτό το νέο τελικό σχήμα εξαρτάται από την παρούσα εναπομένονσα παραμόρφωση και θα επιτευχθεί με τον υπολογισμό μίας νέας διαδικασίας διόρθωσης. Το πλαίσιο Taylor, στο αρχικό και στο τελικό του σχήμα σε μία εφαρμογή σε πλαστικό μοντέλο οστού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



*Το πλαστικό μοντέλο ενός μηριαίου οστού από μία δοκιμή με την καθοδήγηση υπολογιστή. Το πλαίσιο Taylor είναι στο αρχικό του σχήμα στην αριστερή εικόνα και στο ουδέτερο σχήμα στην δεξιά.*



*Ακτινογραφία ενός Taylor Spatial Frame τοποθετημένου σε ένα κνημιαίο οστό με κάταγμα στο επάνω τμήμα του*

### 6.10.2 Εφαρμογές των κραμάτων NiTi

Η βιοσυμβατότητα των NiTi επιτρέπει τη χρήση τους σε πολλές ιατρικές εφαρμογές, όπως: αγγειακά stents, άγκυρες για την προσάρτηση των τενόντων προς το οστό, ιατρικά σύρματα, εύκαμπτα χειρουργικά εργαλεία, και συσκευές για το κλείσιμο οπών στην καρδιά. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του Ni-Ti στην ιατρική είναι η υπερελαστικότητα του.

Μια συνηθισμένη εφαρμογή του είναι τα γνωστά μας «σιδεράκια» στα δόντια. Το συρμάτινο τόξο αυτών των ιμάντων που χρησιμοποιούνται στην ορθοδοντική είναι κατασκευασμένο από μέταλλο μνήμης για την άσκηση ομοιόμορφη πίεσης στα δόντια.



*Ζεύγματα συρμάτινου τόξου κατασκευασμένα από μέταλλο μνήμης*

Άλλη σημαντική εφαρμογή του είναι οι ευέλικτοι σκελετοί γυαλιών. Η κάμψη των πλαισίων μνήμης των μεταλλικών γυαλιών μετατρέπει το μέταλλο από την άκαμπτη οστενιτική δομή στην πιο ευέλικτη δομή του μαρτενσίτη. Όταν η μηχανική τάση έχει αφαιρεθεί, τα πλαίσια επιστρέφουν στο αρχικό τους σχήμα σε κατάσταση οστενίτη. Στην εικόνα φαίνεται η στρέβλωση ενός ακριβούς ζευγαριού πλαισίων, όταν εκτίθενται σε υγρό άζωτο.

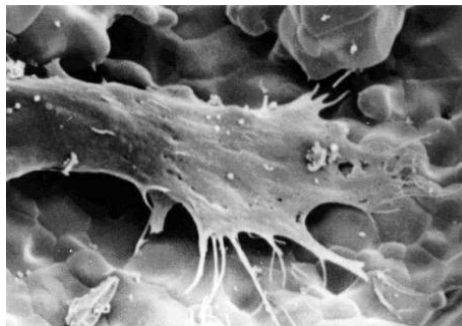


*Σκελετοί γυαλιών από μέταλλο μνήμης*

Επίσης, τα έξυπνα κεραμικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην ιατρική. Ειδικότερα, τα κεραμικά χρησιμοποιούνται ως συστατικά των οδοντικών εμφυτευμάτων, εμφυτευμάτων ισχίου, μεσαία εμφυτεύματα ωτός, και βαλβίδες της καρδιάς. Είναι γενικά πιο χημικώς σταθερά και αδρανή από τα περισσότερα μέταλλα λόγω της χημικής σύνδεσής τους. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο υλικό είναι αλουμίνα, ζirkόνια, βιοϋαλος, υδροξυαπατίτης, και φωσφορικό ασβέστιο. Αυτά τα υλικά λειτουργούν καλά μέσα στο ανθρώπινο σώμα για διάφορους λόγους. Είναι αδρανή, και επειδή είναι απορροφήσιμα και ενεργά, τα υλικά μπορούν να παραμείνουν στο σώμα αμετάβλητα. Μπορούν επίσης να διαλύονται και να συμμετέχουν ενεργά σε φυσιολογικές διαδικασίες, για παράδειγμα, όταν ο υδροξυαπατίτης, ένα υλικό χημικώς



παρόμοιο με τη δομή των οστών, μπορεί να ενσωματώσει και να βοηθήσει το οστόν ν'αναπτυχθεί. Μία προτεινόμενη χρήση για βιοκεραμικά είναι η θεραπεία του καρκίνου. Δύο μέθοδοι θεραπείας έχουν προταθεί, η θεραπεία μέσω της υπερθερμίας, και η ακτινοθεραπεία.



*Κύτταρο υδροξυαπατίτη*

Τα έξυπνα βιοϋλικά όπως ο υδροξυαπατίτης έχουν εφαρμογή στην ιατρική. Ο υδροξυαπατίτης μπορεί να βρεθεί στα δόντια και στα οστά μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Έτσι, συνήθως χρησιμοποιείται ως πληρωτικό για την αντικατάσταση των ακρωτηριασμένων οστών ή σαν ένα επίχρισμα για την προαγωγή της εσωτερικής ανάπτυξης οστού μέσα από προσθετικά εμφυτεύματα. Παρά το γεγονός ότι πολλές άλλες φάσεις υπάρχουν με παρόμοιες ή ακόμη και ταυτόσημες χημικές συνθέσεις, το σώμα αντιδρά πολύ διαφορετικά σε αυτά. Κοράλλινοι σκελετοί μπορεί να μετατραπούν σε υδροξυαπατίτη με υψηλές θερμοκρασίες. Η πορώδης δομή του επιτρέπει σχετικά ταχεία ενδοανάπτυξη εις βάρος της αρχικής μηχανικής αντοχής. Η υψηλή θερμοκρασία διώχνει επίσης μακριά οποιαδήποτε οργανικά μόρια όπως πρωτεΐνες, εμποδίζοντας μια ανοσοαπόκριση και απόρριψη.



*Εύκαμπτο σύνθετο από υδρογέλη-ΗΑ, το οποίο έχει μια ανόργανη-προς-οργανική μήτρα που προσεγγίζει την αναλογία του ανθρώπινου οστού*

Η χρήση της Ζιρκονίας στην επανορθωτική οδοντιατρική είναι ουσιαστική. Η Ζιρκονία χρησιμοποιείται για τεχνητές μηριαίες κεφαλές για αντικαταστάσεις ισχίου. Αυτό καθιστά το τμήμα ισχυρότερο και τις κεφαλές μικρότερες, ώστε ο ασθενής να εμφανίσει μικρότερο τραύμα κατά την διάρκεια της χρήσης. Εκτός από αντικαταστάσεις ισχίου, η ζιρκόνια χρησιμοποιείται σε ώμους, αρθρώσεις του γόνατος,

σπονδυλικά εμφυτεύματα και τις φαλαγγικές αρθρώσεις. Αυτή είναι μια καταπληκτική χρήση των κεραμικών υλικών και γίνονται μεγάλα άλματα στον τομέα της ιατρικής. Αν και η ζirkονία ήταν διαθέσιμη για χρήση στην επανορθωτική οδοντιατρική για αρκετά χρόνια, υπάρχει πρόσφατο αυξημένο ενδιαφέρον για αυτά τα υλικά. Η Ζirkονία που βασίζεται στις αποκαταστάσεις είναι πολύ ευπροσάρμοστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στεφάνες, γέφυρες, και εμφυτεύματα σε μια ποικιλία κλινικών καταστάσεων, εάν ακολουθούνται οι κατάλληλες κατευθυντήριες γραμμές.

Η Κρυσταλλική Ζirkονία είναι μια σύγχρονη οδοντιατρική κεραμική αντικατάσταση του μετάλλου που χρησιμοποιείται για κορώνες πορσελάνης και γέφυρες. Η κρυσταλλική μάρκα της Οδοντιατρικής Ζirkονίας είναι επίσης διαφανής, κάτι που δίνει στην υπέρθεση πορσελάνης μια φωτεινότερη πιο φυσική εμφάνιση. Λόγω του ότι είναι ισχυρότερη σε σχέση με τις ιδιότητες χάλυβα, η Ζirkονία έχει χρησιμοποιηθεί για δεκαετίες για το διαστημικό λεωφορείο και για τις νέες υψηλής τεχνολογίας φρένα στα γερμανικά σπορ αυτοκίνητα και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Η κρυσταλλική Ζirkονία είναι ένα νέο σκεύασμα της ιατρικής ποιότητας του υλικού ζirkονία, που είναι συσκευασμένο σε όγκους, χρησιμοποιεί οδοντιατρικές φρέζες, και στη συνέχεια συντήκεται στους 150°C στο φούρνο μέχρι να είναι σχεδόν άθραυστο. Στο παρελθόν, οι οδοντίατροι συνήθιζαν να λένε ότι οι κορώνες ή γέφυρες πρέπει να αντικαθίστανται κάθε πέντε ή δέκα χρόνια, ενώ η πορσελάνη μπορεί να χρειάζεται επισκευή, μια υποδομή κορώνας ή γέφυρας που δημιουργήθηκε με κρυσταλλική ζirkονία θα πρέπει να διαρκέσει μια ζωή, και να περιλαμβάνει εγγύηση εφ' όρου ζωής όταν αλέθεται από πιστοποιημένα οδοντοτεχνικά εργαστήρια. Η κρυσταλλική Ζirkονία είναι 100% βιοσυμβατή και επειδή το σώμα δεν απορρίπτει τη ζirkονία, το υλικό αυτό είναι το πλέον προτιμώμενο υλικό για σύγχρονες ιατρικές εφαρμογές. Σε αντίθεση με αμαγάλματα και κράματα μετάλλων που χρησιμοποιούνται στην οδοντιατρική και στο παρελθόν, το σώμα δέχεται τη ζirkονία ως φυσικό υλικό, έτσι ώστε να μη χρειάζεται να ανησυχούμε για αλλεργίες ή ανεπιθύμητες ενέργειες.



*Σταθερή μερική οδοντοστοιχία*



*Κρυσταλλική Ζirkονία*

## 6.11 Το μέλλον των έξυπνων υλικών

### 6.11.1 Νέο πολυμερές υλικό με ιδιότητες γυαλιού

Γάλλοι επιστήμονες του Ερευνητικού Κέντρου CNRS εφηύραν ένα νέο υλικό, το οποίο μπορεί να κάνει επανάσταση στη βιομηχανία. Το πολυμερές αυτό οργανικό υλικό εξωτερικά έχει όψη ανόργανης ύλης (γυαλιού) με τις ιδιότητες του πλαστικού.

Το υλικό αυτό μπορεί να θερμαίνεται, αποκτώντας οποιαδήποτε μορφή και να ψυχραίνεται όσες φορές θέλουμε – γιατί οι συνδέσεις σε επίπεδο ατόμων δεν παραβιάζονται. Για παράδειγμα, οποιαδήποτε ζημία στον προφυλακτήρα του αυτοκινήτου, φτιαγμένο από αυτό το υλικό, μπορεί να διορθωθεί με απλή θέρμανση μέχρι ορισμένη θερμοκρασία.

Η ερευνητική ομάδα πιστεύει ότι το νέο υλικό έχει τέτοιες ιδιότητες που θα εξυπηρετήσει εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική, στις ηλεκτρονικές κατασκευές και σε νέα έξυπνα υλικά.

Το CNRS υπενθυμίζει ότι το γυαλί (ανόργανο πυρίτιο) είναι ένα μοναδικό υλικό, διότι, κατόπιν θερμάνσεως, μετατρέπεται από στερεό σε υγρό σταδιακά. Επίσης, συμπληρώνει, ότι είναι πρόκληση η εξεύρεση ενός υλικού που να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό, επισκευάσιμο, να υφίσταται άπειρες φορές πλαστική παραμόρφωση, να είναι σε θέση να ρέει όταν θερμαίνεται, ενώ να είναι αδιάλυτο και όχι εύθραυστο ή βαρύ, όπως δηλαδή είναι το γυαλί.

Το νέο υλικό έχει ορισμένες ιδιότητες οργανικών ρητινών και καουτσούκ, είναι δηλαδή ελαφρύ και είναι δύσκολο να μαζέψει. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται σήμερα για να αντικαταστήσουν τα μέταλλα έχουν το μειονέκτημα, ότι παίρνουν ένα σταθερό, καθορισμένο σχήμα και συγκεκριμένη σκληρότητα, που δεν μπορούμε να τα αλλάξουμε. Το νέο υλικό έχει δημιουργηθεί από υπάρχουσες ουσίες (εποξικές ρητίνες, σκληρυντικά, καταλύτες, κλπ.), αλλά οι ερευνητές ήταν σε θέση να αναπτύξουν μια τέτοια μοριακή δομή που να έχει αυθεντικές ιδιότητες.

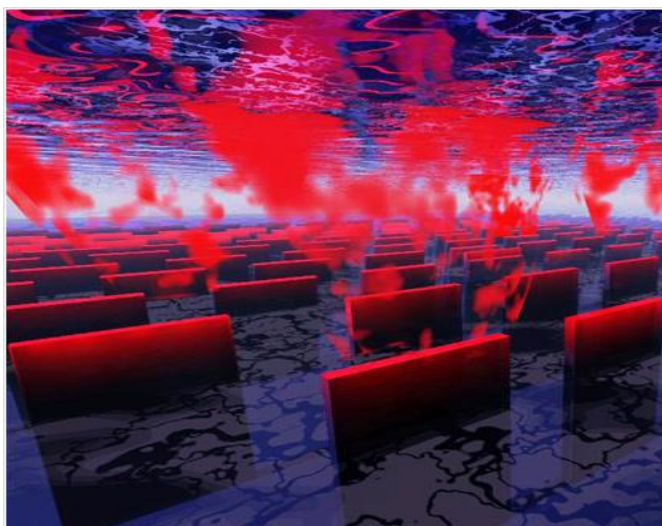
"Με τη θέρμανση η νέα δομή είναι σε θέση να αναδιοργανώνεται χωρίς να αλλάζει ο αριθμός των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ατόμων. Το νέο υλικό μεταβαίνει από υγρό γυαλί σε στερεό ή και αντίστροφα", ανακοίνωσε το CNRS.

Αυτό το υλικό, που περιέχει πυρίτιο και μερικές ανόργανες ενώσεις, ενεργεί στην πραγματικότητα σαν οργανικό πυρίτιο και είναι αδιάλυτο όταν θερμαίνεται, ακόμα και πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης.

Σε θερμοκρασία δωματίου, μοιάζει με ένα σκληρό ή ένα μαλακό ελαστικό, ανάλογα με τη σύνθεση που θα επιλεγεί να έχει το υλικό και, σε αμφοτέρους τις περιπτώσεις, έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες και λάστιχα που χρησιμοποιούνται σήμερα, δηλαδή, είναι ελαφρύ, ανθεκτικό και αδιάλυτο.

Οι ερευνητές τονίζουν ότι έχει ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τα ελαστικά, γιατί μπορεί να διαμορφωθεί, να επισκευαστεί και να ανακυκλωθεί με τη θέρμανση, κάτι που δεν μπορεί να γίνει με τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες ή τα συμβατικά πλαστικά. Έτσι, μπορεί να πάρει σχήματα που είναι αδύνατο να γίνουν με καλούπια ή που θα ήταν πάρα πολύ ακριβό για να το καταστρέψουν.

### 6.11.2 Τα «έξυπνα» υλικά γίνονται έξυπνότερα



*Μέσα στο υλικό SMARTS, βρίσκονται στρώματα από χημικά «θρεπτικά συστατικά» τα οποία απελευθερώνονται ανάλογα με την κατάσταση*

Οι ζωντανοί οργανισμοί έχουν εξελιχθεί στο να αντεπεξέρχονται στις αλλαγές του περιβάλλοντος, αναπτύσσοντας μηχανισμούς που τους προστατεύουν από μεταβολές στη θερμοκρασία, την πίεση, το pH, το φως ή και την παρουσία άλλων συμβιωτικών οργανισμών. Για πολύ καιρό οι επιστήμονες προσπαθούν να εφεύρουν υλικά που να μιμούνται αυτές τις συμπεριφορές, και πλέον στο Harvard υποστηρίζουν ότι ανέπτυξαν μια μέθοδο με την οποία τα υλικά προσαρμόζονται από μόνα τους σε μεταβολές του περιβάλλοντος αλλάζοντας τη χημική τους σύσταση ανάλογα με τις περιστάσεις.

Τα φυσικά οργανικά υλικά, όπως αυτά που συνθέτουν το ανθρώπινο δέρμα είναι πολύ πιο δυναμικά και πολύπλοκα από τα καθιερωμένα συνθετικά υλικά. Ακόμη κι έξυπνα υλικά, όπως γυαλιά ηλίου που σκοτεινιάζουν στην ηλιοφάνεια, ή οι μαγνήτες μιας ηλεκτρικής κιθάρας που μετατρέπουν την πίεση από τις δονήσεις των χορδών σε ηλεκτρικό σήμα, τυπικά αντιδρούν σε μία πολύ συγκεκριμένη μεταβολή στο περιβάλλον τους και δεν μπορούν να ρυθμιστούν αυτόματα. Τα υλικά που αντιδρούν στις μεταβολές του περιβάλλοντός τους και λειτουργούν έτσι ώστε οι χημικές μεταβολές στο εσωτερικό τους να ρυθμίζονται αυτόματα, προσομοιώνοντας τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι βιολογικοί μηχανισμοί ονομάζονται SMARTS και η νέα έρευνα, που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Nature, υποστηρίζει πως οι ερευνητές του Harvard βελτίωσαν θεαματικά τη λειτουργία τους, κάνοντάς τα ακόμη πιο έξυπνα.

Μέσα στο υλικό SMARTS, βρίσκονται στρώματα από χημικά «θρεπτικά συστατικά» τα οποία απελευθερώνονται ανάλογα με την κατάσταση. «Θυμίζει λίγο το πώς ανατριχιάζουμε με το κρύο», εξηγεί η Joanna Aizenberg, επικεφαλής της σχολής μηχανικής και εφαρμοσμένων επιστημών στο Harvard. «Όταν έχει κρύο, μικροσκοπικοί μύες στη βάση κάθε τρίχας προκαλούν την ανόρθωσή της, για να δημιουργήσει ένα προστατευτικό μονωτικό στρώμα. Καθώς ο μύς ζεσταίνεται, οι τρίχες επιστρέφουν πίσω στη θέση τους. Τα SMARTS λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο». Για να προσομοιάσει αυτή τη λειτουργία, η ομάδα κατασκεύασε μια επιφάνεια από πολύ μικρές ίνες, πάνω σε ένα στρώμα από ένα ειδικό υλικό, σε μορφή τζελ. Το τζελ αυτό, όμοια με τη λειτουργία των μυών, συστέλλεται ή διαστέλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία και οι ίνες στην επιφάνειά του ανταποκρίνονται όπως και οι ανθρώπινες τρίχες.

«Σχεδιάζοντας κύκλους ανάδρασης κι ενσωματώνοντάς τους στο SMARTS πετύχαμε το στόχο», λέει ο Ximin He, ένας από τους ερευνητές του προγράμματος. «Σε ένα μεγάλο πλήθος διεγέρσεων, σχεδιάζουμε το SMARTS ώστε να αισθάνεται κατευθείαν τη μεταβολή και να αλλάζει τη συμπεριφορά του, δίχως την παρεμβολή πολύπλοκων συσκευών ή τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος, δίνοντας μας τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε μια αξιόπιστη πλατφόρμα μεγάλης ακρίβειας στα μέτρα που θέλουμε», συνεχίζει.

Οποιαδήποτε διέγερση από το εξωτερικό περιβάλλον, μπορεί να μετατραπεί σε χημικό σήμα στο εσωτερικό του τζελ που κατασκεύασαν. Ο φωτισμός, η θερμότητα, η πίεση, προκαλούν συγκεκριμένες αντιδράσεις οι οποίες, αν σχεδιαστούν σωστά, πυροδοτούν τη συμπεριφορά που χρειαζόμαστε από το υλικό. «Βρήκαμε ένα νέο τρόπο να σκεφτόμαστε τα υλικά αλλά και στο να εξετάσουμε μερικές ουσιώδεις ερωτήσεις για τη δυνατότητα των οργανικών υλικών να διατηρούνται σε κατάσταση ισορροπίας», προσθέτει η Aizenberg.

Η πρόοδος αυτή αναμένεται να οδηγήσει σε πιο έξυπνα και αποδοτικά ιατρικά υλικά ή ακόμη και υλικά που θα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των κτιρίων και θα ανταποκρίνονται στον καιρό. Επίσης, οι ερευνητές ευελπιστούν πως θα βρεθούν εφαρμογές και σε πολλούς άλλους κλάδους, όπως η οδοντιατρική, οι υπολογιστές ή η ρομποτική.

## 7. 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. Mel Schwartz, «Encyclopedia of Smart Materials», Chapter 25
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. Georges Akhras, «Smart materials and smart systems for the future», Canadian Military Journal, Autumn 2000
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. 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)
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. science@direct.com
14. <http://ssdl.iitd.ac.in/vssdl/smart.pdf>
15. Διπλωματική εργασία Καλογερόπουλου Θεόδωρου «Εφαρμογές έξυπνων υλικών», ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
16. Διπλωματική εργασία Ηλιοπούλου Βασιλικής «Εφαρμογές σε πλατφόρμες οστεογένεσης», Πάτρα 2010.
17. Daniel Balageas, Claus-Peter Fritzen and Alfredo Guemes, «Structural Health Monitoring»
18. <http://www.naftemporiki.gr/news/cstory.asp?id=2210631>
19. <http://physics4u.wordpress.com/2012/01/02/%CE%AD-%CE%AD-%CF%8C-%CF%8C/>
20. <http://bouncingideas.wordpress.com/?s=smart+materials>
21. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
22. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=123>
23. <http://staff.bath.ac.uk/msscrb/sportslayout.pdf>
24. [http://www.mesg.nl/wiki/images/c/ca/Paper\\_UPT\\_01.pdf](http://www.mesg.nl/wiki/images/c/ca/Paper_UPT_01.pdf)
25. <http://www.iom3.org/fileproxy/348526>

26. [www.smart-material.com](http://www.smart-material.com)
27. [www.fiberglast.com](http://www.fiberglast.com)
28. [www.mdacomposites.org](http://www.mdacomposites.org)
29. [www.e-composites.com](http://www.e-composites.com)
30. [www.reichhold.com](http://www.reichhold.com)
31. [www.tencom.com](http://www.tencom.com)

