

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗΝ
ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ
ΑΥΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ



Εισηγητής: Δρ Παν. Κακαβάς

Σπουδαστές: Γεώργιος Μουστάκας (AM 3612)
Μάρθα Τσεπνή (AM 3529)
Γεώργιος Χατζηγεωργίου (AM 3691)

ΠΑΤΡΑ 2004



ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	3645
----------------------	------

Ο πρόλογος της πτυχιακής εργασίας μας δημιουργήθηκε με σκοπό την υποβολή ευχαριστιών στον καθηγητή κύριο Παν. Κακαβά, ο οποίος με την πολύτιμη και συστηματική βοήθεια του καθώς και με την αμέριστη συμπαράσταση του κατά την διάρκεια δημιουργίας της πτυχιακής εργασίας ήταν εξαιρετικά καθοριστικής σημασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

1

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗ
ΡΗΤΙΝΗ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ****1.1 Εισαγωγικά**

4

1.2 Μηχανικές ιδιότητες των ρητινών

8

1.3 Συγκολλητικές ιδιότητες των ρητινών

10

1.4 Υλικά πυρήνων

10

1.5 Υλικά ενίσχυσης (Ίνες)

13

1.6 Εφαρμογή : σύνθετο όχημα ΒΑΛΑ

14

1.7 Τι είναι SMC

17

1.8 Τι είναι σύνθετα;

18

1.9 Γιατί τα σύνθετα είναι διαφορετικά

19

1.10 Πολυμερείς ίνες Kevlar, ενίσχυσης, υφάσματα και άλλα

21

1.13 Σύνθετα υλικά

29

1.14 Διαδικασία παρασκευής

30

1.15 Πληροφορίες σχεδίου	32
1.16 Γιατί χρησιμοποιούμε σύνθετα υλικά	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° : ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΗΤΙΝΩΝ ΚΑΙ ΙΝΩΝ

2.1 Εισαγωγή	36
2.2 Ίνες για τα ενισχυμένα πλαστικά σύνθετα υλικά. Παραγωγή και ιδιότητες υαλονημάτων για την ενίσχυση πλαστικών ρητινών	37
2.3 Παραγωγή και ίνες ανθρακονημάτων	39
2.4 Παραγωγή ινών Αραμίτη (Aramid) για την ενίσχυση των πλαστικών ρητινών	42
2.5 Ενισχυμένες πλαστικές ίνες σύνθετων υλικών	45
2.6 Διαδικασία ανοικτών καλουπιών για τις ενισχυμένες πλαστικές ίνες σύνθετων υλικών	49
2.7 Διαδικασία κλειστών – καλουπιών για τα σύνθετα πλαστικά υλικά ενισχυμένα από ίνες άνθρακα	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΓΡΑΝΑΖΙΟΥ ΑΠΟ ΕΠΟΞΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγικά: Σύνθετα συστατικά υλικά πρότυπα	68
3.2 Διακριτικοποίηση των σύνθετων υλικών με Πεπερασμένα Στοιχεία	73

3.3 Κατασκευή καλουπιού	75
3.4 Κατασκευή σύνθετων νάιλον/ χάλυβα γρاناζιών	82
3.4.1 Ελικοειδές γρανάζι από Nylasteel κινούμενο με ηλεκτρικό κινητήρα (EPS)	82
3.4.2 Σύνθετα εργαλεία από Νάιλον/ χάλυβα Nylasteel	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1 Εισαγωγικά	87
4.2 Τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση διεπιφανειών	88
4.2.1 Περιγραφή των στοιχείων CONTA 171 που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των γρاناζιών	88
4.2.2 Περιγραφή του 2-D στοιχείου δοκού (BEAM 3) ελαστικής δοκού	98
4.2.3 Περιγραφή του επιπέδου οκτακομβικού στοιχείου (PLANE 82)	103
4.2.4 Το στοιχείο στόχου (TARGE 169 2-D Target Segment)	107
4.3 Υποθέσεις και ορισμοί παραγωγής των στοιχείων Target 169	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS

5.1 Εισαγωγικά	112
5.2 Προτυποποίηση προβλημάτων με το ANSYS	113

5.3 Σύγκριση της στερεάς προτυποποίησης και της άμεσης δημιουργίας προτύπου	114
5.3.1 Στερεά προτυποποίηση	115
5.3.2 Απ' ευθείας δημιουργία του προτύπου	116
5.4 Επιλογή του τύπου ενός προτύπου (2-D, 3-D κλπ)	116
5.5 Επιλογή μεταξύ γραμμικών και υψηλότερου βαθμού στοιχείων	117
5.5.1 Γραμμικά στοιχεία (χωρίς κόμβους στα μέσα των πλευρών)	117
5.5.2 Στοιχεία δευτέρου βαθμού (κόμβοι στα μέσα των πλευρών)	119
5.6 Αριθμητική επίλυση συνθετικών γκραναζιών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	128

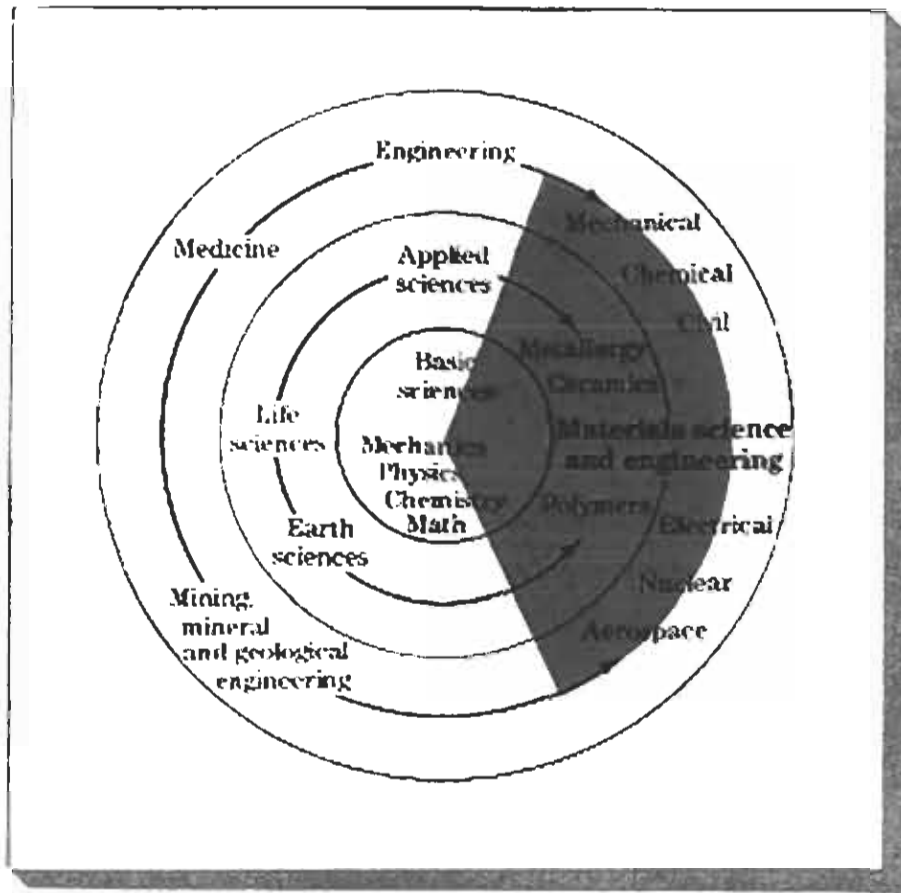
Πρόλογος

Τα υλικά είναι ουσίες από τις οποίες απαρτίζονται ή φτιάχνονται τα σύνθετα υλικά. Από τότε που αναπτύχθηκε ο ανθρώπινος πολιτισμός τα υλικά μαζί με την ενέργεια έχουν χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο για να βελτιώσει το βιοτικό του επίπεδο. Μερικά από τα πιο συνήθη υλικά είναι τα: ξύλο (ξυλεία), σκυρόδεμα, τούβλο, χάλυβας, γυαλί, λάστιχο, αργίλιο, πλαστικό, χαλκό και χαρτί. Υπάρχουν πολλά περισσότερα είδη υλικών, και αυτό γίνεται αντιληπτό αρκεί κανείς να κοιτάξει γύρω του για να το επιβεβαιώσει. Λόγω εντατικών ερευνών και της ανάπτυξης της τεχνολογίας παρασκευάζονται συνεχώς νέα υλικά από τις βιομηχανίες.

Η παραγωγή και η επεξεργασία των υλικών στα έτοιμα προϊόντα αποτελούν ένα μεγάλο μέρος της παρούσας οικονομίας μας. Οι μηχανικοί σχεδιάζουν τα περισσότερα τεχνικά προϊόντα και τα συστήματα παραγωγής είναι απαραίτητα για την κατασκευή τους. Δεδομένου ότι τα προϊόντα εξαρτώνται από τα υλικά, οι μηχανικοί πρέπει να είναι γνώστες για την εσωτερική δομή και τις ιδιότητες των υλικών έτσι ώστε να είναι σε θέση να επιλέξουν το κατάλληλο, για κάθε εφαρμογή. Οι μηχανικοί της έρευνας και ανάπτυξης ασχολούνται στο να δημιουργήσουν νέα υλικά ή να βελτιώσουν τις ιδιότητες των ήδη υπάρχων υλικών. Οι μηχανικοί σχεδίου χρησιμοποιούν τα ήδη υπάρχοντα υλικά, τροποποιημένα ή νέα για να δημιουργήσουν νέα προϊόντα και συστήματα. Οι μηχανικοί σχεδίου έχουν ένα πρόβλημα στη σχεδίαση τους η οποία απαιτεί την δημιουργία νέου υλικού κατόπιν επιστημονικής έρευνας.

Η επιστήμη των υλικών ενδιαφέρεται πρώτιστα για την αναζήτηση της βασικής γνώσης της εσωτερικής δομής, των ιδιοτήτων και την επεξεργασία των υλικών. Η εφαρμοσμένη μηχανική των υλικών ενδιαφέρεται κυρίως για τη χρήση θεμελιωδών και ισχύων γνώσεων έτσι ώστε τα υλικά να μπορούν να μετατραπούν σε προϊόντα απαραίτητα ή επιθυμητά από την κοινωνία. Το σχήμα 1.4 παρουσιάζει ένα διάγραμμα τριών δαχτυλιδιών που δείχνει τη σχέση μεταξύ των βασικών επιστημών (και των μαθηματικών), της επιστήμης υλικών και της εφαρμοσμένης μηχανικής, και των άλλων ειδικοτήτων εφαρμοσμένης μηχανικής. Οι βασικές επιστήμες βρίσκονται μέσα στο πρώτο δαχτυλίδι ή τον πυρήνα του διαγράμματος, ενώ οι διάφοροι τομείς

της εφαρμοσμένης μηχανικής (μηχανικός, ηλεκτρικός, αστικός, χημικός, κ.λπ....) βρίσκονται στο τρίτο δαχτυλίδι.



Σχ. 1.4: Αυτό το διάγραμμα επεξηγεί τον τρόπο με τον οποίο η επιστήμη των υλικών και η επιστήμη των Μηχανικών σχηματίζει τη γέφυρα από τις βασικές επιστήμες στις εφαρμοσμένες.

Οι εφαρμοσμένες επιστήμες, η μεταλλουργία, η κεραμική, και η επιστήμη των πολυμερών βρίσκονται στο μέσο ή στο δεύτερο δαχτυλίδι.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στις εφαρμογές των συνθέτων με πολυμερική ρητίνη στην αυτοβιομηχανία και γίνεται αναφορά στις μηχανικές και συγκολλητικές ιδιότητες των ρητινών.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην βιομηχανική παραγωγή των ρητινών και ινών. Επίσης γίνεται αναφορά στις ίνες που χρησιμοποιούνται για τα ενισχυμένα πλαστικά

σύνθετα υλικά.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην διαδικασία κατασκευής γραναζιού από εποξική ρητίνη και ανθρακονήματα δηλ. ο τρόπος που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ανάλυση γραναζιών με πεπερασμένα στοιχεία. Δηλαδή αναφέρεται αναλυτικά στα διάφορα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική ανάλυση των γραναζιών.

Και το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στην δημιουργία προτύπων γραναζιών με το πρόγραμμα ANSYS.

Κεφάλαιο 1^ο

Εφαρμογές των συνθέτων με πολυμερική ρητίνη στην αυτοβιομηχανία

1.1 Εισαγωγικά

Η αμερικανική ένωση κατασκευαστών σύνθετων υλικών, είναι η μεγαλύτερη παγκόσμια εμπορική ένωση που εξυπηρετεί τη βιομηχανία σύνθετων υλικών. Η εταιρεία αυτή ιδρύθηκε το 1979 για να παρέχει την εκπαίδευση και την υποστήριξη για την παραγωγή σύνθετων υλικών, ενώ συνεχίζει να προσφέρει τις περιθωριακές υπηρεσίες που συμβάλλουν στη ρυθμιστική συμμόρφωση και τη διατύπωση, την εκπαίδευση και την κατάρτιση, τη διαχείριση, και την επέκταση της αγοράς. Με περίπου οχτακόσια μέλη συμπεριλαμβανομένων των ανοικτών και κλειστών μοντέλων, των προμηθευτών, των διανομέων, των συμβούλων, των ακαδημαϊκών και άλλων, με ένα κεκτημένο δικαίωμα στην αγορά σύνθετων, η εταιρεία αυτή έχει κερδίσει μια φήμη στην βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών.

Η επιτυχία της εταιρείας προέρχεται από την μακρόχρονη ιστορία της στον τομέα αυτό. Τα μέλη αναπτύσσουν τα προγράμματα που ωφελούν τις επιχειρήσεις τους, μέσω ενός δικτύου επιτροπής. Οι επιτροπές και ομάδες εργασίας ACMA (American Composite Materials Association) εξετάζουν τις διάφορες θέσεις αγοράς και διαδικασίας που αντιπροσωπεύονται από τη βιομηχανία. Η δύναμη αυτών των ομάδων με μια κοινή εστίαση που λειτουργεί μαζί για να καλύψει τις προκλήσεις, τις ανάγκες της εκπαίδευσης, την ανάπτυξη και την επέκταση αγοράς και τα ρυθμιστικά εμπόδια, επιδεικνύει τη δύναμη μιας ενωμένης βιομηχανίας.

Η χρησιμοποίηση των σύνθετων υλικών οδηγεί χαρακτηριστικά σε 35 % λιγότερο βάρος σε ένα όχημα, το οποίο βοηθά να βελτιώσει την οικονομία των καυσίμων και τις χαμηλότερες εκπομπές. Το 2003, η εκπληκτικά ισχυρή και ελαφριά ίνα SMC άνθρακα εμφανίζεται για πρώτη φορά στις εφαρμογές κατασκευής αυτοκινήτων, ενώ η νέα τεχνολογία ωθεί την ποιότητα επιφάνειας του συμβατικού φύλλου-τυποποιημένου σύνθετου (SMC). Τα *σύνθετα υλικά* δεν οξειδώνονται, είναι

ανθεκτικά στην πίεση και παρέχουν περισσότερη ευελιξία στον σχεδιασμό, ο οποίος τα καθιστά ιδανικά για τη δημιουργία ενός "νέου προϊόντος" στις εφαρμογές οχημάτων μέσου-όγκου.

Τι επιφυλάσσει όμως το μέλλον για τα σύνθετα υλικά; Με την αύξηση των *εγχυτήρων* και των *υποστρωμάτων* η βιομηχανία θα είναι σε θέση να βελτιώσει την απόδοση και την ποιότητα. Τα ελαφριά σύνθετα υλικά που θα παραχθούν, όπως χαμηλής πυκνότητας SMC¹ και RRIM, θα ανταγωνιστούν το αργίλιο. Επίσης, τα σύνθετα υλικά θα βρεθούν σε περισσότερες επιτροπές σωμάτων κατηγορίας Α λόγω της υψηλής ζήτησης για τα οχήματα θέσεων.



Σχ. 1-1: Νέας τεχνολογίας αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν ανθρακονήματα

Νέα μοντέλα της Mercedes-benz SLR εφαρμόζουν ίνες από άνθρακα. Το διθέσιο Mercedes-benz SLR McLaren, κατασκευασμένο από *ανθρακονήματα*, του οποίου οι εξωτερικές μορφές και οι πόρτες τύπου φτερών γλάρου θυμίζουν τον μύθο των αγώνων στα μέσα της δεκαετίας του '50, που έχει προωθηθεί στην επίδειξη μηχανών της Φρανκφούρτης. Αυτό το κουπέ, με το επιμηκυμένο μπροστινό άκρο του και το σύντομο οπίσθιο άκρο, έχει μεταξόνιο 2.70 μέτρων και γενικού μήκους 4,66 μέτρων ενώ είναι 1,26 μέτρα στο ύψος. Η δομή του αυτοκινήτου, όπως τα μέρη επιφάνειας του σώματός της, αποτελείται από τον άνθρακα, και η εμπειρία που προήλθε από τον τύπο 1 χρησιμοποιήθηκε στο σχέδιο και τη δομή της. Η αεροδυναμική ρύθμιση του χαμηλότερου μέρους του αυτοκινήτου, που αυξάνει την

¹ Το SMC είναι μια ίνα ενισχυμένου σύνθετου υλικού που αποτελείται από την θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, την ενίσχυση ινών γυαλιού και το υλικό πλήρωσης.

προσκόλληση στο δρόμο, είναι ίδιας προέλευσης. Η πρωτότυπη λεπτομέρεια εμπεριέχεται στο γεγονός ότι μας δίνεται η δυνατότητα επέκτασης της αεροτομής (spoiler) στο καπάκι των κορμών, που με ταχύτητες άνω των 95 km/h χρησιμεύει ως ένα φτερό πίεσης (παραγωγή κάθετης δύναμης δηλ. αύξηση πρόσφυσης), αλλά και βοηθά ως αεροδυναμικό φρένο (βλ. Σχ. 1-1). Επίσης τα *ανθρακονήματα* χρησιμοποιούνται ευρέως για τον εσωτερικό σχεδιασμό των αυτοκινήτων προηγμένης τεχνολογίας. Μια V8 μηχανή 5,5-λ που βρίσκεται πίσω από τον μπροστινό άξονα αποδίδει 626 HP ενώ ζυγίζει κάτω από 1.770 kg με ισχυρές δυναμικές ιδιότητες. Η τελική ταχύτητά της είναι 334 km/h, και επιταχύνει από 0 έως 100 km/h σε 3,8 δευτερόλεπτα, ενώ τα 200 km/h καταρρίπτονται σε 10,6 δευτερόλεπτα.

Η βιομηχανία σύνθετων υλικών αναπτύσσει τις τεχνολογίες για να βοηθήσει να αποβάλει την ατέλεια χρωμάτων. Η αυτοκινητοβιομηχανία που χρησιμοποιεί σήμερα σύνθετα υλικά υπέβαλε έκθεση ότι έχει αναπτύξει δύο νέες τεχνολογίες υπεριώδεις (UV) και μια κατηγορία "A" SMC – που θα βοηθήσουν να αποβάλουν τις ατέλειες στις πλαστικές σύνθετες επιφάνειες των σωμάτων. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι στους οποίους οφείλονται οι ατέλειες χρωμάτων, όπως για παράδειγμα, το σκάσιμο του χρώματος. Αυτό προκαλείται από τις διαφυγές αέρα από το υπόστρωμα SMC κατά τη διάρκεια των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν κατά την διάρκεια του “ψησίματος” στις εγκαταστάσεις μπορούν να δημιουργήσουν το ‘σκάσιμο’ του χρώματος. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στις σύνθετες επιφάνειες σωμάτων να ανταποκριθεί ή να υπερβεί όλες τις προδιαγραφές της αυτοκινητοβιομηχανίας για την απόδοση χρωμάτων και τα παραδοσιακά επίπεδα ατελειών του χάλυβα.

Η θεωρία της εφαρμοσμένης μηχανικής δείχνει ότι η *δυσκαμψία* οποιουδήποτε πλαισίου είναι ανάλογο προς τον κύβο του πάχους του. Ο σκοπός ενός πυρήνα σε ένα σύνθετο φύλλο πλαστικού είναι να αυξήσει την δυσκαμψία του φύλλου. Αυτό μπορεί να παρέχει μια αξιόλογη αύξηση της ακαμψίας του πλαισίου για πολύ λίγο πρόσθετο βάρος. Επιπλέον, ιδιαίτερα κατά την χρησιμοποίηση των ελαφριών, λεπτών και φυλλόμορφων επιφανειών, ο πυρήνας πρέπει να είναι ικανός να αντέξει μια συμπιεστική φόρτωση χωρίς πρόωρη αστοχία.

Για να εκτιμήσουμε πλήρως το ρόλο και την εφαρμογή των σύνθετων υλικών σε μια κατασκευή, πρέπει να κατανοήσουμε τα συστατικά υλικά και τους τρόπους με

τους οποίους μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία. Αυτός ο τρόπος εξετάζει τη βασική θεωρία σύνθεσης, τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών, τις διάφορες τεχνικές επεξεργασίας και τις εφαρμογές των σύνθετων προϊόντων.

Ένα σύνθετο υλικό στην πιο βασική του μορφή αποτελείται από τουλάχιστον δύο στοιχεία που λειτουργούν μαζί έτσι ώστε να παραχθούν οι υλικές ιδιότητες που είναι διαφορετικές από εκείνες των στοιχείων από τα οποία έχει προέλθει το σύνθετο αυτό. Στην πράξη, τα περισσότερα σύνθετα αποτελούνται από ένα μαζικό υλικό (τη μήτρα/ρητίνη) και μια ενίσχυση κάποιου άλλου είδους υλικού, που προστίθεται πρώτιστα για να αυξήσει τη δύναμη και την *ακαμψία* της μήτρας. Αυτή η ενίσχυση είναι συνήθως με μορφή ινών. Σήμερα, τα πιο κοινά σύνθετα υλικά μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες ομάδες:

- Σύνθετα με πολυμερική ρητίνη (PMC) που είναι οι πιο γνωστοί τύποι. Επίσης είναι γνωστά ως FRP - ενισχυμένα πολυμερή στερεά (ή πλαστικά). Αυτά χρησιμοποιούν ποικίλες ίνες για ενίσχυση π.χ. το γυαλί, άνθρακας και aramid σαν ενίσχυση.
- Τα σύνθετα με μεταλλική ρητίνη (MMC) - που βρίσκονται όλο και περισσότερο στην αυτοκινητοβιομηχανία, χρησιμοποιούν ένα μέταλλο όπως το αλουμίνιο ως μήτρα, και το ενισχύουν με τις ίνες όπως το καρβίδιο του πυριτίου.
- Τα σύνθετα με κεραμική ρητίνη (CMC'S) - που χρησιμοποιούνται πολύ σε υψηλές θερμοκρασίες, αυτά τα υλικά χρησιμοποιούν ένα κεραμικό ως μήτρα και το ενισχύουν με κοντές ίνες, όπως καρβίδιο του πυριτίου και νιτρίδιο του βορίου.

Γενικά στα σύνθετα υλικά, υπάρχουν πολλές επιλογές ώστε να επιλεγούν από τους τομείς των ρητινών, των ινών και των πυρήνων, όλα με το μοναδικό σύνολο ιδιοτήτων τους όπως η *δύναμη*, *ακαμψία*, *η ανθεκτικότητα*, *η αντίσταση στη θερμότητα*, *το κόστος*, *το ποσοστό παραγωγής κ.λ.π.* Εντούτοις, οι ιδιότητες ενός σύνθετου μέρους που παράγεται από αυτά τα διαφορετικά υλικά είναι όχι μόνο μια λειτουργία των μεμονωμένων ιδιοτήτων της ρητίνης και ίνας αλλά είναι επίσης μια διεργασία του τρόπου με τον οποίο τα υλικά σχεδιάζονται και επίσης του τρόπου με τον οποίο υποβάλλονται σε επεξεργασία.

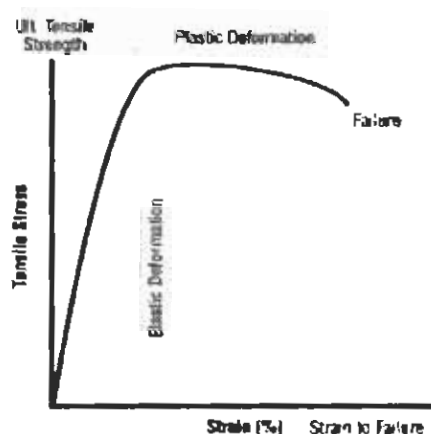
Ο ρόλος της ενίσχυσης σε ένα σύνθετο υλικό είναι η αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού συστήματος της ρητίνης. Όλες οι διαφορετικές ίνες που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά έχουν διαφορετικές ιδιότητες και έχουν επιπτώσεις στις ιδιότητες του σύνθετου με τους διαφορετικούς τρόπους. Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των κοινών ινών εξηγούνται παρακάτω. Εντούτοις, οι μεμονωμένες ίνες ή οι δέσμες ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μόνες τους σε μερικές διαδικασίες όπως το τύλιγμα των ινών. Για περισσότερες άλλες εφαρμογές, οι ίνες πρέπει να διευθετηθούν σε κάποια μορφή φύλλου, γνωστή ως ύφασμα. Οι διαφορετικοί τρόποι διευθέτησης των ινών σε φύλλα και ο πιθανός προσανατολισμός τους, προσδίδει στο τελικό προϊόν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Οποιοδήποτε σύστημα ρητίνης για τη χρήση σε ένα σύνθετο υλικό απαιτεί τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Καλές μηχανικές ιδιότητες
- Καλές συγκολλητικές ιδιότητες
- Καλές ιδιότητες ανθεκτικότητας
- Καλή αντίσταση στην περιβαλλοντική υποβάθμιση

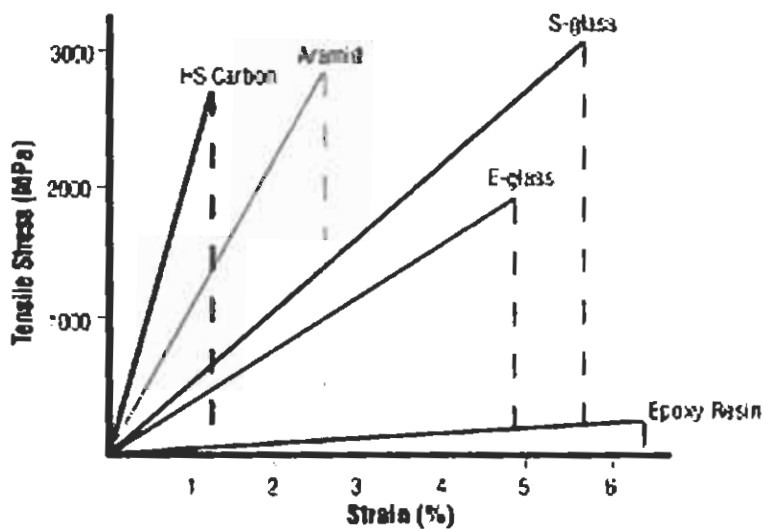
1.2 Μηχανικές ιδιότητες των ρητινών

Το Σχ. 1-2 παρουσιάζει την καμπύλη εφελκυστικής τάσης/παραμόρφωσης για ένα "ιδανικό" σύστημα ρητίνης. Η καμπύλη αυτή παρουσιάζει μεγάλη *τάση αστοχίας* του υλικού, υψηλή ακαμψία (που υποδεικνύονται από την αρχική κλίση). Αυτό σημαίνει ότι η ρητίνη είναι αρχικά δύσκαμπτη αλλά συγχρόνως δεν πάσχει από την εύθραυστη αστοχία.

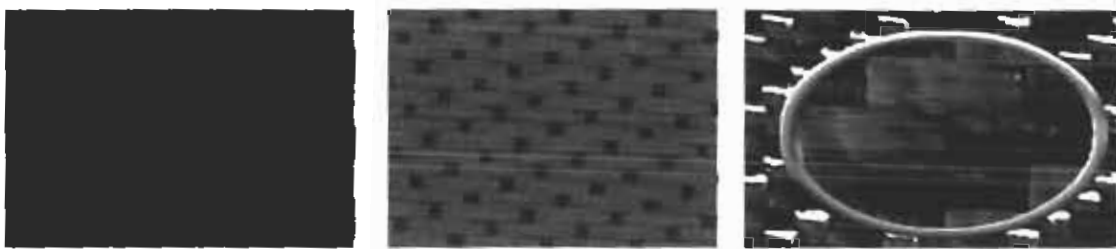


Σχ. 1-2: Τυπική καμπύλη τάσης/παραμόρφωσης μιας ρητίνης

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι όταν ένα σύνθετο φορτίζεται με κάποιο εφελκυστικό ή θλιπτικό φορτίο, για τις πλήρεις μηχανικές ιδιότητες που επιτυγχάνονται, η ρητίνη πρέπει να είναι σε θέση να παραμορφωθεί τουλάχιστον στην ίδια έκταση με την ίνα. Το σχήμα δίνει παρακάτω την τάση στο σημείο αστοχίας για τα υαλονήματα τύπου E & S, aramid και ανθρακονημάτων υψηλής αντοχής (βλ. σχ. 1-3α). Είναι φανερό ότι, παραδείγματος χάριν, υαλονήματα τύπου S, με επιμήκυνση στη θραύση 5,3%, θα απαιτήσει μια ρητίνη με επιμήκυνση στη θραύση τουλάχιστον αυτής της τιμής για να επιτύχει τις μέγιστες ιδιότητες σε εφελκυσμό. Διάφοροι τύποι ανθρακονημάτων εικονίζονται στο σχ. 1-3β.



Σχ. 1-3: (α) Καμπύλες τάσης/παραμόρφωσης διαφορετικών ινών και εποξιδικής ρητίνης



Σχήμα 1-3: (β) Διάφοροι τύποι ανθρακονημάτων

Όπως είναι φανερό από το σχ.1-3^α, η ρητίνη έχει πολύ μικρή τάση θραύσης ενώ παράλληλα παρουσιάζει μεγάλη επιμήκυνση στη θραύση σε αντίθεση με υαλονήματα και ανθρακονήματα. Από την άλλη τα υαλονήματα τύπου S

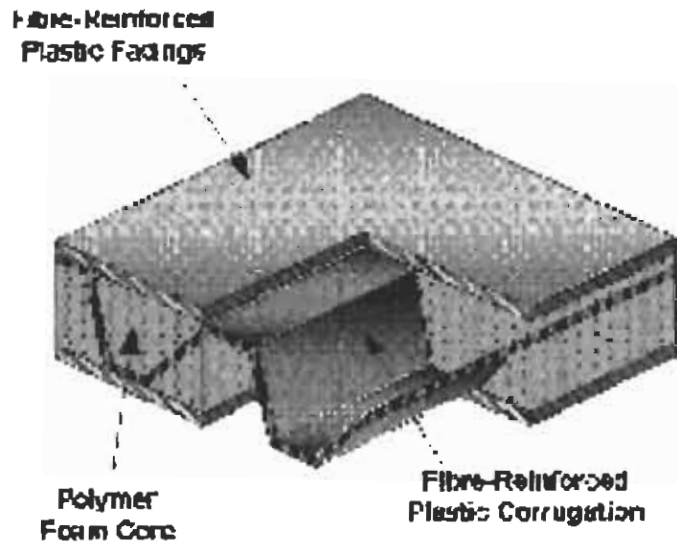
παρουσιάζουν σχεδόν διπλάσια τάση σε θραύση απ' ότι του τύπου E. Τα ανθρακονήματα παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια τάση θραύσης με τα υαλονήματα τύπου S, αλλά έχουν πολύ μικρή επιμήκυνση στη θραύση. Αυτά τα χαρακτηριστικά των διαφόρων ινών διαδραματίζουν μεγάλη σημασία στο βιομηχανικό σχεδιασμό διαφόρων εξαρτημάτων των αυτοκινήτων.

1.3 Συγκολλητικές ιδιότητες των ρητινών

Η υψηλή πρόσφυση μεταξύ ρητίνης και ενίσχυσης είναι απαραίτητη για οποιοδήποτε σύστημα ρητίνης. Αυτό θα εξασφαλίσει ότι τα φορτία μεταφέρονται αποτελεσματικά και θα αποτρέψει όταν φορτίζεται το ράγισμα της ίνας ή της ρητίνης. Η ανθεκτικότητα είναι ένα μέτρο αντίστασης ενός υλικού στη διάδοση ρωγμών, αλλά είναι δύσκολο να μετρηθεί ακριβώς στην περίπτωση ενός σύνθετου υλικού. Εντούτοις, η καμπύλη τάσης της ρητίνης από μόνη της παρέχει κάποια ένδειξη της ανθεκτικότητας του υλικού. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση που θα δεχτεί η ρητίνη πριν από την αστοχία της, τόσο σκληρότερο και ανθεκτικότερο είναι στη διάδοση ρωγμών το υλικό. Αντιθέτως, ένα σύστημα ρητίνης με μια χαμηλή τάση αστοχίας θα τείνει να δημιουργήσει ένα εύθραυστο σύνθετο, το οποίο ραγίζει εύκολα, π.χ. συνήθως σε εφαρμογές βαρέου τύπου χρησιμοποιούνται υαλονήματα τύπου S καθ' όσον έχουν μεγάλη τάση θραύσης. Η καλή αντίσταση στο περιβάλλον, το νερό και σε άλλες ουσίες που επιδρούν αρνητικά, μαζί με τη δυνατότητα να αντισταθεί στην σταθερή εναλλαγή της πίεσης, είναι ουσιαστικές ιδιότητες σε οποιοδήποτε σύστημα ρητίνης. Αυτές οι ιδιότητες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη χρήση των συνθέτων υλικών σε θαλασσίνο περιβάλλον.

1.4 Υλικά πυρήνων (ρητίνες)

Τα υλικά πυρήνων χρησιμοποιούνται εκτενώς σε όλη τη βιομηχανία σύνθετων υλικών για να κατασκευάσουν δύσκαμπτα και ελαφριά σύνθετα προϊόντα. Η χρήση των υλικών πυρήνων καλείται επίσης κατασκευή πολύστρωτων υλικών. Ένα πολύστρωτο υλικό αποτελείται από δύο εξωτερικά φύλλα πλαστικού και από τα υλικά πυρήνα. Η χρήση του πυρήνα δημιουργεί ένα παχύτερο φύλλο πλαστικού με ελάχιστη αύξηση σε βάρος. Η *ακαμψία* είναι ένα χαρακτηριστικό του πάχους του φύλλου πλαστικού.



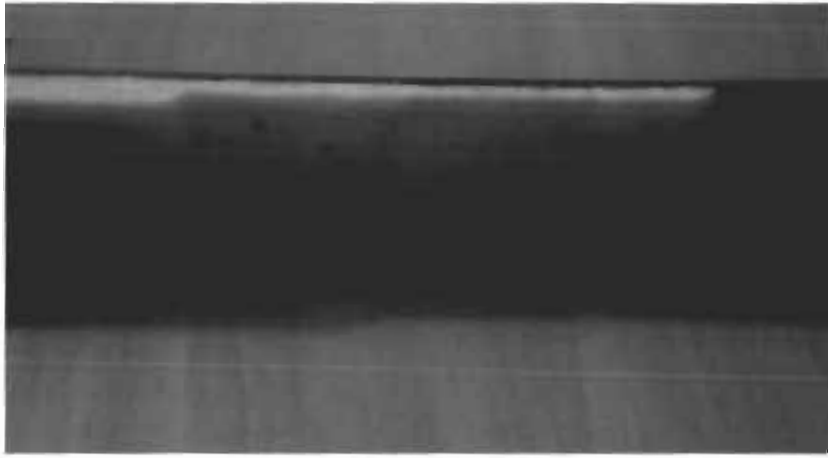
Σχ. 1-4: Οικοδομικό υλικό. Αποτελούμενο από πολυμερικό αφρό (υλικό πυρήνα)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι υλικών πυρήνων που προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα των ιδιοτήτων και του κόστους είναι:

- **Ελαφρόξυλο:** Η δομή του ελαφρόξυλου αποτελείται από τις επιμηκόμενες κυψελίδες πρισματικά κύτταρα, με ένα μήκος που είναι περίπου δέκα έξι φορές την διάμετρο. Η πυκνότητα κυμαίνεται από 96 έως 256 kg/m³, αυτό το υλικό έχει άριστη δύναμη ακαμψίας. Το ελαφρόξυλο είναι διαθέσιμο σε μορφή φύλλων για επίπεδες κατασκευές. Επίσης προσαρμόζεται εύκολα σε σύνθετες κατασκευές.
- **Αφρός PVC (πολυβινυλικό χλωρίδιο):** Οι πυρήνες από αφρό πολυβινυλικού χλωριδίου κατασκευάζονται με το συνδυασμό πολυβινυλικού συνμπολυμερές (copolymer) με σταθεροποιητές ή πλαστικοποιητές. Το μίγμα θερμαίνεται υπό πίεση για να αρχίσει η αντίδραση διασύνδεσης. Έπειτα καταδύεται στις καυτές δεξαμενές νερού όπου επιτυγχάνουμε την επιθυμητή πυκνότητα. Οι αφροί PVC προσφέρουν έναν καλό συνδυασμό δύναμης και βάρους με τις πυκνότητες που κυμαίνονται από 64 έως 480 kg/m³.
- **Θερμοπλαστικός αφρός (PS):** Το θερμοπλαστικό πολυστυρόλιο είναι πολύ ελαφρύ, περίπου 32 kg/m³. Αυτό το υλικό έχει πολύ χαμηλές μηχανικές ιδιότητες και το πολυστυρόλιο θα εισέλθει και θα διαλυθεί από τη ρητινή πολυεστέρα. Αυτοί οι αφροί δεν προσαρμόζονται στις σύνθετες καμπύλες.

- **Αφρός πολυουρεθάνιου (PV):** Το πολυουρεθάνιο είναι διαθέσιμο σε μορφή αποθεμάτων φύλλων ή σε αφρό όταν χρησιμοποιείται ως υλικό μόνωσης. Ο αφρός πολυουρεθάνιου μπορεί να έχει ένα ευρύ φάσμα των πυκνοτήτων, από 32 έως 320 kg/m³.
- **Συνθετικός αφρός:** Οι συνθετικοί αφροί παρασκευάζονται με μίξη κοίλων μικροσφαιρών προστιθέμενα στη ρητίνη. Οι ελαφριές μικρόσφαιρες μειώνουν την πυκνότητα της ρητίνης και δημιουργούν ένα παχύ μίγμα που μπορεί να εφαρμοστεί με το χέρι ή με ψεκασμό.
- **Γραμμικός αφρός PVC:** Ο γραμμικός πυρήνας αφρού PVC παράγεται κυρίως για την ναυσιπλοΐα. Οι μοναδικές μηχανικές ιδιότητές του είναι ένα αποτέλεσμα μιας μη-διασυνδεδεμένης μοριακής δομής, η οποία επιτρέπει τη σημαντική εκτροπή πριν από την *αστοχία*. Σε σύγκριση το συνδεδεμένο (μη γραμμικό) PVC, αυτό το PVC θα εκθέσει τις λιγότερες ενοϊκές στατικές ιδιότητες και την καλύτερη ικανότητα απορρόφησης στη κρούση.
- **Κυψελωτοί Πυρήνες (Honey Lom):** Οι διάφοροι τύποι κατασκευασμένων κυψελωτών πυρήνων χρησιμοποιούνται εκτενώς στη βιομηχανία μεταφορών. Τα υβριδικά υλικά περιλαμβάνουν το αργίλιο, τη φαινολική γονιμοποιημένη ρητίνη υαλοβάμβακα (fiberglass), το πολυπροπυλένιο, και αραμίτης (aramid). Οι πυκνότητες κυμαίνονται από 16 έως 96 kg/m³. Οι σωματικές ιδιότητες ποικίλουν σε έναν μεγάλο βαθμό με το συγκεκριμένες υλικό και την πυκνότητα. Η επεξεργασία των εξαιρετικά ελαφριών επιπέδων τμημάτων είναι δυνατή με τους κυψελωτούς πυρήνες.
- **COREMAT:** Το *fiber - coremat* είναι το μοναδικό υλικό που έχει σχεδιαστεί ειδικά για τις κατασκευές πολύστρωτων υλικών (sandwich) ή ακόμα να χρησιμοποιηθεί σαν αδρανές υλικό. Προέρχεται από τον συνδυασμό υλικών, μη πλεγμένα πλαστικά διασταλλόμενα μικροσφαιρίδια που όταν συνδυαστεί με υαλονήματα σε μορφή σάντουιτς παράγεται μια πολύ άκαμπτη επιφάνεια με λιγότερο υαλόνημα, λιγότερη ρητίνη, σε σύγκριση με το ίδιο προϊόν το οποίο έχει πυραχθεί από υαλόνημα. Ακόμη επιτυγχάνει ομαλότερη επιφάνεια και παρουσιάζονται μικρότερα προβλήματα (εμφάνιση αποτυπωμάτων των

εσωτερικών στρωμάτων γυαλιού στην επιφάνεια). Είναι εύκολο στην επεξεργασία του σε σχέση με την επεξεργασία των πολλαπλών στρωμάτων γυαλιού.



Σχ. : Επίπεδα στρώσεων από ρητίνη coremat και υαλόνημα

Πλεονεκτήματα: Αυξάνει τον λόγο ακαμψίας προς το βάρος κατά 300% που σημαίνει ότι οι διάφορες κατασκευές μπορούν να είναι κατά 60% ελαφρύτερα σε σύγκριση με τις κατασκευές που είναι από υαλονήματα. Μπορεί να πάρει οποιοδήποτε σχήμα μέσα στο καλούπι όσο περίπλοκο κι αν είναι. Το coremat μειώνει το συνολικό κόστος γιατί μειώνεται ο χρόνος παραγωγής κατά 10-15% και η ποσότητα των υλικών αντίστοιχα με το κέρδος περίπου 20%. Το coremat είναι αδιαπέραστο από τα υγρά, δεν απορροφά νερό και η αποκόλληση των διάφορων στρωμάτων είναι αδύνατη.

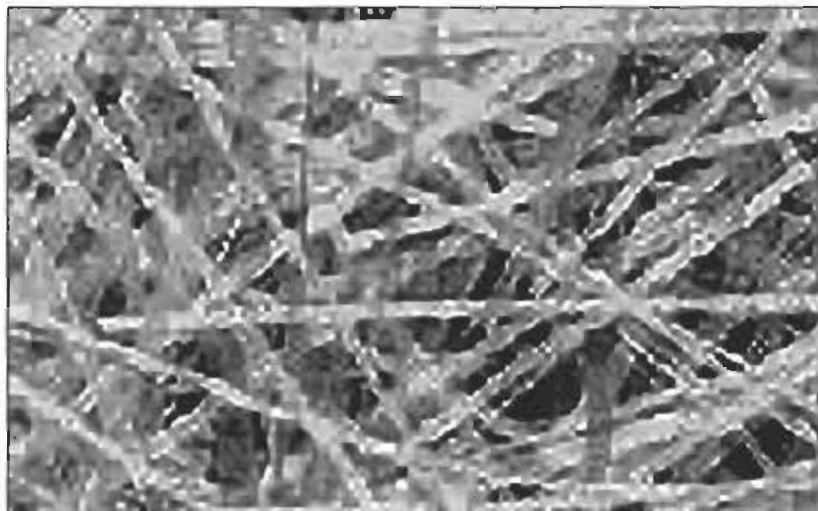
I-5 Υλικά ενίσχυσης (Ινες)

Οι ίνες από γυαλί λογαριάζονται πάνω από 90% των ινών που χρησιμοποιούνται στα ενισχυμένα πλαστικά επειδή είναι ανέξοδες, έχουν σχετικά καλές μηχανικές ιδιότητες και σχετικά χαμηλό βάρος. Επιπλέον, οι ίνες γυαλιού έχουν καλές χημικές αντίσταση και τη δυνατότητα επεξεργασίας. Οι συνεχείς ίνες γυαλιού διαμορφώνονται με την εξώθηση του λειωμένου γυαλιού σε μια πολύ λεπτή ίνα με τις διαμέτρους μεταξύ 5 έως 25 μικρών (μm). Τα υαλονήματα τύπου E (αργίλιο, ασβέστη, βόριο,) είναι η πιο κοινή ενίσχυση που χρησιμοποιείται σε όλη τη βιομηχανία σύνθετων λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων και την αντίσταση στην εισροή ύδατος. Άλλοι τύποι υαλονημάτων περιλαμβάνουν:

Τύπου S με υψηλή δύναμη

Τύπου A με υψηλό αλκαλικό περιεχόμενο (παρόμοιο με το γυαλί των παραθύρων)

Τύπου Γ με αντοχή στη διάβρωση



Σχ. 1-5: Υαλονήματα (Fiberglass)

1-6 Εφαρμογή: Σύνθετο όχημα BAJA

Το όχημα Baja έχει κατασκευαστεί από σύνθετα υλικά. Το Baja² είναι το μοναδικό επειδή ο σκελετός και τα πλαίσιά του αποτελούνται από πλαστικό και ενισχύονται από σύνθετα πλαστικά. Μ' αυτό επιτυγχάνουμε ένα όχημα μικρού βάρους με μεγάλη αντοχή στις καιρικές συνθήκες και πλαστική δυνατότητα του σύνθετου αυτού υλικού να απορροφά την ενέργεια.



Σχ.1-6: Σύνθετο όχημα BAJA

² www.americanplasticscouncil.org/benefits/in_your_life/pop/power_plastics_april99.html

Το Baja έχει περάσει στις Ηνωμένες Πολιτείες από τις πιο αυστηρές ευρωπαϊκές δοκιμές συντριβής (crash test). Η μηχανή και τα διάφορα συστήματα μετάδοσης της κίνησης μπορούν να προσιμωθούν με μεγάλη ευκολία λόγω διαμόρφωσης και σχεδιασμού του υλικού.

Πίνακας I: Διάφοροι τύποι ινών, ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής.

Μορφή ενίσχυσης	Περιγραφή	Κύρια διαδικασία παραγωγής
Ινα	Ινες όπως αρχικά σχεδιάζονται	Περαιτέρω επεξεργασία πριν από τη χρήση
Συνεχές σκέλος	Βασικές ίνες σε δέσμη	Περαιτέρω επεξεργασία πριν από τη χρήση
Νήμα	Περιελιγμένα νήματα (που αντιμετωπίζονται μετά από την ωρίμανση)	Περαιτέρω επεξεργασία πριν από τη χρήση
Τεμαχισμένο νήμα	Τα νήματα κόβονται από 1/4 έως 2 ίντσες μήκος	Σχηματοποίηση μέσω έγχυσης σε σχήμα κύβου SMC/ BMC
Πλεγμένα νήματα ινών	Δέσμη νημάτων από ίνες οι οποίες δεν υφίσταται σρέψη	Τύλιγμα των ινών, ψεκασμός, Διέλασης
Ψηλοκομμένες ίνες	Συνεχή τεμάχια ινών τεμαχισμένα σε πιο μικρά μήκη 1/32 έως 1/8 του αρχικού μήκους των.	Σύνθεση RRIM
Μικρά τεμάχια υφάσματος	Μη υφασμένο ύφασμα που αποτελείται από τεμαχισμένα κομμάτια.	Επίστρωση με το χέρι (RTM)
Συνεχές τμήματα υφάσματος	Μη υφασμένο ύφασμα που αποτελείται από τεμαχισμένα σκέλη	Σχηματοποίηση χωρίς προσθήκη θερμότητας, υπό πίεση
Πλεγμένο ύφασμα	Υφασμα που υφίσταται από τα νήματα	Επίστρωση με το χέρι prepreg
Υφασμένη περιέλιξη	Σκέλη που υφίστανται όπως το ύφασμα αλλά πιο χονδροειδή και βαρύτερα	Επίστρωση με το χέρι, ψεκασμός, RTM
Περιέλιξη	Το συνεχές ενιαίο σκέλος τυλίγεται γύρω από κυλίνδρους	Περαιτέρω επεξεργασία πριν από τη χρήση
Μη πλεγμένο ύφασμα	"Παρέμβασμα" τύπος υφάσματος που γίνεται από τις συνδεδεμένες ίνες	Επίστρωση με το χέρι, ψεκασμός, RTM
Επιφανειακό ύφασμα	Αυθαίρετη κατανομή των ινών μίας στρώσης.	Επίστρωση με το χέρι, προσαρμογή στο καλούπι, διέλασης

Το Baja έχει μια θερμοπλαστική επικάλυψη και μια θερμοσκληρυνόμενη³ δομή. Αυτός ο συνδυασμός πλαστικών συνδιάζει την ασφάλεια και την οικονομία στην κατανάλωση καυσίμου. Η διαδικασία κατασκευής που χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί το Baja είναι μια κλειστή διαδικασία σχηματοποίησης που είναι φιλική προς το περιβάλλον. Το Baja είναι ένα όχημα για όλα τα εδάφη και είναι ιδανικό για τις τροπικές περιβαλλοντικές συνθήκες όπου το σύνθετο σώμα και το πλαίσιο του αντιστέκονται στην άμμο και το νερό της θάλασσας. Μετά από μια ημέρα στην άμμο, το νάιλον - το καλυμμένο εσωτερικό νεοπρινίου καθαρίζεται εύκολα με σαπούνι και νερό. Στο πάτωμα υπάρχουν αγωγοί που επιτρέπουν την διαφυγή στο νερό, αφήνοντας το εσωτερικό μέρος του οχήματος ξηρό.

Η πιό πρόσφατη εργονομική τεχνολογία στοιχείων και υλικών χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη του εσωτερικού σχεδίου.



Σχ. 1-7 Ανάπτυξη εσωτερικού σχεδίου BAJA

Πρόσφατα χρησιμοποιείται ένας θερμοπλαστικός τάπητας γυαλιού το λεγόμενο GMT το οποίο είναι ένα ενισχυμένο γυαλί από σύνθετο υλικό κατάλληλο για κατασκευές που δέχονται μεγάλες πιέσεις. Οι εφαρμογές αυτού του υλικού είναι για καλύψεις θερμαντικών σωμάτων και το βασικότερο για προφυλακτήρες αυτοκινήτων.

Τα πλεονεκτήματα του GMT είναι:

- Έχει μια πολύ υψηλή αντίσταση στην κρούση
- Καλές ιδιότητες απόσβεσης
- Είναι ανακυκλώσιμο
- Στρώματα επιφάνειας όπως τα φύλλα αλουμινίου, υφαντικά επιστρώματα κ.λπ. μπορούν να εφαρμοστούν κατά τη διάρκεια της συμπίεσης.

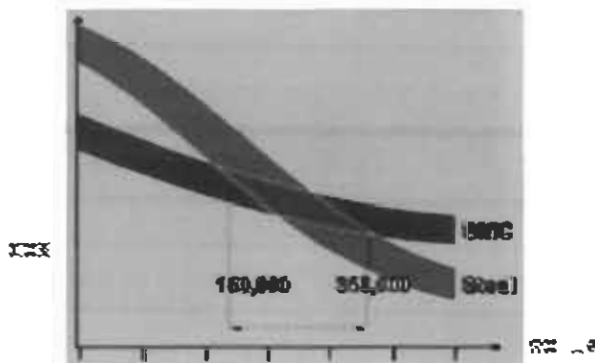
³ Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή θερμαινόμενα πάλι δεν μπορούν να ξαναγίνουν πλαστικά.

Οι ιδιότητες GMT με περιεκτικότητα σε γυαλί 30% είναι:

Ιδιότητες κελύφους		Μηχανικές ιδιότητες	
Περιεκτικότητα σε γυαλί	30%	Εφελκυστική τάση	55MPa
Πυκνότητα	1.11g/cm ³	Εφελκυστική επιμήκυνση	2,4%
Διαδικασία διακένωσης	0,2-0,3%	Εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας	4200 MPa
Ανώτατη θερμοκρασία λειτουργίας	150°C	Δύναμη κρούσης	50KJ/m ²

1.7 Τι είναι SMC;

Το SMC είναι μια ίνα ενισχυμένου σύνθετου υλικού που αποτελείται από την θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, την ενίσχυση ινών γυαλιού και το υλικό πλήρωσεως.



Σχ. 1-8: Γραφική παράσταση που μας δείχνει το κόστος συναρτήσει της έντασης.

Το SMC μπορεί να καλύψει τις συγκεκριμένες απαιτήσεις απόδοσης όπως η έκτατη φόρτιση. Η περιεκτικότητα σε ίνες γυαλιού σε SMC μπορεί να ποικίλει από 25% σε 60% ανάλογα με τη φόρτιση. Οι ίνες SMC γίνονται όλο και περισσότερο εύχρηστες στις τρέχουσες αλλαγές στην αυτοκινητοβιομηχανία:

- Η αυξανόμενη διαφοροποίηση οχημάτων στην ίδια πλατφόρμα σημαίνει περισσότερη ποικιλία των αυτοκινήτων σε μια μικρότερη ποσότητα δαπανών SMC (βλ. ανωτέρω)

- Η οικονομία καυσίμων μέσω της μείωσης βάρους είναι ένα άλλο ελκυστικό χαρακτηριστικό γνώρισμα SMC
- Συχνότερη χρήση των ηλεκτρονικών συσκευών, όπως τις κεραιές και τα συστήματα GPS που μπορούν να ενσωματωθούν με SMC παρέχει ηλεκτρική μόνωση.
- Ένα μέρος SMC αντικαθίσταται περίπου δεκαεννέα μέρη χάλυβα.
- Έναντι του αλουμινίου και του χάλυβα, το SMC αποδεικνύει την καλύτερη ιδιότητά του στην ηχομόνωση. Το SMC καθιστά μια μείωση του θορύβου περίπου 50% πιθανή .
- Η ελευθερία σχεδίου. Μερικά σχέδια δεν είναι πραγματοποιήσιμα με χάλυβα
- Χημική αντίσταση στο έλαιο, τα καύσιμα, το ρευστό φρένων, και το αλμυρό νερό.
- Αντίσταση στην διάβρωση
- Τα κλειστά τμήματα SMC μπορούν να φέρουν τα ίδια φορτία με το χάλυβα.

Αντίθετα από άλλες θερμοπλαστικές⁴ ενώσεις SMC έχει έναν πολύ χαμηλό γραμμικό θερμικό συντελεστή. Είτε στις χαμηλές είτε υψηλές θερμοκρασίες το SMC θα παρουσιάσει απόλυτα την ίδια διαστατική συμπεριφορά με το χάλυβα.

1.8 Τι είναι σύνθετα;

Ο όρος "σύνθετα" μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους και να καθοριστεί από κάτι γενικό ως πολύ συγκεκριμένο. Τα σύνθετα υλικά είναι επίσης ένας συνδυασμός διαφορετικών συστατικών. Ο γενικός ορισμός σύνθετου υλικού είναι: "Δύο ή περισσότερα ανόμοια υλικά συνδυασμένα μεταξύ τους παράγουν ισχυρότερα υλικά από τα προερχόμενα υλικά." Τα σύνθετα μπορούν να είναι είτε φυσικά ή τεχνητά. Το ξύλο είναι ένα καλό παράδειγμα ενός φυσικού σύνθετου υλικού. Το ξύλο είναι ένας συνδυασμός ίνας και κυτταρίνης. Η ίνα κυτταρίνης παρέχει τη δύναμη και ο λιγνίτης είναι συνδετική ουσία που συνδέει και σταθεροποιεί την ίνα. Το μπαμπού είναι μια πολύ αποδοτική ξύλινη *σύνθετη* δομή. Τα συστατικά είναι *κυτταρίνη* και *λιγνίτης*, εντούτοις το μπαμπού είναι κοίλο. Αυτό οδηγεί σε μια πολύ ελαφριά όμως δύσκαμπτη δομή. Το κοντραπλακέ είναι ένα τεχνητό σύνθετο υλικό που συνδυάζει φυσικά και τεχνικά υλικά. Τα λεπτά στρώματα της

⁴ Με την θερμοκρασία αποκτούν πλαστικότητα γιατί μαλακώνουν με αποτέλεσμα να μπορούν να κατεργαστούν εν θερμό. Η διαδικασία αυτή για τα θερμοπλαστικά είναι αντιστρεπτή.

ξύλινης παρέμβασης συνδέονται μαζί με την κόλλα για να διαμορφώσουν τα επίπεδα φύλλα σε στρώματα ξύλου που είναι ισχυρότερα από το φυσικό ξύλο.

Ο συνδυασμός σκυροδέματος και χάλυβα δημιουργεί δομές που είναι άκαμπτες και ισχυρές. Αυτό είναι ένα κλασικό σύνθετο υλικό όπου υπάρχει μια συνεργασία μεταξύ των υλικών. Σ' αυτήν την περίπτωση, ο συνδυασμός υλικών είναι ισχυρότερος και δίνει στην κατασκευή καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Το σκυρόδεμα είναι άκαμπτο και έχει καλή θλιπτική τάση, ενώ ο χάλυβας έχει υψηλή αντοχή στον εφελκυσμό. Το αποτέλεσμα είναι μια δομή που είναι ισχυρή στον εφελκυσμό και στην θλίψη.

Ένα άλλο σύνθετο προϊόν είναι το ελαστικό. Ένα ελαστικό αυτοκινήτου είναι ένας συνδυασμός του καουτσούκ και μιας ενίσχυσης όπως ο χάλυβας, το νάιλον, οι ίνες aramid, ή άλλες ίνες. Το λάστιχο ενεργεί ως ρητίνη, που κρατά την ενίσχυση σε ισχύ.

Παρόλο που ο ευρύς ορισμός των σύνθετων είναι ακριβής, είναι πάρα πολύ γενικός. Ένας καλύτερος ορισμός των σύνθετων υλικών είναι: "Ένας συνδυασμός ενίσχυσης ινών και μιας πολυμερούς ρητίνης. Παραδείγματος χάριν, η ρητίνη πολυεστέρα είναι η μήτρα και η ίνα γυαλιού είναι η ενίσχυση.

1.9 Γιατί τα σύνθετα είναι διαφορετικά από τα συμβατικά υλικά

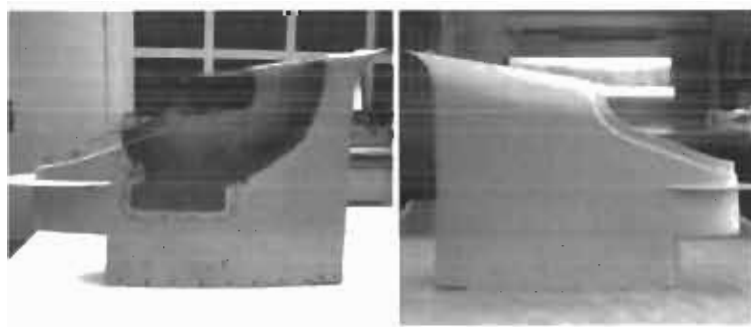
Τα σύνθετα έχουν διαφορετικές ιδιότητες από άλλα υλικά. Τα μέταλλα έχουν παραδείγματος χάριν ίση αντοχή σε όλες τις κατευθύνσεις δηλ. είναι ιστροπικά υλικά. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να προσαρμοστούν έτσι ώστε να έχουν την αντοχή σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Εάν ένα σύνθετο υλικό πρέπει να αντισταθεί στην κάμψη σε μια κατεύθυνση, το μεγαλύτερο μέρος της ίνας μπορεί να προσανατολιστεί στη δύναμη αυτή. Αυτό δημιουργεί μια πολύ δύσκαμπτη δομή σε μια κατεύθυνση. Στα μέταλλα, εάν η μεγαλύτερη αντοχή απαιτείται σε μια κατεύθυνση, το υλικό στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να έχει μεγαλύτερο εμβαδών διατομής, το οποίο συνεπάγεται επιπρόσθετο βάρος. Τα σύνθετα διαφέρουν από τα μέταλλα λόγω του ευρέως φάσματος των υλικών συνδυασμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Λόγω αυτού, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί μια προσέγγιση "εγχειριδίων" στον σχεδιασμό σύνθετων. Παραδείγματος χάριν, εάν κάποιος έψαχνε μια συγκεκριμένη διάμετρο χάλυβα για να εκταθεί 6 m και να φέρει ένα φορτίο 9KN θα μπορούσατε απλά να ανοίξουμε ένα εγχειρίδιο δομικού χάλυβα και να επιλέξουμε την κατάλληλη διάμετρο και το πλάτος φλαντζών από ένα διάγραμμα.

Τα σύνθετα είναι πιά περίπλοκα. Τα χαρακτηριστικά απόδοσης των σύνθετων μπορούν να ποικίλουν σε έναν τεράστιο βαθμό και δεν υπάρχει κανένα τέτοιο εγχειρίδιο το οποίο να μας λέει για όλα τα σύνθετα υλικά. Υπάρχουν διαφόρων ειδών ρητίνες που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα. Αυτές οι ρητίνες είναι: ο πολυεστέρας, ο εστέρας βινυλίου, η εποξική και φαινολική ρητίνη. Υπάρχουν και άλλες ρητίνες εντούτοις, το σημαντικό σημείο που υπογραμμίζεται είναι ότι κάθε μια από αυτές τις ρητίνες έχει τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά απόδοσης. Παραδείγματος χάριν, εάν ένα προϊόν πρέπει να είναι ανθεκτικό στη διάβρωση, η ισοφθαλκή ή βινυλίου ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Εάν η υψηλή αντοχή είναι κρίσιμη, μια εποξική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Το κόστος της ρητίνης πολυεστέρα είναι χαμηλό και γι' αυτό η ρητίνη πολυεστέρα χρησιμοποιείται αρκετά.

Εκτός από τις διάφορες ρητίνες, υπάρχουν οι διάφοροι τύποι ινών ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα. Η ίνα γυαλιού χρησιμοποιείται πάνω από 90% σε όλα σχεδόν τα σύνθετα. Εντούτοις, αν είναι απαραίτητο, οι προηγμένες ίνες όπως η ίνα Kevlar ή άνθρακα προσφέρουν απόδοση σε ψηλά επίπεδα. Για τις ίνες γυαλιού, υπάρχουν πολλές μορφές ενίσχυσης. Ανάλογα με τη διαδικασία παρασκευής της ίνας και τις απαιτήσεις αντοχής του προϊόντος υπάρχουν πολλές επιλογές. Η ίνα γυαλιού είναι διαθέσιμη στον τυχαίο προσανατολισμό ινών υπό μορφή τεμαχισμένου υφάσματος. Υπάρχουν επίσης ελαφριά υφαντικά υφάσματα, βαριά υφασμένα υλικά, πλεκτά υφάσματα, και ομοιοκατευθυνόμενα υφάσματα. Όλα εξυπηρετούν τους συγκεκριμένους σκοπούς για σύνθετο σχεδιασμό.

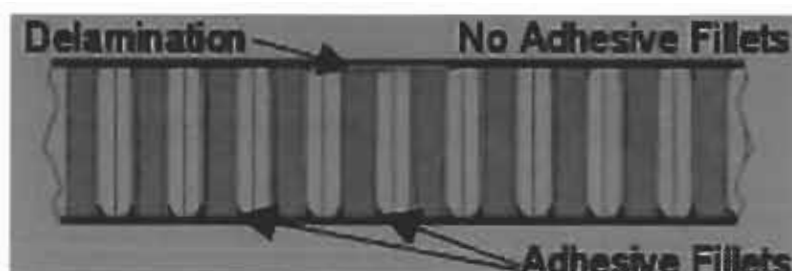
Σύνθετη επισκευή αστογιών

Οι φθαρμένες σύνθετες δομές είναι σίγουρα επισκευάσιμες όπως φαίνεται στις πιο κάτω εικόνες. Εντούτοις, υπάρχουν προκλήσεις:



Σχ. 1-9: Φθαρμένες σύνθετες δομές

Κρυσμμένα σημεία αστοχίας, συμπεριλαμβανομένων των ατελειών κατασκευής (πχ. ένας χαμηλός αντίκτυπος ταχύτητας, που κανονικά δεν θα προκαλούσε μεγάλη φθορά μπορεί να προκαλέσει μια δομή πολύστρωτη μεταξύ της επιφάνειας και του πυρήνα λόγω της φτωχής πρόσφυσης κατά τη διάρκεια της κατασκευής.



Σχ. 1-10: Κρυσμμένα σημεία αστοχίας (Delamination – Αποκόλληση. No Adhesive Fillets = Χωρίς Κόλλα, Adhesive Fillets = Με Κόλλα)

Η αποκοπή είναι η μόνη φθορά και δεν μπορεί να υπάρξει κανένα ορατό ίχνος από την επιφάνεια.)

- Απροσδόκητες πηγές φθοράς (πχ. ένα μέρος στην κάθετη ουρά των αεροσκαφών μπορεί να σχεδιαστεί για να αντιστέκεται στην κρούση από διάφορα αντικείμενα αλλά να μην είναι ικανό να αντισταθεί στη φθορά από την αφαίρεση για την συντήρηση)
- Οι καλύτερες τεχνικές επισκευής εξαρτώνται από τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της δομής. Με άλλα λόγια, επειδή τα σύνθετα υπερέχουν στην προσαρμογή για να ικανοποιήσουν τις πολύ συγκεκριμένες ανάγκες, υπάρχουν υλικά και μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι σύνθετες λεπτομέρειες επισκευής πρέπει να καθοριστούν σε κάθε περίπτωση χωριστά.

Βασική διαδικασία επισκευής

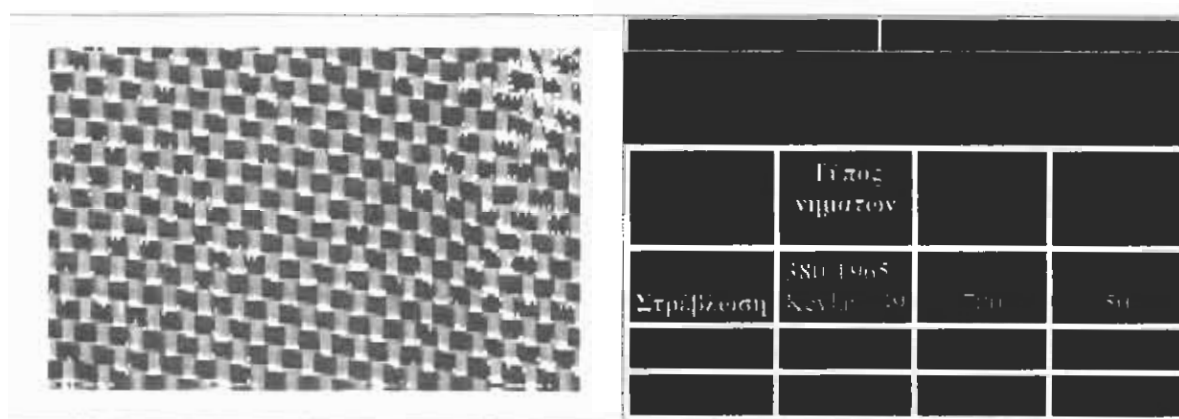
Οι πολύ βασικές αρχές της σύνθετης επισκευής περιλαμβάνουν τα ακόλουθα βήματα:

- Επιθεώρηση για αξιολόγηση της φθοράς (βαθμός και βάθος φθοράς)
- Αφαίρεση του φθαρμένου υλικού
- Προετοιμασία της περιοχής επισκευής
- Πλήρης σύνθετη επισκευή
- Επιθεώρηση της επισκευής για την εξασφάλιση της ποιότητας

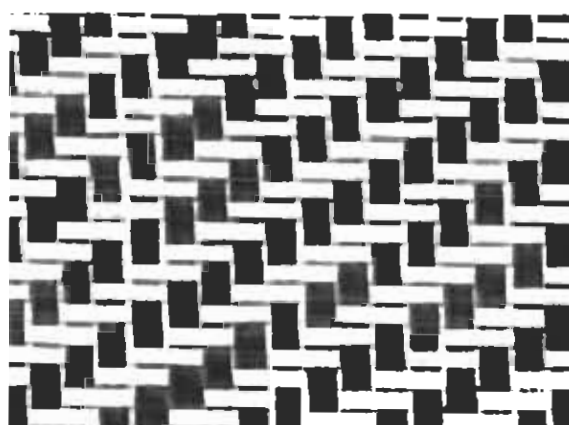
1.10 Πολυμερείς ίνες Kevlar, ενίσχυσης, υφάσματα, και άλλα

Γιατί τα υαλονήματα έχουν γίνει η κυρίαρχη ενίσχυση ινών;

Τα υαλονήματα είναι κυρίαρχο υλικό ως ίνα ενίσχυσης απλά επειδή έχει υψηλή αντοχή και υψηλή ακαμψία. Μια σύγκριση των υαλονήματων με τα ανθρακονήματα - το πιο δύσκαμπτο υλικό ενίσχυσης - και με τις άλλες κύριες ίνες ενίσχυσης επιδεικνύει ακριβώς πώς τα καλά υαλονήματα κοστίζουν φθηνά σε σύγκριση με τα υπόλοιπα (βλ πίνακα 1). Τα υαλονήματα έχει πάνω από δέκα φορές την αντοχή (αντοχή τάνυσης ανά κόστος μονάδας) και σχεδόν πέντε φορές η αξία ακαμψίας (συντελεστής ανά κόστος μονάδας) συγκριτικά με άλλες σημαντικές σύνθετες ίνες ενίσχυσης. Ως εκ τούτου, όταν το κόστος είναι μια σημαντική κατευθυντήρια δύναμη στην επιλογή ενός υλικού ενίσχυσης, τα υαλονήματα προτιμούνται.



Σχ. 1-11: (α) Ίνες Kevlar®



Σχ. 1-11: (β) Συνδυασμός ινών άνθρακα - ίνες KEVLAR

Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα προφανή οφέλη δαπανών για τα υαλονήματα, εύλογα αναρωτιόμαστε, "ποιοι είναι οι λόγοι που θα επιλέγαμε οποιαδήποτε άλλη

ίνας;" Στην περίπτωση των ινών άνθρακα, ο λόγος για τον οποίο τους χρησιμοποιούμε είναι συνήθως η ακαμψία για μια πολύ υψηλή-εκτιμημένη εφαρμογή. Υπό αυτούς τους όρους, τα κριτήρια για την επιλογή ενός υλικού ενίσχυσης είναι η αντοχή ή, συχνότερα η ακαμψία (ακαμψία που διαιρείται με τη συγκεκριμένη πυκνότητα). Οι ίνες άνθρακα έχουν ουσιαστικά καλύτερη αντοχή στον εφελκυσμό και τιμές ακαμψίας από ότι τα υαλονήματα. Ως εκ τούτου, όταν το βάρος της ίνας είναι μια ισχυρή κατευθυντήρια δύναμη, οι ίνες άνθρακα μπορούν να δικαιολογηθούν εύκολα.

Πίνακας II: Μηχανικές Ιδιότητες για τις ίνες ενίσχυσης

Ίνα	Εφελκυστική Αντοχή (10^4 PSI)	Μέτρο Ελαστικότητας (10^6 PSI)	Επιμήκυνση (%)	Κόστος (\$/lb)	Αξία Αντοχής / Κόστος	Αξία ακαμψίας / Κόστος	Ειδική πυκνότητα	Ειδική Αντοχή	Ειδική Ακαμψία
Υαλονήματα ¹	500	12	4.9	1	500	12	2.6	192	4.6
Ανθρακονήματα	600	35	1.6	12	50	3	1.8	333	19
Aramid	575	19	2.8	19	30	1	1.4	410	14
UHMWPE ⁴	422	16	2.9	20	21	8	97	435	16

Η απόδοση των ινών *aramid* εμπορικής ονομασίας Kevlar και ειδικά (πολυαιθυλένιο μεγάλης πυκνότητας και υψηλού μοριακού βάρους) οι ίνες UHMWPE είναι ελκυστικές όταν το βάρος είναι σημαντικός σχεδιαστικός παράγοντας. Το Aramid και οι ίνες UHMWPE είναι ουσιαστικά διαφορετικές από τις άλλες ίνες και είναι λιγότερο ευρέως γνωστές. Έχουν τις μοναδικές ιδιότητες που οδηγούν στις ειδικές εφαρμογές. Αυτές οι εφαρμογές δεν είναι εκείνες που συνδέονται συνήθως με τα σύνθετα υαλονήματα, αλλά είναι, εντούτοις πολύ σημαντικές και ενδιαφέρουσες στη πράξη. Το παρακάτω κείμενο θα εξερευνήσει ίνες aramid και UHMWPE και εφαρμογές τους σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις. Ίσως οι ιδιότητές τους σε μια τρέχουσα εφαρμογή αυτών των ινών θα προτείνουν μια νέα χρήση στις εφαρμογές.

Ίνες Αραμίτη (Aramid): Η εταιρία Dupont ανακάλυψε τις ίνες aramid στη δεκαετία του '60 ως τμήμα της συνεχούς έρευνάς του σε όλους τους τύπους *νάιλον ινών* (πολυαμιδίων). Η Dupont διαπίστωσε με το να καταστήσει το πολυμερές σώμα

ιδιαίτερα αρωματικό, θα μπορούσε να διαμορφωθεί μια πολύ δύσκαμπτη και ισχυρή ίνα. Η χημική δομή Kevlar παρουσιάζει δαχτυλίδια βενζολίου κατά μήκος της πολυμερούς σπονδυλικής στήλης. Αυτά τα υλικά κλήθηκαν "aramids" από μια συστολή των χημικών αρωματικών πολυαμιδίων. Το Aramids πωλείται τώρα από διάφορες επιχειρήσεις εκτός από την Dupont συμπεριλαμβανομένου: Akzo (Twaron), Teijin (Technora), Monsanto (X- 500), και από τη Ρωσία (Vnilon).

Η αρχική εφαρμογή των ινών αραμίτη (aramid) ήταν ως ενίσχυση στα ελαστικά. Αν και τα ελαστικά που έγιναν με τις ενισχύσεις aramid απέδωσαν αρκετά καλά, δεν ήταν ικανές να αντικαταστήσουν τις ενισχύσεις χάλυβα και τώρα κατά ένα μεγάλο μέρος έχουν καταργηθεί από την αγορά των ελαστικών. Εντούτοις, οι ίνες aramids χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς ως ενισχύσεις στα παραδοσιακά σύνθετα υλικά. Ήταν υψηλά διατιμημένες, έτσι ώστε ανταγωνίστηκαν σπάνια με τα υαλονήματα, αλλά βρέθηκαν να μεταδίδουν μερικές πολύ ευεργετικές ιδιότητες στα αεροδιαστημικά σύνθετα υλικά που δεν θα μπορούσαν να ληφθούν χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε άλλο υλικό ενίσχυσης. Αυτές οι σύνθετες ιδιότητες προέρχονται από έναν μοναδικό συνδυασμό σωματιδιακών ιδιοτήτων, όπως φαίνεται στον πίνακα 3. Ο σημαντικότερος αυτών των ιδιοτήτων για το αεροδιάστημα ήταν η ανθεκτικότητα. Αυτή η ανθεκτικότητα έχει συνδεθεί με το μοναδικό μηχανισμό αστοχίας των ινών aramids. Αυτός ο αριθμός δείχνει ότι όταν οι ίνες aramid αστοχούν, δεν αποτυγχάνουν με το εύθραυστο ράγισμα, όπως οι ίνες υαλονημάτων και άνθρακα. Αντ' αυτού, οι ίνες aramid αποτυγχάνουν από μια σειρά μικρών αστοχιών της κατασκευής των ινών, όπου οι ινώδεις κατασκευές είναι μοριακά σκέλη που αποτελούν κάθε ίνα aramid και είναι προσανατολισμένες στην ίδια κατεύθυνση με την ίδια την ίνα. Αυτές οι πολλές μικρές αστοχίες απορροφούν πολύ ενέργεια με αποτέλεσμα την πολύ υψηλή ανθεκτικότητα.

Πολλές αεροδιαστημικές εφαρμογές σήμερα των ινών aramids περιλαμβάνουν την ανθεκτικότητα και την αντίσταση στην κρούση. Οι ίνες αραμίτη (Aramid) πχ. χρησιμοποιούνται στην αιχμή και στο κάτω μέρος των φτερών και τις επιφάνειες ελέγχου των αεροπλάνων για να βοηθήσουν να προστατευθούν από τη φθορά που προκαλείται κατά τη διάρκεια των απογειώσεων και των προσγειώσεων.

Η σημαντικότερη εφαρμογή για τις ίνες aramid είναι στις επικαλύψεις των υλικών. Οι ίνες αραμίτη (Aramid) είναι εύκολα διαθέσιμες σαν ύφασμα το οποίο

ράβεται για την επικάλυψη και τις σύνθετες εφαρμογές. Οι περισσότερες εμπορικές ρητίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τις ίνες aramid. Η ανθεκτικότητα των ιών αραμίτη (aramid) καθιστά τα σύνθετα αυτών υλικά εξαιρετικά δύσκολα να κοπούν.

Πίνακας III: Ιδιότητες των ιών αραμίτη (Aramid)

Ιδιότητες	Περιγραφή
Ανθεκτικότητα	2 έως 4 φορές καλύτερα από τα ανθρακονήματα
Θερμική ευστάθεια	Αμετάβλητες ιδιότητες από -40 έως 130°C
Αντίσταση στη θερμότητα	Μπορεί να ανταποκριθεί στις εξωτερικές επικαλύψεις των αεροσκαφών
Διαλυτική αντίσταση	Απρόσβλητο από τους οργανικούς διαλύτες και τις βάσεις, των ισχυρών οξέων.
Αντίσταση στη διάβρωση του νερού	Μικρή απορρόφηση του νερού (περίπου 2%)
Αντίσταση στη ρωγμή	Εξαιρετικά καλό υλικό
Κυκλική απόδοση πίεσης	Άριστο
Ξηρές Ίνες	Δύσχρηστες ρητινών χαμηλού ιξώδους
Κατεργασία/κοπή	Δύσχρηστες ρητινών, απαιτούνται ειδικά εργαλεία

Ίνες UHMWPE(Ultra High Molecular Weight PE): Το UHMWPE χαρακτηρίζεται από το υπερβολικό πολυαιθυλένιο υψηλού μοριακού βάρους. Οι ίνες παράγονται από το υλικό AlliedSignal ,DSM ,Tenfor και Mitsui. Ο μοριακός τύπος για αυτό το πολυμερές σώμα είναι ο ίδιος με το κοινό πολυαιθυλένιο (PE), αλλά είναι σημαντικά διαφορετικός λόγω του ίδιου του υψηλού μοριακού βάρους, από 10 έως 100 φορές μεγαλύτερο από την εμπορική ρητίνη πολυαιθυλενίου. Το υψηλό μοριακό βάρος οδηγεί στις σωματιδιακές ιδιότητες που είναι, σε πολλές πτυχές, ανταγωνιστικές με τα υαλονήματα, ίνες άνθρακα, και aramid, όπως φαίνεται στον πίνακα IV

Οι ίνες UHMWPE μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τις περισσότερες εμπορικές ρητίνες όπως οι εποξικές και οι πολυεστέρες. Εντούτοις, οι χημικές ιδιότητες των ιών UHMWPE είναι τέτοιες που λίγες ρητίνες συνδέονται καλά με τις επιφάνειες ιών και έτσι οι δομικές ιδιότητες που αναμένονται από τις ιδιότητες ιών συχνά δεν πραγματοποιούνται πλήρως σε ένα σύνθετο υλικό. Διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας επιφάνειας έχουν δοκιμαστεί για να βελτιώσουν την πρόσφυση μεταξύ

των ινών UHMWPE και των πιο κοινών ρητινών, αλλά αυτές οι επεξεργασίες έχουν συναντηθεί με περιορισμένη εμπορική επιτυχία. Εντούτοις, αυτές οι ίνες συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται σε πολλές κατασκευαστικές εφαρμογές.

Πίνακα IV: Ιδιότητες των ινών UHMWPE.

Ιδιότητες	Περιγραφή
Ανθεκτικότητα	Πολύ καλό
Θερμική σταθερότητα	Μη χρησιμοποίηση πάνω από 93°C
Αντίσταση στη θερμότητα	Καίγεται εύκολα
Διαλυτική αντίσταση	Απρόσβλητο από τους οργανικούς διαλύτες, τα οξέα και τις βάσεις
Αντίσταση στη διάβρωση του νερού	Καμία απορρόφηση νερού
Αντίσταση στις ρωγμές	Άριστο
Κυκλική απόδοση πίεσης	Άριστο
Ξηραμένη ίνα	Παρόμοιο με τα υαλονήματα
Κατεργασία/κοπή	Δυσκολόχρηστες-απαιτηση ειδικών εργαλείων
Ηλεκτρισμός	Χαμηλή διηλεκτρική σταθερά (2.2) πέρα από ένα ευρύ φάσμα των συχνοτήτων

Ένα άλλο πρόβλημα που έχει περιορίσει τη χρήση των ινών UHMWPE ως ενισχύσεις, είναι η τάση τους να ολισθαίνουν και να χάνουν τη δύναμη τους στις υψηλές θερμοκρασίες. Οι ίνες UHMWPE δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν πάνω από 93°C ή στις εφαρμογές όπου ένα φορτίο θα εφαρμοστεί για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο, ακόμη και στη θερμοκρασία δωματίου. (Ο ερπυσμός μπορεί να είναι τόσο υψηλός όπως 10% στις ώρες του 90 όταν εφαρμόζεται ένα φορτίο 30% στη θερμοκρασία δωματίου.)

Ακόμη και με αυτούς τους περιορισμούς για τις δομικές εφαρμογές, οι χρήσεις UHMWPE είναι πολυάριθμες. Π.χ, τα πανιά για τις αγωνιστικές βάρκες παγκόσμιας κατηγορίας γίνονται από ίνες UHMWPE. Η αντίσταση στο νερό, η ελαφριά, υψηλή δύναμη και η ανθεκτικότητα, και η καλή αντίσταση στη παραμόρφωση καθιστούν τη χρήση αυτού του υλικού στα πανιά απαραίτητη. Πολλές

από τις ίδιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες είναι συμφέρουσες στα θαλάσσια σχοινιά. Η δυνατότητα να επιπλεύσουν στο νερό, η αντίσταση στην τριβή, και η κυκλική αντίσταση σε κόπωση των ινών UHMWPE δίνουν περαιτέρω αξία στις εφαρμογές για την κατασκευή των σχοινιών. Οι ίνες UHMWPE και aramid είναι δύσκολο να κοπούν. Αυτή η ιδιότητα περιπλέκει τη χρήση τους σε μερικές σύνθετες εφαρμογές, αλλά δίνει την προστιθέμενη αξία σε μερικές εφαρμογές υφάσματος.

Όπως με τις ίνες aramid, η σημαντικότερη αγορά για τις ίνες UHMWPE είναι για επικάλυψη επιφανειών. Εκτός από τις εφαρμογές επικάλυψης, η ανθεκτικότητα των ινών UHMWPE είναι εμφανής σε χρήση τους ως υλικό επένδυσης για τις επιφάνειες αεροπλάνων.

Ποία η χρησιμότητα των σύνθετων;

Ο παρακάτω Πίνακας V δείχνει ακριβώς μερικές από τις εφαρμογές για τα σύνθετα υλικά βασισμένες στις μοναδικές ιδιότητές τους.

Νέα πλαστικά στην βιομηχανία

Γιατί πλαστικά;

Ο όρος "πλαστικά" καλύπτει τα οργανικά υλικά (άνθρακας, υδρογόνο, άζωτο, κ.λπ.) από το μεγάλο μοριακό βάρος που μπορεί να διαμορφωθεί από τη ροή. Ο όρος αναφέρεται συνήθως στο τελικό προϊόν, με τα υλικά πληρώσεως, πλαστικοποιητές, τις χρωστικές ουσίες, και τους σταθεροποιητές που περιλαμβάνονται, κατά της ομογενούς πολυμερούς ρητίνης του αρχικού υλικού. Τα πλαστικά είναι πολυμερή σώματα, τα οποία δημιουργούνται με τη χημική σύνδεση πολλών ίδιων ή σχετικών δομικών μονάδων.

Τα πολυμερή σώματα που περιέχουν πρώτιστα τον άνθρακα και το υδρογόνο είναι ταξινομημένα ως οργανικά πολυμερή σώματα, συμπεριλαμβανομένου του πολυπροπυλενίου (PP), του πολυβουτυλενίου (PB), και του πολυστυρόλιου (PS). Άλλα στοιχεία που βρίσκονται στην μοριακή σύνθεση των πολυμερών σωμάτων περιλαμβάνουν το οξυγόνο, το χλώριο, το φθόριο, το άζωτο, το πυρίτιο, φωσφορούχος, και το θείο. Το πολυβινυλικό χλωρίδιο (PVC) περιέχει το χλώριο. Το νάυλον περιέχει το άζωτο. Το τεφλόν περιέχει το φθόριο. Ο πολυεστέρας και οι πολυάνθρακες (PCs) περιέχουν το οξυγόνο. Τα πολυμερή σώματα που έχουν ένα

πυρίτιο ή φωσφορούχος σπονδυλική στήλη, αντί ενός άνθρακα ένα, θεωρούνται ανόργανα πολυμερή σώματα.

Πίνακας V: Εφαρμογές και Ιδιότητες διαφόρων Συνθέτων Υλικών

Χαρακτηριστικό γνώρισμα	Εφαρμογή
Ελαφρύ, δύναμη, και ακαμψία	Ρομποτικά όπλα, τμήματα αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών, μεταφερόμενες γέφυρες, αθλητικά προϊόντα, δομές υποστήριξης, τμήματα αγωνιστικών αυτοκινήτων, μεγάλης ακρίβειας σχεδίαση.
Αντίσταση θερμότητας	Λσπίδες θερμότητας, φρένα από ίνες άνθρακα, πλαίσια καθρεφτών υψηλής ακρίβειας.
Χημικές ιδιότητες	Δεξαμενές αποθήκευσης, κιγκλιδώματα, θαλάσσιες δομές.
Ακαμψία και απόσβεση	Μουσικά όργανα, ακουστικοί ομιλητές.
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Διακόπτες αφής, πλαίσια ηλεκτρικής απαλλαγής.
Αντίσταση κούρασης	Πτερύγια συμπιεστών, τεχνητά άκρα, βαλβίδες φωτογραφικών διαφανειών αέρα.
Μονώνοντας ιδιότητες	Σκάλες, βραχίονες, πίνακες κυκλωμάτων, εργαλεία χειριών

Ένα θερμοπλαστικό είναι ένα πολυμερές σώμα στο οποίο τα μόρια διατηρούν τη συνοχή τους από αδύναμες δευτεροβάθμιες σωματιδιακές δυνάμεις που μπορούν και να "λειώσουν" από θερμότητα και να μαλακώσουν, κατόπιν μπορούν να σχηματιστούν ή να διαμορφωθούν όπως προηγουμένως πριν όμως "να παγώσουν" πάλι. Οι διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης μπορούν να επαναληφθούν πολλές φορές χωρίς σημαντική χημική αλλαγή. Το θερμοσκληρυνόμενο είναι ένα πολυμερές σώμα που μπορεί να σταθεροποιείται και να θερμαίνεται αμετάκλητα όταν λόγω μιας χημικής αντίδρασης που περιλαμβάνει τη διασύνδεση μεταξύ των αλυσίδων. Τα θερμοπλαστικά γενικά παρουσιάζονται καλύτερα στην κάμψη την προσκρούση την απόδοση ενώ παρουσιάζουν την ανώτερη αντίσταση στους διαλύτες. Τα θερμοσκληρυνόμενα τείνουν να έχουν την καλύτερη θλιπτική αντοχή και χάραξη και σημαντικά καλύτερη σταθερότητα στη δομή τους. Τα σύνθετα αποτελούνται μια ίνες

ενίσχυσης σε πολυμερή ρητίνη. Ο πολυεστέρας, ο βινυλίο εστέρας, και οι εποξικές ρητίνες επιλέγονται συχνότερα. Τα σύνθετα υλικά συνδυάζουν ουσιαστικά την αντοχή και την ακαμψία των μετάλλων και το ελαφρύς, την ευελιξία, και την αντίσταση διάβρωσης των πλαστικών.

Σύμφωνα με την ένωση Fabricators σύνθετων, περίπου 65% όλων των σύνθετων υλικών που παράγονται χρησιμοποιούν τα υαλονήματα και τον πολυεστέρα ή τις βινυλίου- ρητίνες του εστέρα, και κατασκευάζονται με την χρησιμοποίηση μιας ανοικτής μεθόδου σχηματοποίησης. Το υπόλοιπο 35% της παράγωγής χρησιμοποιεί τις μεθόδους υψηλής κατασκευής ή τα προηγμένα υλικά χρήσης, όπως ο άνθρακας ή aramid (πολυαμίδια όπως Kevlar) ίνα. Η ίνα άνθρακα είναι πρώτιστη σε χρήση αγωνιστικών αυτοκινήτων και αεροδιαστημικές βιομηχανίες λόγω της σημαντικής αντοχής και της απόδοσης σε τριβή. Ο αέρας εισαγωγής ρέει από αυτούς τους κολλίσκους στις ειδικές ασπίδες θερμότητας από ανθρακονήματα, που εγκαθίστανται γύρω από το εσωτερικό των φρένων στις ψήκτρες των στροφέων. Οι ασπίδες θερμότητας αναπτύχθηκαν από Multimatic Motorsports και χρησιμοποιήθηκαν μέχρι το 1999 από την Cobras στη σειρά αγώνων Motorola. Η κύρια αυτοκίνητη εφαρμογή για την ίνα άνθρακα συνεχίζει να είναι για τα κινούμενα μέρη στη μηχανή και τη μετάδοση.

Οι ίνες Aramid χρησιμοποιούνται στα κινούμενα μέρη όπου η λίπανση και η διαστατική συνέπεια είναι σημαντικότερες από τη δύναμη ή την ακαμψία, όπως οι ζώνες συμπλεκτών και οι ελεύθεροι διακόπτες ανάφλεξης. Η εταιρεία αυτοκινήτων Ford παρουσίασε σε διεθνή έκθεση ένα φορτηγό με: Kevlar προφυλακτήρες, κγκλιδώματα, θόλους που καθιστούν τα μέρη ανθεκτικά στην πρόσκρουση.

Τα πολυμερή είναι ανθεκτικά στις σκληρές χημικές ουσίες κατάλληλα για θερμική και ηλεκτρική μόνωση όπως επίσης και για ηχομόνωση. Μπορούν να ενσωματωθούν στο σώμα ενός αυτοκινήτου, ή να αναμιχθούν με τους διαλύτες για να γίνουν μια κόλλα ή ένα χρώμα. Τα ελαστομερή και μερικά πλαστικά είναι πολύ εύκαμπτα. Άλλα πολυμερή σώματα μπορούν να αφριστούν, όπως PS και urethane. Τα πολυμερή σώματα φαίνονται να έχουν μια απεριόριστη σειρά των χαρακτηριστικών και των χρωμάτων, με τις έμφυτες ιδιότητες που μπορούν να ενισχυθούν από ένα ευρύ φάσμα των πρόσθετων ουσιών για να διευρύνουν τις χρήσεις τους.

1.13 Σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά είναι εύκολα προσαρμόσιμα και χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία ποικιλία των εφαρμογών. Το ευρύτετα χρησιμοποιημένο σύνθετο υλικό είναι υαλονήματα στη ρητίνη πολυεστέρα, η οποία αναφέρεται συνήθως ως υαλονήματα. Το υαλονήματα είναι ελαφρύ, ανθεκτικό στη διάβρωση, οικονομικό, εύκολα επεξεργάσιμο, καλές μηχανικές ιδιότητες και έχει πάνω από 50 έτη ιστορίας. Είναι το κυρίαρχο υλικό στις βιομηχανίες κατασκευής βαρκών ,στον εξοπλισμό διάβρωσης και διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στις βιομηχανίες αυτοκινήτου, ιατρικής, κατασκευής ψυχαγωγικών παιχνιδιών και βιομηχανικών εξοπλισμών. Στον Πίνακα V υπάρχει μια σύγκριση του κόστους και των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με το αργίλιο, το χάλυβα και το ξύλο.

1.14 Διαδικασία παρασκευής

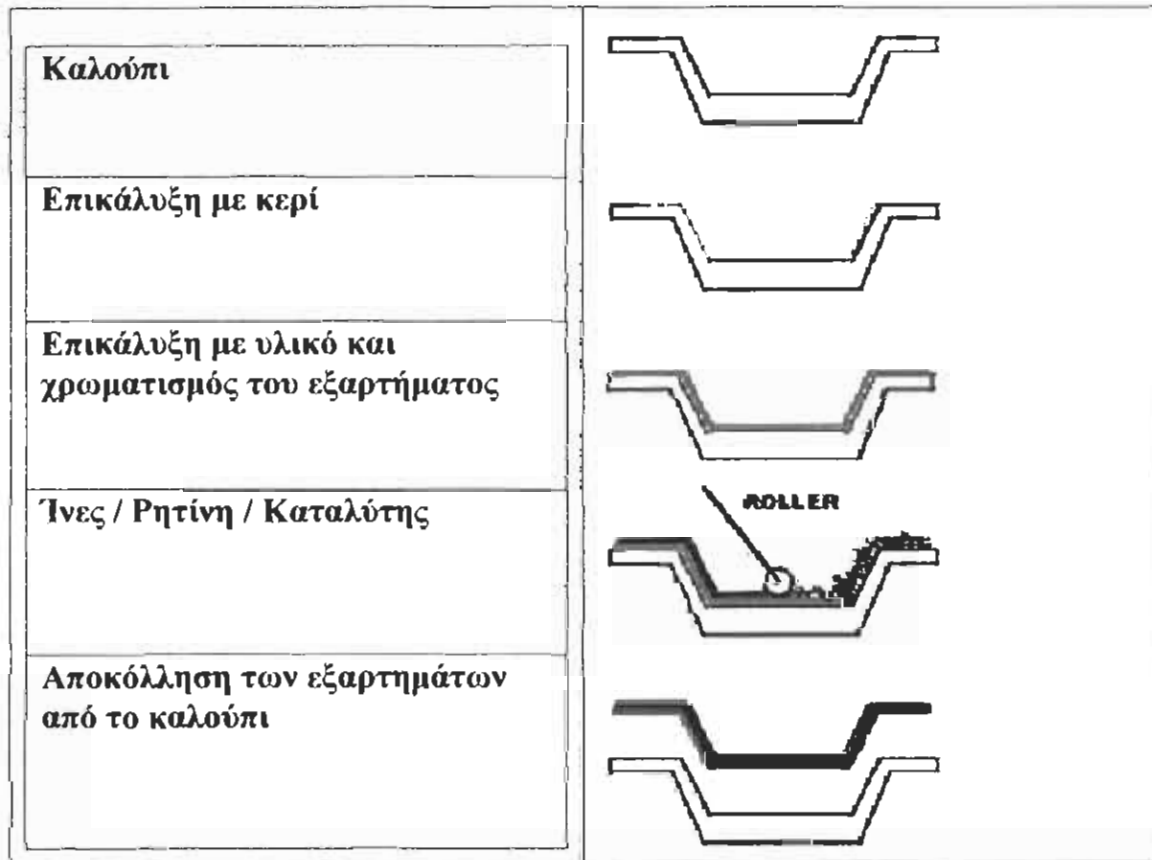
Τα μέρη των υαλονημάτων κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μια υγρή διαδικασία τοποθέτησης πάνω σε μια ανοικτό καλούπι. Η μορφή του καθορίζεται από τη μορφή του καλουπιού, και η επιφάνεια του(καλουπιού) είναι χαρακτηριστική διότι βρίσκεται σε επαφή με το εξωτερικό μέρος του κατασκευαζόμενου εξάρτημα.

Πίνακας V: Σύγκριση διαφόρων υλικών.

	Υαλονήματα & Πολυεστέρας	Γραφίτης & Εποξικός	Ξύλο (Douglas FIR)	Αργίλιο 6061 T-6	Χάλυβας
Κόστος \$/LB	\$1.80	\$8.00	\$0.40	\$3	\$.30
Δύναμη, Παραγωγή (PSI)	30,000	60,000	2,400	35,000	60,000
Ακαμψία (PSI)	1.2×10^6	8×10^6	1.8×10^6	10×10^6	30×10^6
Πυκνότητα (LB/in ³)	.055	.065	.02	.10	.30

Η απελευθέρωση του καλουπιού ξεκινά από το ίδιο το καλούπι για να αποφευχθεί η προσκόλληση του υαλονήματος επάνω του. Κατόπιν η επίστρωση ζελατίνας, που είναι χρωματισμένη ρητίνη, εφαρμόζεται στο καλούπι για να δώσει το χρώμα του εξαρτήματος. Τα υαλονήματα και η ρητίνη τοποθετούνται στο καλούπι και τα υαλονήματα συμπιέζονται από τους κυλίνδρους, οι οποίοι διανέμουν

ομοιόμορφα τη ρητίνη και αφαιρούν τα κενά αέρος. Τα διαδοχικά στρώματα των υαλονήματων που τοποθετούνται διαμορφώνουν το επιθυμητό πάχος. Όταν η ρητίνη μορφοποιηθεί αφαιρείται από το καλούπι. Το υλικό που περισσεύει αποκόπτεται, και το εξάρτημα είναι έτοιμο για χρωματισμό και συναρμολόγηση.



1.15 Πληροφορίες σχεδίου

Όπως οποιοδήποτε άλλο υλικό, έτσι και τα υαλονήματα έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά στις εφαρμογές που έχουμε διάβρωση, παραγωγή μικρής ποσότητας, κατασκευή μεγάλων μέρων, περιγραμμένα, στρογγυλεμένα μέρη ή μέρη που δέχονται υψηλή δύναμη, τα υαλονήματα είναι το υλικό της επιλογής. Τα υαλονήματα είναι το υλικό ενός σχεδιαστή, επειδή τα μέρη μπορούν να προσαρμοστούν για να έχουν αντοχή και ακαμψία στις κατευθύνσεις και τις θέσεις που είναι απαραίτητες να τοποθετήσουν τα υλικά και να προσανατολίσουν την κατεύθυνση ινών. Επίσης η ευελιξία που προσφέρουν τα υαλονήματα στον σχεδιασμό και την κατασκευή του, παρέχουν τις ευκαιρίες να παγιωθούν τα μέρη και να ενσωματωθούν πολλά χαρακτηριστικά γνωρίσματα στο κομμάτι για να μειώσουν

περαιτέρω τη συνολική τιμή τους. Μερικές γενικές οδηγίες σχεδίου παρατίθενται κατωτέρω:

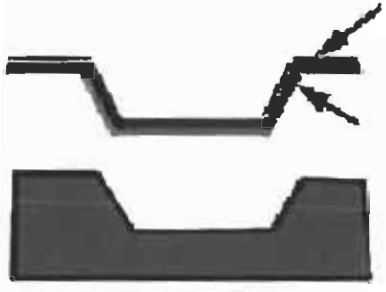

Πίνακας VI: Γενικές οδηγίες σχεδίου

Πάχος Υλικού	Προτεινόμενο πάχος από 1/16 " έως 1/2". Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πολύστρωτων υλικών για να επιτύχουμε πιο δύσκαμπτα μέρη με μικρότερο βάρος.
Ακτίνα γωνιών	Προτεινόμενη ακτίνα 1/8 " ή μεγαλύτερη.
Μορφή	Αναπαραγωγή της μορφής του καλουπιού.
Διαστατική ανοχή	Η πλευρά εργαλείων μπορεί να είναι ± 010 Πλευρά μη εργαλείων ± 030 "
Τελική επιφάνεια	Η πλευρά εργαλείων μπορεί να είναι κατηγορίας A Η πλευρά μη εργαλείων θα είναι τραχιά, αλλά μπορεί να λειανθεί εξωτερικά.
Συρίκνωση	.002 in/in
Ηλεκτρικές ιδιότητες	RF διαφανές Άριστα χαρακτηριστικά μόνωσης Παρέχει το προστατευτικό κάλυμμα EMI μέσω του αγωγίμου επιστρώματος
Καθυστέρηση στην πυρκαγιά	Ρητίνες διαθέσιμες στις εφαρμογές καθυστέρησης της πυρκαγιάς που καλύπτουν τις απαιτήσεις των κανονισμών ASTM & τις απαιτήσεις παραγωγής του καπνού.
Διάβρωση	Ρητίνες διαθέσιμες για τις εφαρμογές διάβρωσης, ειδικά για το αλατόνερο, οξέα, τις καυστικές ουσίες, & αέρια χλωρίου

Σχεδίαση

Τα καλούπια χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη μορφή των κομματιών υαλονήματων. Τα υαλονήματα θα πάρουν όλες τις μορφές και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των καλουπιών, επομένως η ποιότητα του εξαρτήματος επηρεάζεται από

την ποιότητα των καλούπιών. Τα καλούπια μπορούν να είναι είτε αρσενικά είτε θηλυκά. Τα θηλυκά καλούπια είναι οι πιο κοινές και θα παραγάγουν ένα μέρος με μια ομαλή εξωτερική επιφάνεια ενώ ένα αρσενικό καλούπι θα παραγάγει μια ομαλή εσωτερική επιφάνεια (παρακάτω σχήμα).

	<p>Τραχεία επιφάνεια</p> <p>Λεία επιφάνεια με ημίρρευστο επίστρωμα</p>
<p>Θηλυκό καλούπι</p>	
	<p>Τραχεία επιφάνεια</p> <p>Λεία επιφάνεια με ημίρρευστο επίστρωμα</p>
<p>Αρσενικό καλούπι</p>	

Για μικρές παραγωγές (λιγότερο από 10 κομμάτια), το προσωρινό καλούπι μπορεί να γίνουν από το ξύλο, αφρό, άργιλο ή ασβεστοκονίαμα. Αυτά τα καλούπια είναι οικονομικά και μπορούν να κατασκευαστούν γρήγορα και θα επιτρέψουν την ανέξοδη κατασκευή πρωτότυπων κομματιών. Για μεγαλύτερη παραγωγή, τα καλούπια γίνονται χαρακτηριστικά με τα υαλονήματα. Αυτά τα καλούπια έχουν μια διάρκεια ζωής 10 + έτη λειτουργίας. Οι φόρμες των υαλονημάτων είναι ανέξοδες και κοστίζουν συνήθως 5 έως 10 φορές την τιμή του μέρους.

Τα καλούπια είναι ο καθρέπτης του εξαρτήματος. Για να δημιουργηθεί ένα καλούπι, απαιτείται ένα έμβολο, το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί από ξύλο, αφρό, ασβεστοκονίαμα, ή τον άργιλο. Η ακριβή μορφή και το τέρμα του εμβόλου θα μεταφερθούν στο καλούπι. Η τεχνική επεξεργασίας του καλουπιού είναι παρόμοια με την κατασκευή ενός μέρους υαλονήματος εκτός ότι τα υλικά σχεδίασης (επίστρωση,

ρητίνες, και ύφασμα πηκτωμάτων) χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ένα ανθεκτικό καλούπι που έχει τη χαμηλή διακένωση και την καλή διαστατική σταθερότητα σχήματος. Μόλις τοποθετηθεί σε στρώματα το καλούπι, ενισχύεται με τη δομή ξύλου, υαλονημάτων ή μετάλλων για να εξασφαλίσει ότι διατηρεί την κατάλληλη μορφή.

1.16 Γιατί χρησιμοποιούμε σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά έχουν απεριόριστη δυνατότητα στις εφαρμογές τους. Κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών τα σύνθετα υλικά θα αρχίσουν να βρίσκουν τον δρόμο τους σε έναν αυξανόμενο αριθμό προϊόντων και καταναλωτικών αγαθών.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα	Πλεονέκτημα
Ελαφρύ	Ελαφρύ βάρος (τουλάχιστον 5 φορές ελαφρύτερο από τον χάλυβα) το οποίο μεταφράζεται σε λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.
Υψηλή ακαμψία	Η υψηλή ακαμψία βοηθά να περιοριστεί η εκτροπή ή η παραμορφώση μιας δομής κάτω από ένα φορτίο. Τα σύνθετα μπορούν να είναι τουλάχιστον 2,5 φορές πιο δύσκαμπτα από το χάλυβα.
Υψηλή δύναμη	Η υψηλή δύναμη επιτρέπει σε ένα σύνθετο υλικό να χειριστεί τα υψηλά φορτία πριν σπάσει. Η αντοχή των σύνθετων υλικών φτάνει μέχρι 2,5 φορές τη δύναμη του χάλυβα.
Σταθεροποίηση μερών	Η μείωση της αριθμησης μερών μπορεί να οδηγήσει στο χαμηλότερο κόστος και μείωση των πιέσεων στη δομή λόγω λιγότερων ενώσεων.
Μεγάλος κύκλος ζωής	Στα σύνθετα υλικά δεν έχουμε κόπωση όπως τα μέταλλα, δεν διαβρώνονται ή δεν βαθουλώνουν, και έχουν άριστη αντίσταση στην κρούση.
Ειδικές ανάγκες	Τα σύνθετα υλικά υπερέρχουν με τη διαστατική σταθερότητα τους κάτω από τις μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες, και έχουν βελτιώσει την παλμική τους απόσβεση.
Ευελιξία σχεδίου	Τα σύνθετα υλικά, αντίθετα από τα μέταλλα, μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα για να δώσουν με μεγάλη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του σχεδίου.

Το σύνθετο είναι ένα υλικό παραγόμενο από δύο ή περισσότερα υλικά. Τα μηχανολογικά σύνθετα υλικά είναι συνεχείς ίνες που κρέμονται σε μια άκαμπτη μήτρα (δηλ. ρητίνη), που προσανατολίζεται στις διάφορες κατευθύνσεις. Οι ίνες, παραδείγματος χάριν, μπορούν να είναι άνθρακας, υαλονήματα, Kevlar™, πολυεστέρας, νάυλον, κεραμικά, υλικά χαλαζία ή βορίου. Οι ίνες δίνουν στο σύνθετο δύναμη και ακαμψία. Αυτές οι ίνες μπορούν να είναι υπό μορφή σκοινιού (δηλ. νήμα),

ταινίας, τυχαίων ινών ή ενός μάλλινου ρούχου. Το υλικό ρητίνης είναι τυπικά ένα θερμοπλαστικό, ένας πολυεστέρας, βινυλίου εστέρας, φαινολικός ή εποξικός. Οι ρητίνες δίνουν στο σύνθετο υλικό τη μορφή τους και παρέχουν ένα μέσο μέσω του οποίου τα φορτία μεταφέρονται από τη μια ίνα στην άλλη.

Τα τυχαία ή υφαμένα σύνθετα ινώδη υλικά είναι η κύρια μορφή σύνθετου υλικού που χρησιμοποιείται σήμερα. Αυτά τα σύνθετα υλικά είναι χαμηλής δύναμης και ακαμψίας και χρησιμοποιούνται τυπικά σε εφαρμογές όπως οι βάρκες, τα εμπορευματοκιβώτια, οι επικαλύψεις, τα μέρη αυτοκινήτων κ.λπ.

Ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό είναι κατά πολύ η πιο προηγμένη δομική μορφή ενός σύνθετου υλικού. Τα τοποθετημένα σε στρώματα σύνθετα υλικά μπορούν να θεωρηθούν ως φύλλα των συνεχών σύνθετων ινών που τοποθετούνται έτσι ώστε κάθε φύλλο να προσανατολίζει την ίνα σε μια δεδομένη κατεύθυνση. Ένας συνδυασμός από στρώσεις αυτών των φύλλων στους ποικίλους προσανατολισμούς ή γωνίες παράγει ένα κατασκευασμένο φύλλο πλαστικού. Τα τοποθετημένα σε στρώματα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ακαμψίας και δύναμης όπως τα ρομποτικά όπλα, τα φτερά αεροσκαφών, οι άξονες γκολφ και οι πόλοι φωτεινών σηματοδοτών.

Κεφάλαιο 2^ο

Βιομηχανική Παραγωγή ρητινών & ινών

2.1 Εισαγωγή

Τι είναι σύνθετο υλικό; Δυστυχώς δεν υπάρχει κανένας ευρέως αποδεκτός ορισμός που να καθορίζει τον ορισμό ενός σύνθετου υλικού^{1,2}. Ως σύνθετο ορίζεται κάτι που προέρχεται από δύο ή περισσότερα συστατικά. Στο ατομικό επίπεδο τα υλικά όπως μερικά κράματα μετάλλων και τα πολυμερή θα μπορούσαν να ονομαστούν σύνθετα δεδομένου ότι αποτελούνται από διαφορετικούς και ευδιάκριτους ατομικούς σχηματισμούς. Στο μικροδομικό επίπεδο (περίπου 10⁻⁴ έως 10⁻² εκατ.) ένα κράμα μετάλλων όπως ο χάλυβας, δηλ. ο εμπλουτισμένος με άνθρακα χάλυβας που περιέχει φερίτη και περλίτη θα μπορούσε να ονομαστεί ως σύνθετο υλικό δεδομένου ότι τα δύο αυτά συστατικά είναι ευδιάκριτα όπως παρατηρείται στο μικροσκόπιο. Στο μακροδομικό επίπεδο (περίπου 10⁻² εκατ. ή μεγαλύτερος) ένα πλαστικό ενισχυμένο με υαλονήματα, στο οποίο οι ίνες γυαλιού μπορούν να αναγνωριστούν ευδιάκριτα με γυμνό μάτι, θα μπορούσε να θεωρηθεί σύνθετο υλικό. Τώρα βλέπουμε ότι η δυσκολία στον καθορισμό ενός σύνθετου υλικού είναι οι περιορισμοί μεγέθους που επιβάλλουμε στα συστατικά που αποτελούν το υλικό. Στο σχέδιο εφαρμοσμένης μηχανικής ένα σύνθετο υλικό αναφέρεται συνήθως σε μια υλική σύσταση από τα συστατικά μικροϋπολογιστής- η σειρά, και ακόμη και οι έννοιες η σειρά. Ένα σύνθετο είναι ένα συνθετό σύστημα υλικών μίας μίξης ή ενός συνδυασμού δύο ή περισσότερων συστατικών σε κλίμακα μικρο ή μακρο που διαφέρουν στη μορφή και τη χημική σύνθεση και είναι ουσιαστικά αδιάλυτα μεταξύ τους. Η σημασία της εφαρμοσμένης μηχανικής ενός σύνθετου υλικού είναι ότι δύο ή περισσότερα ευδιάκριτα, διαφορετικά υλικά συνδυάζονται ώστε να διαμορφώσουν ένα σύνθετο υλικό που κατέχει ιδιότητες που είναι ανώτερες, ή σημαντικότερες κατά κάποιον τρόπο, από τις ιδιότητες των επιμέρων συστατικών.

¹ D.Hull, An Introduction to Composites Materials, Cambridge univ. press (1993)

² J.Delmonte, Technology of Carbon & Graphite Fiber Composites, Van Nostrand Reinhold, co. (1981)

2.2 Ίνες για τα ενισχυμένα πλαστικά σύνθετα υλικά

• Παραγωγή & ιδιότητες υαλονημάτων για την ενίσχυση πλαστικών ρητινών

Τρεις κύριοι τύποι *συνθετικών ινών* χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν τα πλαστικά: *γυαλί, αραμίτης, και άνθρακας*. Το γυαλί είναι η ευρύτετα χρησιμοποιημένη ίνα ενίσχυσης έχοντας παράλληλα το χαμηλότερο κόστος. Οι ίνες αραμίτη και άνθρακα χαρακτηρίζονται από υψηλές αντοχές και χαμηλές ποκνότητες και έτσι χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, ιδιαίτερα αεροδιαστημικές, παρά το υψηλό κόστος τους.

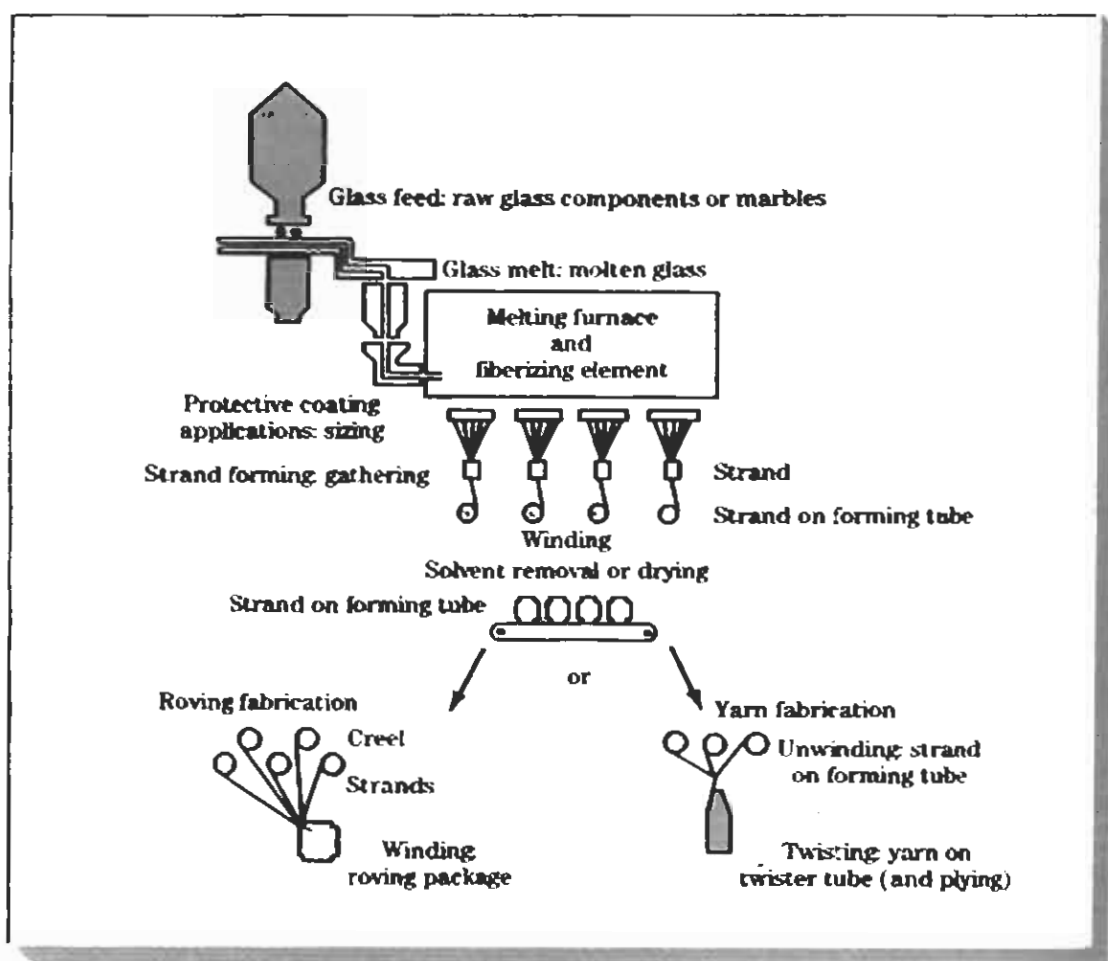
Οι *ίνες γυαλιού* χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν τις πλαστικές ρητίνες, να σχηματίσουν τα δομικά σύνθετα υλικά. Τα πλαστικά σύνθετα υλικά ενισχυμένα με *υαλονήματα* (fiber glass) έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: υψηλή στιβαρότητα συγκριτικά με το βάρος τους, καλή διαστατική ευστάθεια καλή αντίσταση στη θερμότητα, το ψύχος, την υγρασία, και τη διάβρωση επίσης έχουν καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, μόνωση, ευκολία στην επεξεργασία και σχετικά χαμηλό κόστος. Οι δύο σημαντικότεροι τύποι γυαλιών που χρησιμοποιούνται για να παραγάγουν τις ίνες γυαλιού, για τα σύνθετα υλικά, είναι γυαλιά τύπου E και S.

Το γυαλί τύπου E χρησιμοποιείται για τις συνεχείς ίνες. Βασικά, το γυαλί E (E-glass) με μηδέν ή χαμηλά επίπεδα νατρίου και καλίου. Η βασική σύνθεση του γυαλιού E κυμαίνεται από 52-56% SiO₂, 12-16% Al₂O₃, 16-25% CaO, και 8-13% B₂O₃. Το γυαλί E έχει μια εκατη δύναμη της τάξης των 500 ksi (3,44 GPa) στην αρχική του κατάσταση και έναν συντελεστή ελαστικότητας 10,5 Msi (72,3 GPa). Το γυαλί τύπου E έχει μια *υψηλότερη στιβαρότητα* συγκρινόμενο με το βάρος του και είναι ακριβότερο από το γυαλί E και χρησιμοποιείται πρώτιστα για στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές. Η ίνα αραμίτη είναι μια αρωματική πολυμερής ίνα πολυαμιδίων με πολύ άκαμπτη μοριακή δομή.

Η εφελκυστική δύναμη του γυαλιού-S είναι πάνω από 650 ksi (4,48 GPa),

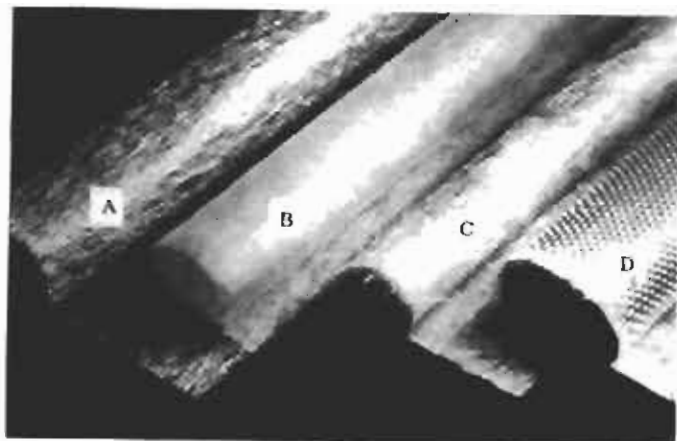
και ο συντελεστής ελαστικότητάς είναι περίπου 12,4 Msi (85,4 GPa). Μια χαρακτηριστική σύνθεση για το γυαλί τύπου S είναι περίπου 65% SiO_2 , 25% Al_2O_3 , και 10% MgO .

Η παραγωγή ινών γυαλιού και τύπου υαλονημάτων που ενισχύουν τα υλικά παράγονται εφελκύνοντας νήματα γυαλιού από τον φούρνο ο οποίος περιέχει λειωμένο γυαλί και συλλέγεται ένας μεγάλος αριθμός απ' αυτά τα νήματα τα οποία διαμορφώνουν τα υαλονήματα (βλ.σχ. 2-1).



Σχ. 2-1: Λογικό διάγραμμα παραγωγής ινών γυαλιού

Τα νήματα που παράγονται από τη μηχανή εξέλασης (extruder) ινών από γυαλί χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν ένα πλέγμα από υαλονήματα που αποτελούν μια συλλογή συνεχών δεσμών. Το πλέγμα το οποίο έχει ενισχυθεί από ίνες γυαλιού



Σχ. 2-2: Πλέγμα το οποίο έχει ενισχυθεί από ίνες γυαλιού

αποτελείται από συνεχή ή τεμαχισμένα νήματα. Τα νήματα διατηρούν συνήθως τη συνοχή τους με ένα ρητινούχο σύνδεσμο. Ο συνδιασμός πλεγμάτων γίνεται με την υφανμένη πλεξούδα νημάτων που συνδέεται χημικά μεταξύ τους. Οι ιδιότητες των ινών γυαλιού οι εφελκυστικές ιδιότητες και η πυκνότητα των ινών γυαλιού τύπου E συγκρίνονται με εκείνες του άνθρακα και των ινών *aramid* στον πίνακα 2-1.

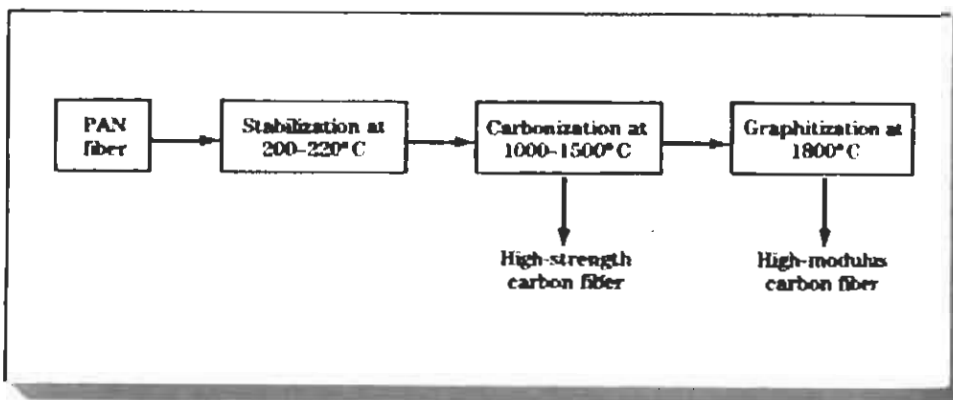
Πίνακας 2-1: Μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών

Property	E glass (HTS)	Carbon (type HT)	Aramid (Kevlar 49)
Tensile strength, ksi (MPa)	350 (2410)	450 (3100)	525 (3617)
Tensile modulus, Msi (GPa)	10 (69)	32 (220)	18 (124)
Elongation to break, %	3.5	1.40	2.5
Density, g/cm ³	2.54	1.75	1.48

2.3 Παραγωγή και ίνες ανθρακονημάτων

Διαπιστώνεται ότι τα υαλονήματα έχουν μια χαμηλότερη εφελκυστική δύναμη και έναν υψηλότερο συντελεστή επιμήκυνσης από τα ανθρακονήματα και ίνες αραμίτη. Η πυκνότητα των υαλονημάτων είναι επίσης υψηλότερη από τα ανθρακονήματα και τις ίνες αραμίτη. Εντούτοις, λόγω του χαμηλότερου κόστους και της μεταβλητότητάς τους, οι ίνες γυαλιού είναι περισσότερο χρησιμοποιούμενες για ενίσχυση στα πλαστικά.

Τα σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με τη χρησιμοποίηση των ανθρακονημάτων για την ενίσχυση πλαστικών ρητινών, (π.χ. εποξειδική ρητίνη) χαρακτηρίζονται από τον συνδυασμό χαμηλού βάρους, υψηλής αντοχής και ακαμψίας. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τη χρήση των ανθρακονημάτων στα σύνθετα πλαστικά υλικά ιδιαίτερα ελκυστική για τις αεροδιαστημικές εφαρμογές. Δυστυχώς, το σχετικά υψηλό κόστος των ινών άνθρακα περιορίζει τη χρήση τους σε πολλές βιομηχανίες όπως στην αυτόκινητοβιομηχανία. Οι ίνες άνθρακα για αυτά τα σύνθετα παράγονται κυρίως από δύο πηγές, πολύ-ακρυλό-νιτρίλιο (PAN) και πίσσα. Γενικά οι ίνες άνθρακα παράγονται από τις ίνες PAN σε τρία στάδια επεξεργασίας: (1) *σταθεροποίηση*, (2) *ανθράκωση*, και (3) *εμπλουτισμός με γραφίτη*.



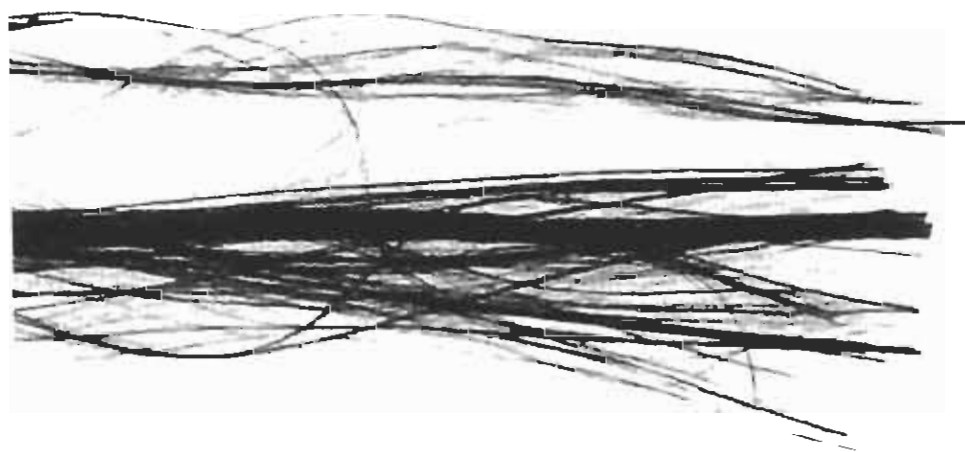
Σχ. 2-3: Παραγωγή ινών άνθρακα από ίνες PAN

- Αρχικά οι ίνες PAN τεντώνονται για να ευθυγραμμίσουν τα λεπτά δίκτυα των ινών μέσω σε κάθε δέσμη παράλληλη στον άξονα των ινών, και να οξειδωθούν στον αέρα περίπου στους 200 με 220°C (392 σε 428°F) ενώ κρατιούνται τεντωμένες.
- Το δεύτερο στάδιο στην παραγωγή ανθρακονημάτων υψηλής αντοχής είναι η ανθράκωση του. Σ' αυτήν την διαδικασία οι σταθεροποιημένες ίνες PAN πυρώνονται έως ότου γίνουν οι μετασχηματισμοί στις ίνες άνθρακα από την αποβολή O, H, και N υπό την αρχική ίνα. Η θερμική επεξεργασία της ανθράκωσης πραγματοποιείται συνήθως σε υδρική ατμόσφαιρα στους 1000 μέχρι 1500°C (1832-2732°F). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της ανθράκωσης τα πολύ λεπτά παράλληλα στρώματα γραφίτη, διαμορφώνονται

μέσα σε κάθε ίνα που αυξάνοντας κατά πολύ την εφελκυστική αντοχή του υλικού.

- Το τρίτο στάδιο εμπλουτισμός με γραφίτη χρησιμοποιείται εάν επιδιώκεται μια αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας σε βάρος της υψηλής εφελκυστικής αντοχής. Κατά τη διάρκεια του τρίτου σταδίου, που πραγματοποιείται ανω των 1800°C (3272°F), αυξάνεται ο προσανατολισμός για τους κρυσταλλους γραφίτη μέσα σε κάθε ίνα.

Οι ίνες – άνθρακα που παράγονται από το αρχικό υλικό PAN έχουν μια εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται περίπου από 2,34 έως 3,17 GPa και ένα εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται περίπου από 193 έως 413 GPa. Το μέτρο ελαστικότητας των ινών άνθρακα PAN αυξάνεται συνεχώς καθώς αυξάνει η θερμοκρασία πυρόλυσης μέχρι 413 GPa. Η εφελκυστική αντοχή των ινών άνθρακα PAN, αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης³ μέχρι τους 1200°C και κατόπιν μειώνεται με μικρότερο ρυθμό καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται περαιτέρω.



Σχ. 2-4: Ομάδα ινών άνθρακα

Η μείωση της εφελκυστικής αντοχής σε υψηλότερες θερμοκρασίες πυρόλυσης σημώνει την παρουσία ρωγμών στο εσωτερικό του υλικού και στην επιφάνειά του.

Η πυκνότητα των ανθρακωμένων και εμπλουτισμένων με γραφίτη ινών PAN είναι συνήθως περίπου 1,7 έως 2,1 g/cm³, ενώ η τελική διάμετρός τους είναι περίπου 7 έως

³ J. Baptiste Donnet, R. Bansal, Carbon Fibers, M. Dekker Inc, (1990)

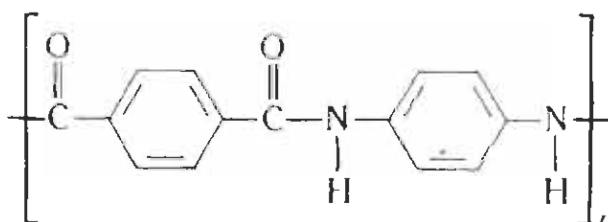
10 μm. Το σχήμα 2-4 παρουσιάζει μια ομάδα 6000 περίπου ινών άνθρακα γνωστή σε δέσμη.

2.4 Παραγωγή ινών Αραμίτη (Aramid) για την ενίσχυση των πλαστικών ρητινών

- Σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων ινών άνθρακα, αραμίτη, και ινών γυαλιού για πλαστικά σύνθετα υλικά.

Η ίνα αραμίτη είναι η γενική ονομασία για τις αρωματικές ίνες πολυαμιδίων. Οι ίνες αραμίτη εισήχθησαν στο εμπόριο το 1972 από τον Du Pont με την ονομασία Kevlar και υπάρχουν δύο εμπορικοί τύποι: Το Kevlar 29 και 49. Το Kevlar 29 είναι ίνα αραμίτη χαμηλής πυκνότητας και υψηλής αντοχής που σχεδιάστηκε για εφαρμογές όπως στη βαλλιστική προστασία, σχοινιά, και καλώδια. Το Kevlar 49 χαρακτηρίζεται από μια χαμηλή πυκνότητα και υψηλό συντελεστή αντοχής στην τάση εφελκυσμού. Οι ιδιότητες των ινών Kevlar 49 είναι χρήσιμες ως ενίσχυση για τα πλαστικά σύνθετα υλικά στις αεροδιαστημικές, θαλάσσιες, αυτοκίνητες βιομηχανίες και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

Η χημική ένωση του πολυμερούς Kevlar είναι η ένωση ενός αρωματικού πολυαμιδίου, που παρουσιάζεται στο Σχ 2-5.

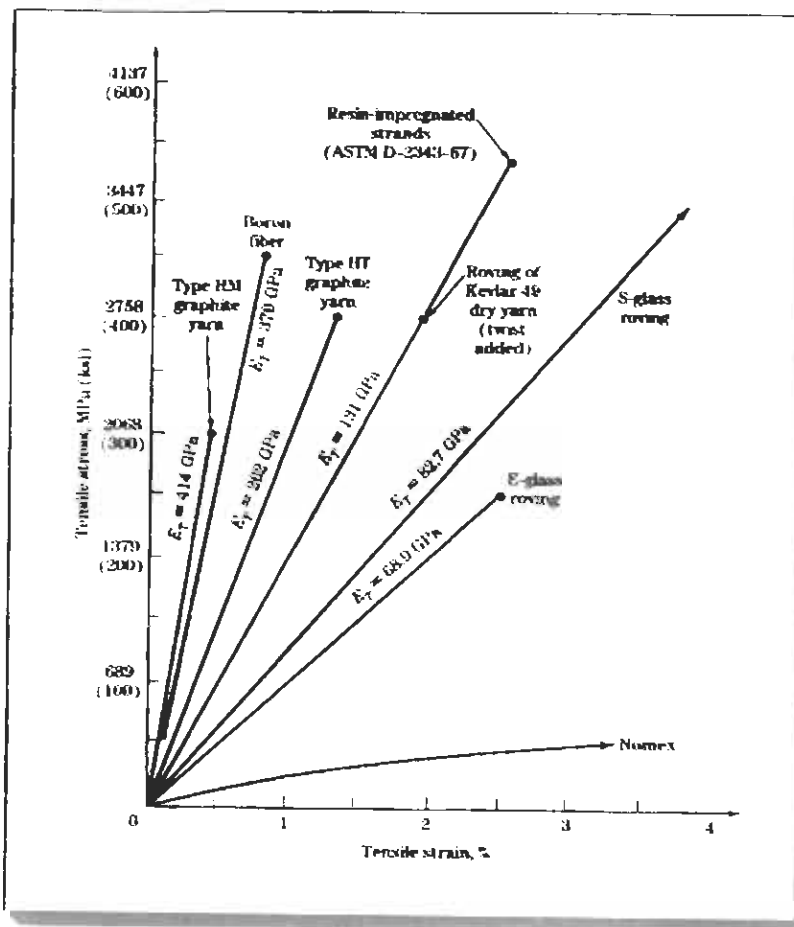


Σχ. 2-5: Χημική ένωση του πολυμερούς Kevlar

Κατά την ένωση αυτή, έχουμε σύνδεση του υδρογόνου με το πολυμερές σώμα σε εγκάρσια κατεύθυνση. Με την ένωση αυτή έχουμε ίνες με υψηλή αντοχή στη

διαμήκη κατεύθυνση και μια ελάττωση στην αντοχή κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Η αρωματική δομή δαχτυλιδιών, δίνει υψηλή ακαμψία στις πολυμερείς αλυσίδες, αναγκάζοντας την δομή να έχει ραβδωτό σχήμα

Οι ίνες αραμίτη (Kevlar) χρησιμοποιούνται για σύνθετες εφαρμογές υψηλής απόδοσης όπου πρέπει να έχουν τις εξής ιδιότητες : χαμηλό βάρος, υψηλή αντοχή και ακαμψία, αντίσταση στην φθορά, στην κόπωση και στην πίεση. Το σχ. 2-6 συγκρίνει τα χαρακτηριστικά της τάσης (MPa) σε συνάρτηση της επιμήκυνση (%) σε ένα διάγραμμα για τις εξής ίνες: άνθρακα, Aramid, και ίνες γυαλιού.

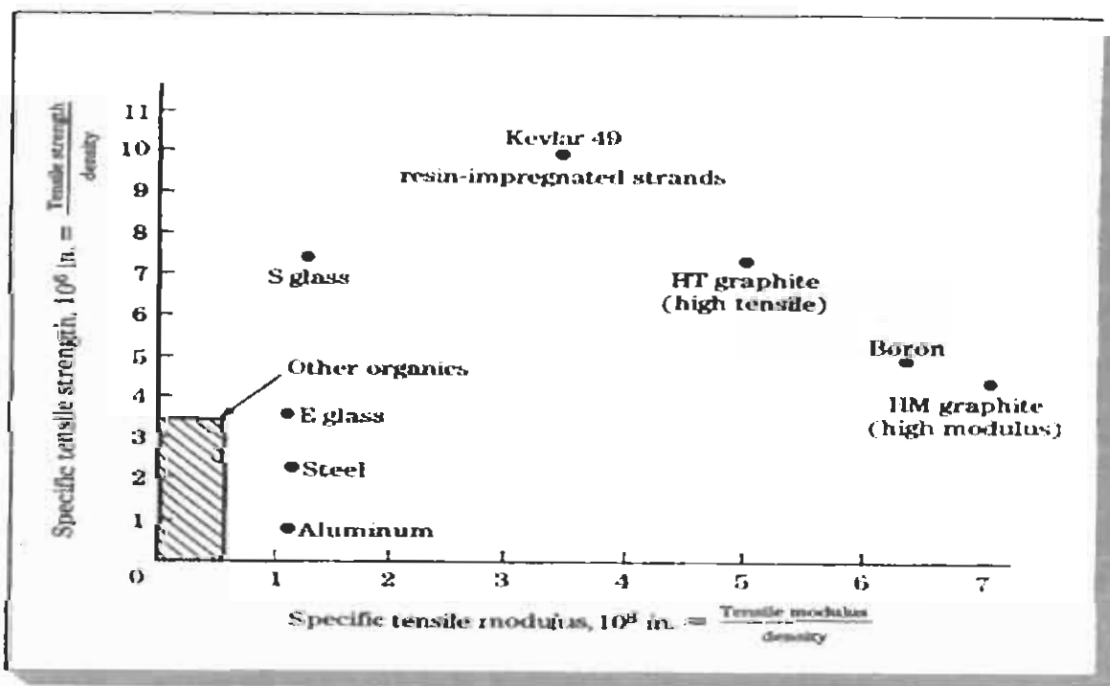


Σχ. 2-6: Εφελκυστική τάση παραμόρφωση για διαφορετικών τύπων ινών

Από το Σχ 2-6 διαπιστώνουμε ότι: η τάση των ινών ποικίλλει από 1720 έως 3440 MPa, ενώ η επιμήκυνση (%) στο σημείο θραύσης κυμαίνεται από 0,4% έως 4,0%. Το μέτρο ελαστικότητας αυτών των ινών κυμαίνεται από 68,9 έως 413 GPa. Οι ίνες άνθρακα παρέχουν τον καλύτερο συνδυασμό υψηλής δύναμης, υψηλής ακαμψίας και χαμηλής πυκνότητας, αλλά έχει τον χαμηλότερο συντελεστή επιμήκυνσης. Η ίνα

αραμίτη (Kevlar-49) έχει ένα συνδυασμό υψηλής τάσης, υψηλού μέτρου ελαστικότητας (αλλά όχι τόσο υψηλό όσο οι ίνες άνθρακα), χαμηλής πυκνότητας, και υψηλής επιμήκυνσης. Τα υαλονήματα έχουν τις χαμηλότερες τάσεις θραύσης, τα χαμηλότερους μέτρα ελαστικότητας και τις υψηλότερες πυκνότητες όπως φαίνεται στο πιο κάτω Σχ.2-7.

Από τις ίνες γυαλιού, οι ίνες τύπου S έχουν υψηλότερες αντοχές και μεγαλύτερη επιμήκυνση από τις ίνες αντίστοιχες τύπου E. Για τον λόγο ότι οι ίνες γυαλιού είναι πολύ λιγότερο δαπανηρές & χρησιμοποιούνται ευρύτερα. Στο Σχ. 2-7 συγκρίνεται η ειδική εφελκυστική αντοχή με την πυκνότητα και την ακαμψία (συντελεστής τάνυσης). Αυτή η σύγκριση παρουσιάζει σημαντικές αναλογίες μεταξύ της αντοχής-βάρους και ακαμψία-βάρους του άνθρακα και των ινών Aramid (Kevlar 49) όπως σε εκείνες τις ιδιότητες του χάλυβα και του αλουμινίου. Λόγω αυτών των ευνοϊκών ιδιοτήτων, ο άνθρακας και οι ίνες Aramid έχουν αντικαταστήσει τα μέταλλα για πολλές εφαρμογές στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας.



Σχ. 2-7: Ειδική εφελκυστική αντοχή / Ειδικό μέτρο ελαστικότητας συντελεστής

2.5 Ενισχυμένες πλαστικές ίνες σύνθετων υλικών

➤ Υλικά ρητινών για ενισχυμένες πλαστικές ίνες σύνθετων υλικών.

Δύο από τις σημαντικότερες πλαστικές ρητίνες, για τις ενισχυμένες πλαστικές ίνες είναι ο *ακόρεστος πολυεστέρας (PE)* και οι *εποξειδικές ρητίνες (Epoxy)*.

Μερικές από τις ιδιότητες του χυτού άκαμπτου πολυεστέρα και των εποξικών ρητινών παρατίθενται στον πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2: Ιδιότητες πολυεστέρα και των εποξικών ρητινών

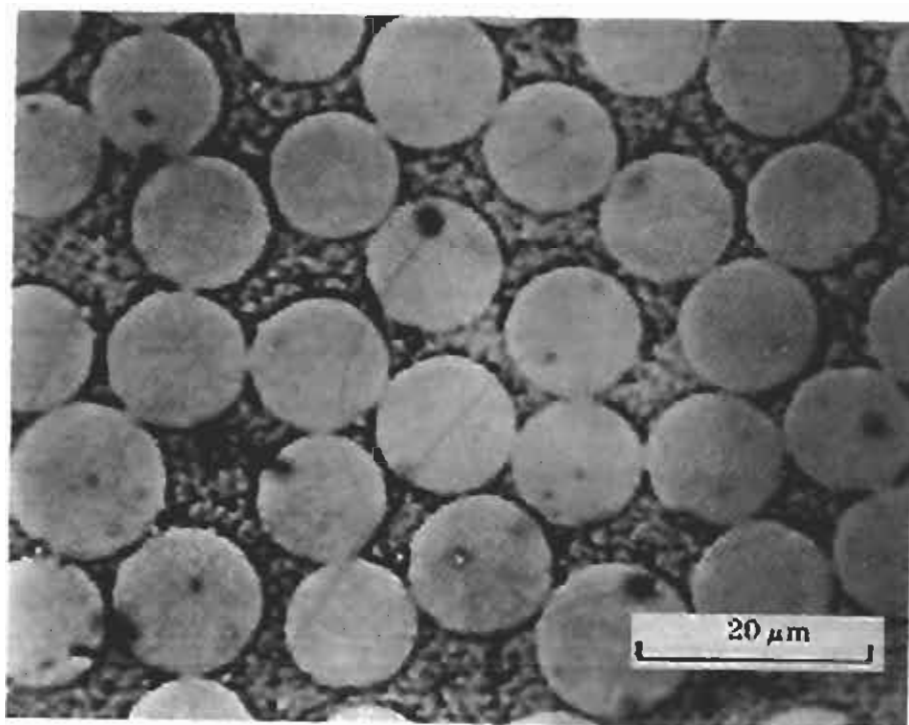
	Polyester	Epoxy
Tensile strength, ksi (MPa)	6–13 (40–90)	8–19 (55–130)
Tensile modulus of elasticity, Msi (GPa)	0.30–0.64 (2.0–4.4)	0.41–0.61 (2.8–4.2)
Flexural yield strength, ksi (MPa)	8.5–23 (60–160)	18.1 (125)
Impact strength (notched-bar Izod test), ft·lb/in (J/m) of notch	0.2–0.4 (10.6–21.2)	0.1–1.0 (5.3–53)
Density (g/cm ³)	1.10–1.46	1.2–1.3

Οι *πολυεστερικές* ρητίνες είναι χαμηλότερες στο κόστος αλλά συνήθως είναι ενισχυμένες πλαστικές ίνες σύνθετων υλικών, όχι τόσο ισχυρές όσο οι εποξικές ρητίνες. Οι *ακόρεστοι πολυεστέρες* χρησιμοποιούνται ευρέως για τις ρητίνες των ινών ενίσχυσης. Οι εφαρμογές των υλικών αυτών είναι: για επικάλυψη σκαφών και κατασκευή επίπεδων επιφανειών στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι εποξικές ρητίνες κοστίζουν περισσότερο αλλά έχουν τα εξής πλεονεκτήματα: καλές ιδιότητες αντοχής & χαμηλότερη φθορά μετά από επικάλυψη με ρητίνες πολυεστέρα. Οι εποξικές ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως υλικά ρητινών, συνδυαζόμενες με ίνες άνθρακα και Aramid.

Η αντοχή των ενισχυμένων ρητινών πολυεστέρα (PE) που περιέχουν ίνες γυαλιού εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα και την κατανομή του υλικού σε γυαλί. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα επί τοις εκατό του γυαλιού στο σύνθετο υλικό, τόσο ισχυρότερο είναι το ενισχυμένο πλαστικό σύνθετο. Όταν

υπάρχουν παράλληλα νήματα γυαλιού η περιεκτικότητα σε ίνες γυαλιού μπορούν να φθάσουν μέχρι και 80 % του βάρους του σύνθετου υλικού. Αυτή η περιεκτικότητα αυξάνει την αντοχή του σύνθετου υλικού στις υψηλές τάσεις. Το σχήμα 2-8 παρουσιάζει μια φωτογραφία ενός διαγώνιου τμήματος ενός σύνθετου υλικού από ρητίνες πολυεστέρα ενισχυμένο από ίνες γυαλιού τοποθετημένες με τον ίδιο προσανατολισμό⁴.

Οποιαδήποτε απόκλιση από την *παράλληλη* ευθυγράμμιση των νημάτων γυαλιού μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Παραδείγματος χάριν, τα σύνθετα υλικά που γίνονται από υφάσματα ινών γυαλιού έχουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες γυαλιού όταν είναι παράλληλες.



Σχ. 2-8: Ίνες γυαλιού του ίδιου προσανατολισμού

Για τυχαίο προσανατολισμό των ινών γυαλιού, η τάση θραύσης είναι μικρότερη για μια συγκεκριμένη κατεύθυνση αλλά ίση προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι *εποξικές ρητίνες* ενισχυμένες από ίνες άνθρακα στα σύνθετα υλικά αυξάνουν τις ιδιότητες αντοχής στον εφελκυσμό και στην ακαμψία του υλικού, ενώ η ρητίνη είναι ο

⁴ D.Hull, An Introduction to Composites Materials. Cambridge univ. press (1993)

καθοδηγητής για την ευθυγράμμιση των ινών και συμβάλλει στη κρουστική αντοχή του υλικού. Οι εποξικές ρητίνες είναι οι πιο συνηθισμένες για τις ίνες άνθρακα. Επίσης άλλες ρητίνες όπως: πολυμίδες, πολυφενίλενη, σουλφίδια, ή πολυσοφοφόνη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ορισμένες εφαρμογές.

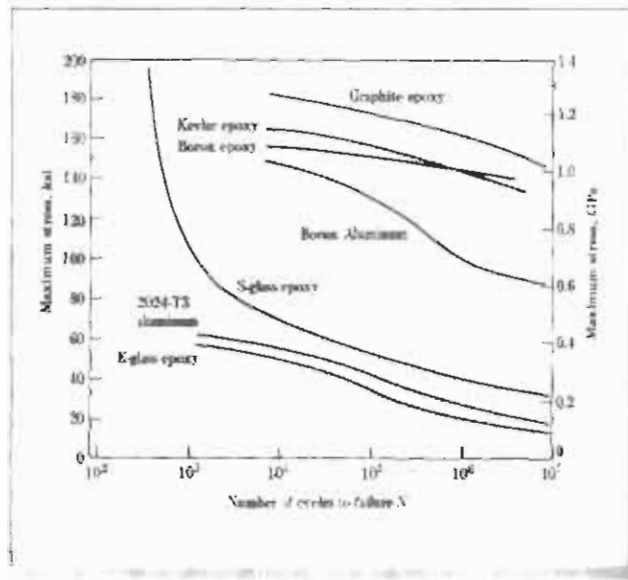
Πίνακας 2-3: Μηχανικές ιδιότητες των συνθετών υλικών από ίνες γυαλιού

	Woven cloth	Chopped roving	Sheet-molding compound
Tensile strength, ksi (MPa)	30–50 (206–344)	15–30 (103–206)	8–20 (55–138)
Tensile modulus of elasticity, Msi (GPa)	1.5–4.5 (103–310)	0.80–2.0 (55–138)	
Impact strength notched bar, Izod ft·lb/in (J/m) of notch	5.0–30 (267–1600)	2.0–20.0 (107–1070)	7.0–22.0 (374–1175)
Density (g/cm ³)	1.5–2.1	1.35–2.30	1.65–2.0

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των ινών άνθρακα είναι ότι έχουν μεγάλη αντοχή στην εφελκυστική δύναμη και μεγάλη ελαστικότητα που συνδυάζεται με τη χαμηλή πυκνότητα όπως βλέπουμε σε πιο πάνω πίνακα. Για αυτόν τον λόγο, τα σύνθετα υλικά ινών άνθρακα αντικαθιστούν τα μέταλλα σε μερικές εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία όπου η αποταμίευση βάρους είναι σημαντική.

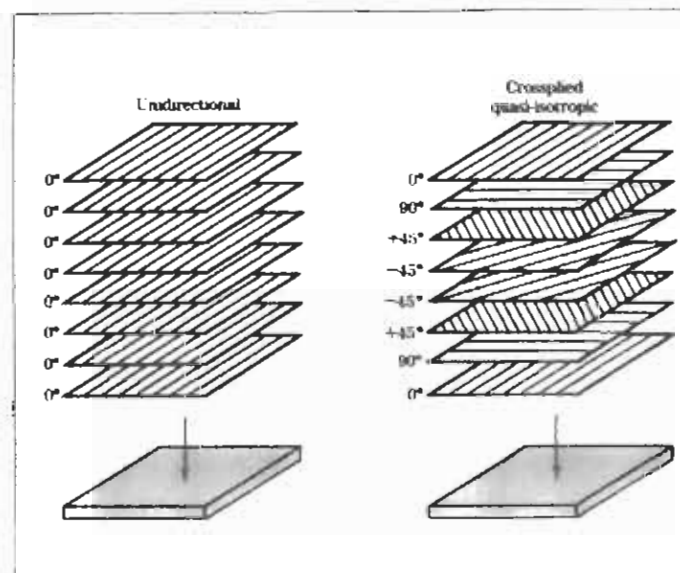
Πίνακας 2-4: Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες ενός εμπορικού μονοαξονικού σύνθετου φύλλου πλαστικού από ίνες άνθρακα (62% από τον όγκο) και εποξικής ρητίνης

Properties	Longitudinal, 0°	Transverse, 90°
Tensile strength, ksi (MPa)	270 (1860)	9.4 (65)
Tensile modulus of elasticity, Msi (GPa)	21 (145)	1.36 (9.4)
Ultimate tensile strain, %	1.2	0.70



Σχ. 2-9: Ιδιότητες κόπωσης του μονοαξονικού εποξικού σύνθετου σε σύγκριση με εκείνες του κράματος αλουμινίου 2024- T3.

Κατά την μηχανική σχεδίαση οι δομές του εποξικού υλικού από ίνες άνθρακα είναι τοποθετημένες σε στρώματα έτσι ώστε οι κατάλληλες απαιτήσεις αντοχής να καλύπτονται όπως φαίνεται στο πιο σχήμα 2-10.

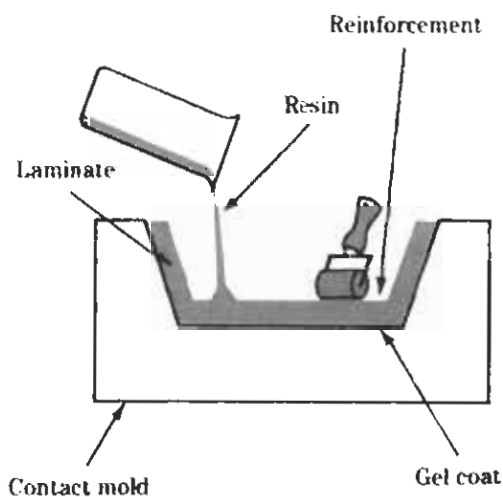


Σχ. 2-10: Ίνες άνθρακα είναι τοποθετημένες σε στρώσεις

2.6 Διαδικασίες ανοικτών καλούπιών για τις ενισχυμένες πλαστικές ίνες σύνθετων υλικών

- Μέθοδος διαψεκασμού
- Μέθοδο απ' ευθείας τοποθέτησης του υλικού στο καλούπι

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι ανοικτών-καλούπιών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των ενισχυμένων πλαστικών ινών. Αυτή είναι η απλούστερη μέθοδος για την παραγωγή μιας ενισχυμένης ίνας. Για την δημιουργία κατασκευών ενίσχυσης από ίνες εφαρμόζεται αρχικά στο ανοικτό καλούπι μια επίστρωση και κατόπι εφαρμόζεται η ρητίνη και οι ίνες.



(α) (β)

Σχ. 2-11: (α) επίστρωση gel στο καλούπι (β) τοποθέτηση ενίσχυσης

Η ενίσχυση ινών γυαλιού υπό μορφή υφάσματος ή χαλιού τοποθετείται με το χέρι στο καλούπι. Η ρητίνη βάσιως που αναμιγνύεται με τους καταλύτες και τους επιταχυντές, εφαρμόζεται με την έκχυση, το βούρτσισμα, ή τον ψεκασμό. Οι κύλινδροι φαίνονται στο σχήμα Σχ2-11(β), χρησιμοποιούνται όταν η ενίσχυση με τη ρητίνη βρίσκεται σε μια ενδιάμεση κατάσταση (δηλαδή το υλικό δεν είναι στερεό ούτε ρευστό) για να αφαιρεθεί ο παγιδευμένος αέρας από το υλικό. Για να αυξήσουμε το πάχος του υλικού, προσθέτουμε στρώματα από ίνες γυαλιού ή ρητίνης. Εφαρμογές

αυτής της μεθόδου περιλαμβάνει επικαλύψεις σκαφών, δεξαμενές, κατοικίες, και επίπεδες επιφάνειες.

Η μέθοδος ψεκασμού για τις πλαστικές ενισχυμένες ίνες σε κέλυφος είναι παρόμοια με τη μέθοδο απ' ευθείας τοποθέτησης του υλικού στο καλούπι και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικαλύψεις σκαφών ή σε μορφές μεγάλου μεγέθους.

Διεργασία εν κενό χυτρών πίεσεως

Στην διαδικασία αυτή όταν αφαιρεθεί ο αέρας και η ρητίνη έρθει σε επαφή με τις ίνες ενίσχυσης μπορούμε να προσθέσουμε πολλαπλάσια στρώματα υλικού για την παραγωγή του επιθυμητού πάχους. Η διαδικασία αυτή γίνεται συνήθως στη θερμοκρασία δωματίου, ή μπορεί να επιταχυνθεί από την εφαρμογή ενός μέτριου ποσού θερμότητας. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για να παράγει υψηλής απόδοσης φύλλα πλαστικού εποξικών συστημάτων. Τα σύνθετα υλικά που παράγονται μ' αυτό τον τρόπο είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την αυτοκινητοβιομηχανία.



Σχ. 2-12: Κατασκευή εποξικού υλικού ενισχυμένο με ίνες άνθρακα

Παρακάτω εξετάζονται τα διάφορα βήματα αυτής της διαδικασίας που απαιτούνται για να παραχθεί το τελειωμένο μέρος. Κατ' αρχάς ένα μακρύ, λεπτό φύλλο, εποξικού υλικού ενισχυμένο με ίνες άνθρακα που έχει μήκος περίπου 60 εκατ., σχεδιάζεται σε έναν μεγάλο πίνακα.

Το υλικό prepreg αποτελείται από μακριές ίνες άνθρακα όμοια κατευθυνόμενες σε εποξική ρητίνη. Έπειτα, τα κομμάτια του φύλλου prepreg αποκόβονται και τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο σε ένα ειδικά διαμορφωμένο εργαλείο για να δημιουργήσουν ένα φύλλο πλαστικού. Τα στρώματα, ή οι στρώσεις αλλιώς, μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις για να παράγουν την επιθυμητή αντοχή, δεδομένου ότι η υψηλότερη αντοχή κάθε στρώσης είναι παράλληλη στην κατεύθυνση των ινών.

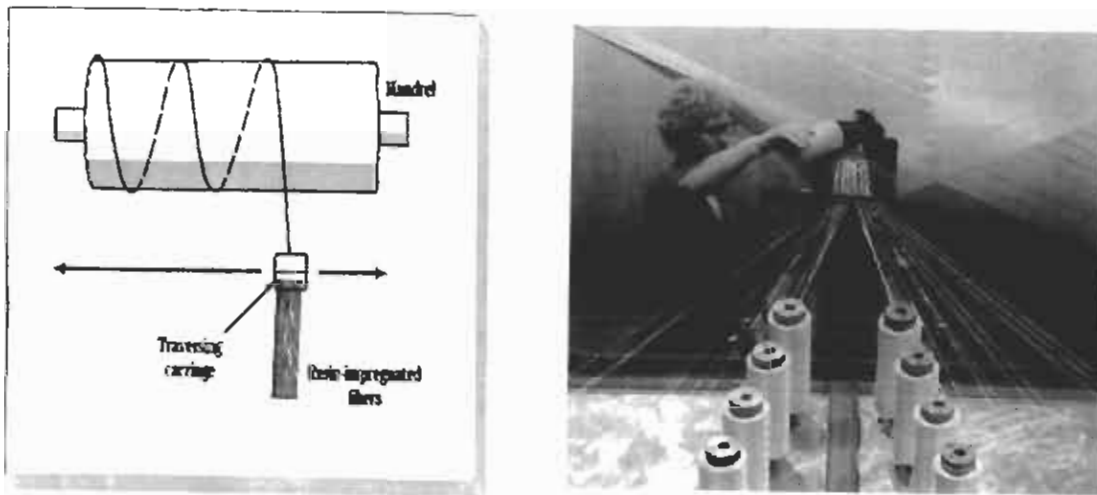
Αφότου κατασκευαστεί το φύλλο από πλαστικό, η σχεδίαση και το συνημμένο φύλλο από πλαστικό τοποθετούνται σε ένα σάκο, με κενό, που εφαρμόζεται για να αφαιρέσει τον παγιδευμένο αέρα. Τέλος, η κενή θήκη που εσφικλείει το φύλλο από πλαστικό και τη σχεδίαση τοποθετούνται σε μια χύτρα πίεσης για την τελική επεξεργασία της εποξικής ρητίνης. Οι όροι ποικίλλουν ανάλογα με το υλικό, αλλά το εποξικό σύνθετο υλικό ενισχυμένο από ίνες άνθρακα θερμαίνεται συνήθως στους 190°C και σε μια πίεση περίπου 100 PSI. Μετά την αφαίρεση του από τη χύτρα πίεσης.

Διαδικασία τυλίγματος της ίνας

Τα εποξικά σύνθετα υλικά ενισχυμένα από ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται κυρίως στην αεροδιαστημική βιομηχανία όπου η υψηλή αντοχή, η ακαμψία, και η ελαφρότητα του υλικού μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλήρως. Παραδείγματος χάριν, αυτό το υλικό χρησιμοποιείται για τα φτερά αεροπλάνων, τα μέρη ανελκυστήρων και πηδαλίων, και τις πόρτες κόλπων φορτίου του διαστημικού οχήματος συχνών δρομολογίων. Οι εκτιμήσεις των δαπανών έχουν αποτρέψει τη διαδεδομένη χρήση αυτού του υλικού στην αυτόματη βιομηχανία.

Μια άλλη σημαντική διαδικασία ανοικτών-καλουπιών για να παράγει τους υψηλής αντοχής κοίλους κυλίνδρους είναι η διαδικασία τυλίγματος της ίνας. Σε

αυτήν την διαδικασία η ενίσχυση των ινών γίνεται μέσω ενός λουτρού ρητίνης και τυλίγεται σε ένα κατάλληλο κύλινδρο.

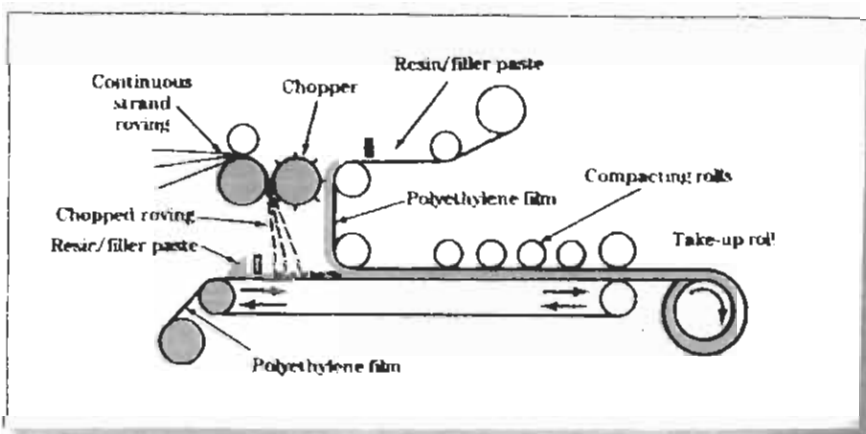


Σχ. 2-13: Διαδικασία τολήματος της ίνας

Ο υψηλός βαθμός προσανατολισμού των ινών και η υψηλή φόρτωση των ινών με αυτήν την μέθοδο, παράγουν τις εξαιρετικά υψηλές έκτατες αντοχές στους κοίλους κυλίνδρους. Οι εφαρμογές αυτής της διαδικασίας περιλαμβάνουν τη χημική ουσία που τροφοδοτεί τις δεξαμενές αποθήκευσης, τα σκάφη πίεσεως, και τις μηχανές πυραύλων .

2.7 Διαδικασίες κλειστών καλουπιών για τα σύνθετα πλαστικά υλικά ενισχυμένα από ίνες άνθρακα

➤ Συμπύεση και έγχυση



Σχ. 2-14: Η σύνθετη (SMC) διαδικασία σχηματοποίησης φύλλου

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι κλειστών καλουπιών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των πλαστικών υλικών ενισχυμένων από ίνες άνθρακα. Μερικές από αυτές τις μεθόδους θα συζητηθούν τώρα εν συντομία.

Αυτές είναι δύο από τις σημαντικότερες διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πλαστικών υλικών ενισχυμένων από ίνες σε κλειστά καλούπια. Αυτές οι διαδικασίες είναι ουσιαστικά οι ίδιες με εκείνες που συζητήθηκαν προηγουμένως για τα πλαστικά υλικά με την διαφορά ότι η ίνα αναμιγνύεται με τη ρητίνη πριν από την επεξεργασία.

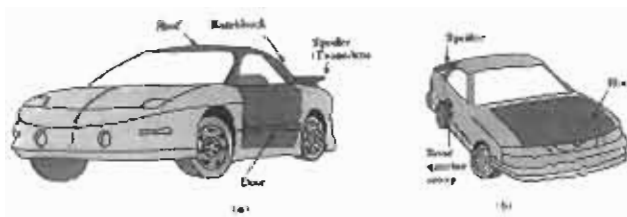
Η διαδικασία SMC⁵ είναι μια από τις νεώτερες διαδικασίες κλειστών καλουπιών που χρησιμοποιούνται για να παραχθούν τα πλαστικά μέρη τα οποία είναι ενισχυμένα από ίνες, ιδιαίτερα στην αυτοκινητοβιομηχανία. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τον άριστο έλεγχο της ρητίνης και τις καλές μηχανικές ιδιότητες δύναμης προκειμένου να παραχθεί η υψηλή ένταση, το μεγάλο μέγεθος, και τα ομοιόμορφα προϊόντα.

Η πλαστική μεμβράνη κατασκευάζεται συνήθως με μια ιδιαίτερα αυτοματοποιημένη συνεχούς ροής διαδικασία. Η περιέλιξη υαλονημάτων, τεμαχίζεται σε μήκος 5,0 εκατ. και τοποθετείται σε ένα στρώμα ρητίνης που βρίσκεται σε μια μεμβράνη πολυαιθυλενίου. Ένα άλλο στρώμα ρητίνης τοποθετείται αργότερα μακριά από το πρώτο, για να διαμορφώσει ένα συνεχές πολύστρωτο υλικού πληρώσεως υαλονημάτων και ρητίνης. Το πολύστρωτο εφόσον έχει καλύψει τις κορυφές και τα κατώτατα σημεία του πολυαιθυλενίου συμπιέζεται και κυλιέται στους συσκευασμένους και τιξινομημένους κυλίνδρους. Το κυλιόμενο επάνω SMC αποθηκεύεται έπειτα σε ένα δωμάτιο ωρίμανσης για περίπου 1 έως 4 ημέρες έτσι ώστε το φύλλο να μπορεί να φέρει το γυαλί. Οι κύλινδροι SMC κινούνται έπειτα προς το τυπογραφείο και την περικοπή του κατάλληλου σχεδίου σε θερμοκρασία 149°C. Ο υδραυλικός τύπος είναι κλειστός, και οι ροές SMC κινούνται ομοιόμορφα σε πίεση (1000 PSI) σε όλα τα καλούπια για να διαμορφωθεί το τελικό προϊόν.

⁵ Το SMC είναι μια ίνα ενισχυμένου σύνθετου υλικού που αποτελείται από την θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, την ενίσχυση ινών γυαλιού και το υλικό πληρώσεως.

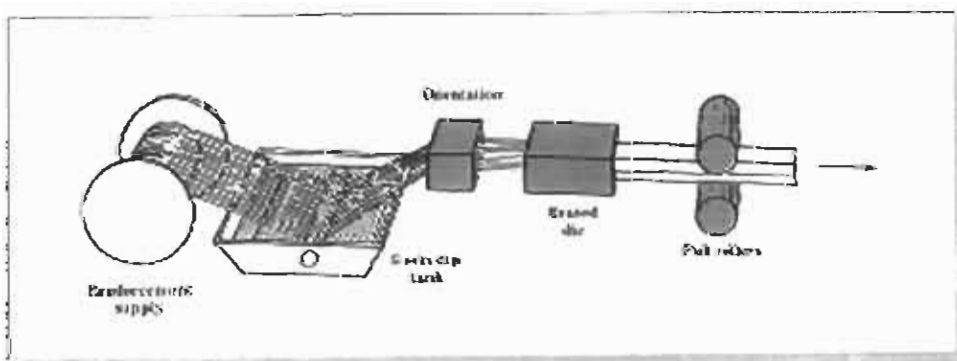
Συνεχής διαδικασία.

Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας SMC πέρα από την χειρονακτική διαδικασία ή τη διαδικασία διαψεκασμού έχει αποδοτική παραγωγή, βελτιωμένη ποιότητα επιφάνειας, και ομοιομορφία του προϊόντος. Η χρήση SMC είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα στη αυτοκίνητη βιομηχανία για την παραγωγή τμημάτων του αυτοκινήτου. Παραδείγματος χάριν, η στέγη, οι πόρτες, και το spoiler της Chevrolet Camaro είναι κατασκευασμένα από φύλλο αυτής της ένωσης.



Σχ. 2-15: Χρήση SMC στη αυτοκίνητη βιομηχανία

Συνεχής διέλαση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των πλαστικών ενισχυμένων υλικών από ίνες όπως οι δομικές κατασκευές, ακτίνες, κανάλια, σωλήνες. Σε αυτή την διαδικασία οι ίνες γονιμοποιούνται σε ένα λουτρό ρητίνης και έπειτα σύρονται μέσω ενός θερμαμένου κύβου χάλυβα που καθορίζει τη μορφή του τελειωμένου αποθέματος με αποτέλεσμα το υλικό να έχει υψηλή συγκέντρωση και καθορίζει τον προσανατολισμό των ινών παράλληλων στο μήκος της σχεδιασμού του αποθέματος.



Σχ. 2-16: Διαδικασία για την κατασκευή πλαστικών ενισχυμένων υλικών

- **Διεργασίες Παραγωγής Πλαστικών**

Η βιομηχανία πλαστικών τα τελευταία χρόνια έχει μεγάλη ανάπτυξη, λόγω της ποικιλίας ρητινών παρασκευαζόμενες με διάφορες διεργασίες παραγωγής, και τα πλαστικά έχουν γίνει τόσο ανταγωνιστικά σε σύγκριση με άλλα συμβατικά υλικά τα οποία βρίσκονται τώρα στις περισσότερες εφαρμογές. Οι σχεδιαστές μηχανολογικών εφαρμογών αναπτύσσουν νέα υλικά μικρά σε βάρος με μεγάλη αντοχή που επιτρέπουν τη βελτιωμένη ικανότητα διαμόρφωσης διαφόρων σύνθετων υλικών με πλαστικές ρητίνες, ενισχυμένα με ίνες και πολλακίς ως πολύστρωτα υλικά.

Η ευφυής διεργασία παραγωγής των υλικών (IPNI) περιλαμβάνει την τοποθέτηση αισθητήρων “μη καταστρεπτικής αξιολόγησης” (Non Destructive Evaluation, NDE) στις συσκευές επεξεργασίας για να επιτρέψει τον έλεγχο και προσαρμοστικός έλεγχος (μίγματα, θερμοκρασίες, πιέσεις, κλπ, προσαρμοζόμενους σε “πραγματικούς χρόνους” κατά τη διάρκεια της παραγωγής) για να ελέγξει τις σύνθετες μεταβλητές που προσαρμόζονται στο σύνθετο πρότυπο παραγωγής. Επίσης η ανωτέρω διεργασία παραγωγής οδηγεί στην συνολική ποιοτική διαχείριση (Total Quality Management, TQM) και στον στατιστικό έλεγχο διεργασίας (SPC), τεχνικές που συνδέονται με τη βελτιωμένη ποιότητα στην κατασκευή των προϊόντων και μειωμένα απόβλητα και γενικές δαπάνες. Η παγκόσμια ανταγωνιστικότητα οδηγεί σε βελτιωμένες επεξεργασίας στην παραγωγή κεραμικών υλικών και στα μέταλλα.

Οι μηχανικοί παραγωγής για την παραγωγή νέων προϊόντων, απαιτεί την συνεργασία των σχεδιαστών, μηχανικών υλικών και τους τεχνίτες. Οι σχεδιαστές σε όλα τα στάδια παραγωγής παρέχουν τις κατάλληλες γνώσεις για την βελτίωση των υλικών. Η απαίτηση για γρήγορη παραγωγή των υλικών από τον σχεδιασμό μέχρι την υλοποίηση του τελικού προϊόντος είναι συχνά συνδεδεμένη με πλαστικά προϊόντα μικρής ποσότητας. Νέα υλικά είναι συνδεδεμένα με την παραγωγή νέων ρητινών.

Τα **θερμοσκληρυνόμενα** (Thermosetting, TS) πλαστικά παράγονται με χύτευση, ψεκασμός, με πρέσες, και σε μηχανές έγχυσης (RINI) (Σχ. 2-17). Επειδή τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά δεν αναδημιουργούνται με θέρμανση είναι ακατάλληλα για την ανακύκλωση εκτός αν χρησιμοποιηθούν για υλικά πληρώσεως.

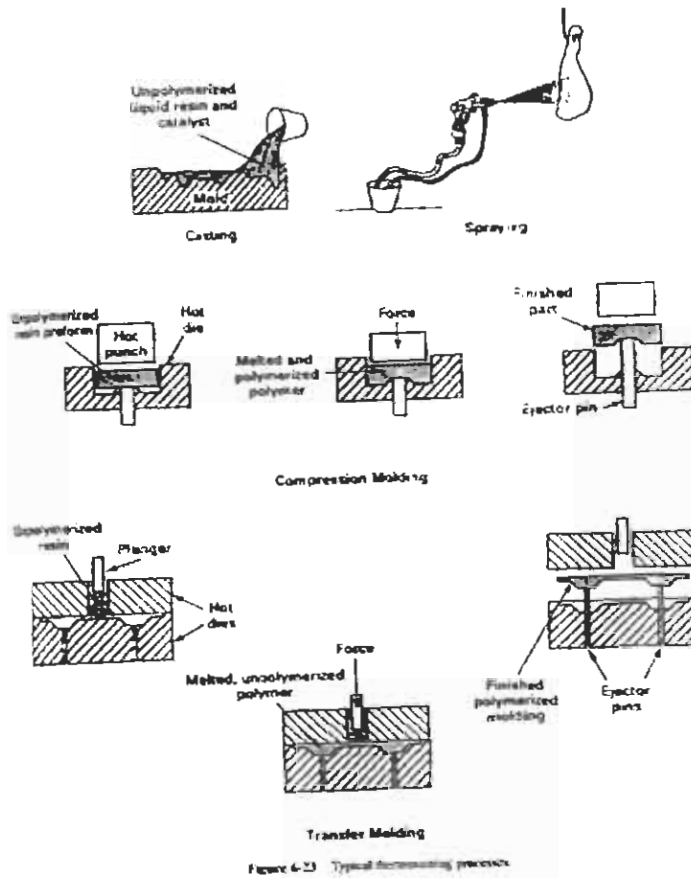
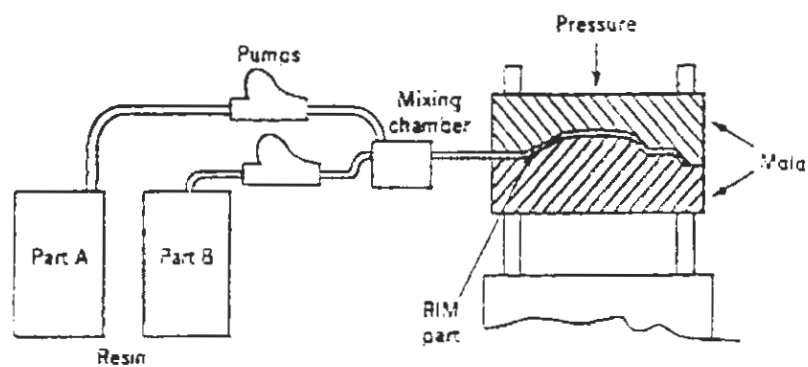


Figure 4-23 Typical thermosetting processes

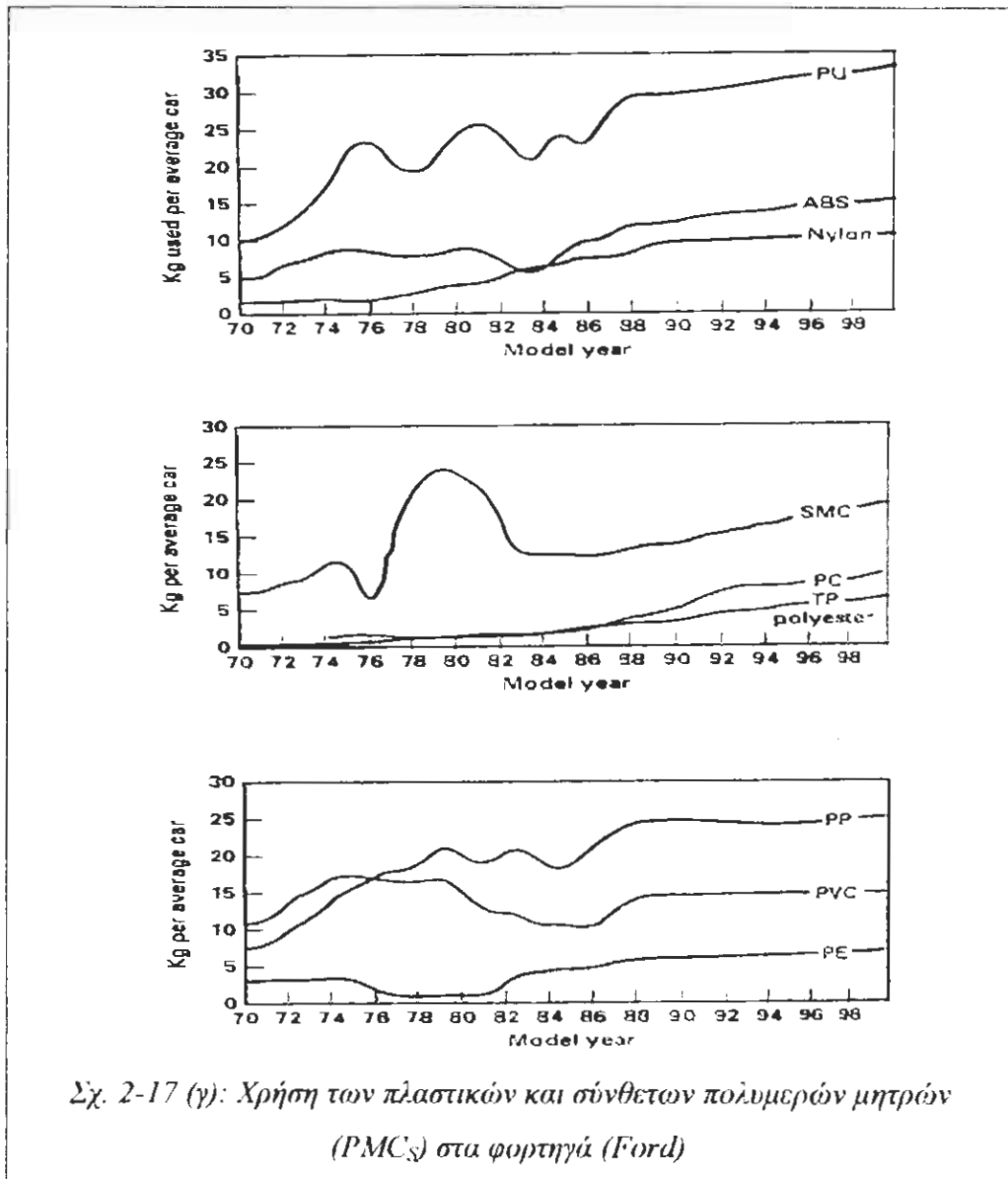
Σχ. 2-17: (α) Τυπική διαδικασία παραγωγής θερμοσκληραινόμενων υλικών (σχηματοποίηση υπό πίεση & με μεταφορά)



Σχ. 2-17: (β) Τυπική διαδικασία παραγωγής θερμοσκληρυνόμενων υλικών (σχηματοποίηση με συνεχόμενη διαδικασία)

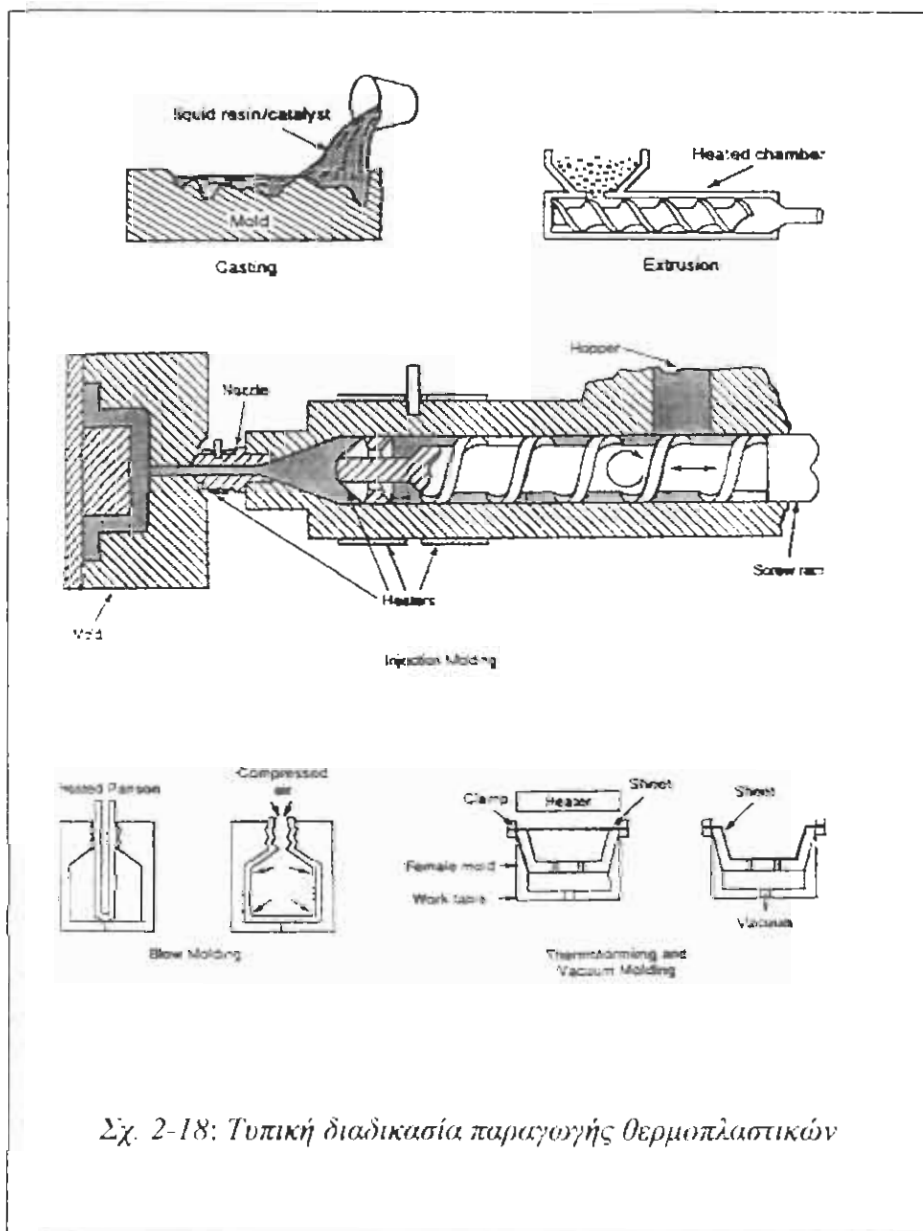
Τα **θερμοπλαστικά** (Thermoplastic, TP) ανακυκλώνονται πιο εύκολα και μπορούμε να χρησιμοποιηθούν εκ νέου σε περισσότερες εφαρμογές. Υγρά πολυμερή

σώματα κρυστάλλου (LCPs) είναι μια νεότερη κατηγορία που περιλαμβάνει τους αρωματικούς πολυεστέρες φαινυλίου και πολυαμιδίου LCPs.



Τα τελικά παραγόμενα αντικείμενα πολυμερή υγρών κρυστάλλων (L.C.P.) κατέχουν ανισοτροπικές ιδιότητες με χημική και θερμική ευστάθεια στις θερμοκρασίες λειτουργίας μέχρι και 190°C. Κατά παρόμοιο τρόπο με το ξύλο, το οποίο αποτελείται από ίνες κυτταρίνης που έχουν μεγάλη αντοχή σε τάσης και τα μόρια LCP σχήματος ράβδου παρέχουν ενίσχυση από μόνα τους. Η πολυεστερική ρητίνη με την ονομασία, Amoco's Xydar LCP, αντιπροσωπεύει τα νεότερα "θερμοπλαστικά" υλικά, τα όποια μπορούν να παραχθούν σε σύνθετες μορφές με την διαδικασία έγχυσης και σχηματοποίησης. Το υλικό Xydar έχει αντοχή στην θερμότητα μέχρι και 350°C και

εφελκιστική τάση 115 MPa, κατάλληλα για εξαρτήματα με εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το υλικό ICPs μπορεί να αντικαταστήσει τα κεραμικά που χρησιμοποιούνται για την χημική επεξεργασία υλικών και βρίσκει εφαρμογές στα πλαστικά., συμπεριλαμβανομένων ρακετών αντισφαίρισης, ηλεκτρικούς μονωτές κινητήρων, και τυποποιημένους πίνακες κυκλωμάτων επάνω στους οποίους τα συστατικά τοποθετούνται επιφανειακά. Το ICP μπορεί να αντέξει σε θερμοκρασίες 40°C υψηλότερες από το σημείο τήξης του υλικού συγκόλλησης.

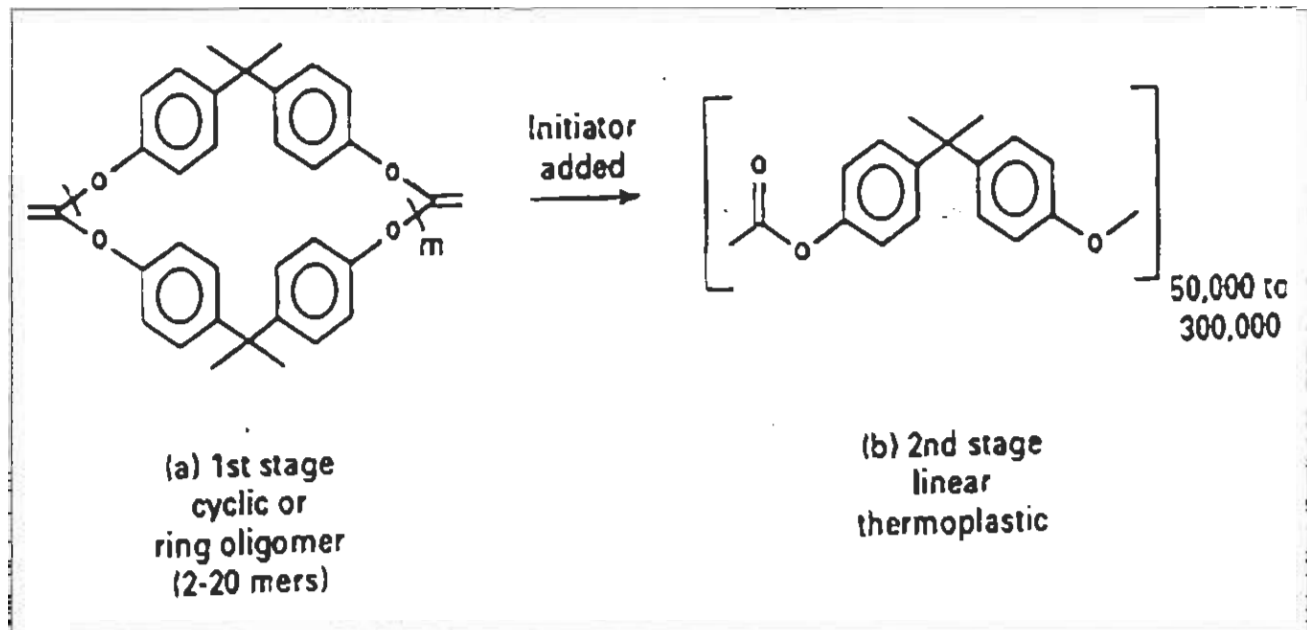


Σχ. 2-18: Τυπική διαδικασία παραγωγής θερμοπλαστικών

Τα **θερμοπλαστικά** επεξεργάζονται σε καλούπια με χύτευση, με έγχυση, με εξέλαση, με διαμόρφωση εν θερμό καλούπι, με κύλιση, με περιστροφική σχηματοποίηση, με σχηματοποίηση μεταφοράς ρητίνης (RTM), με άφρισμα και περιστροφή (Σχ.2-18). Λόγω της δυνατότητας μυλάκωσης με θέρμανσης τα ανακυκλωμένα υλικά μπορούν συχνά να τεθούν εκ νέου στη διαδικασία παραγωγής.

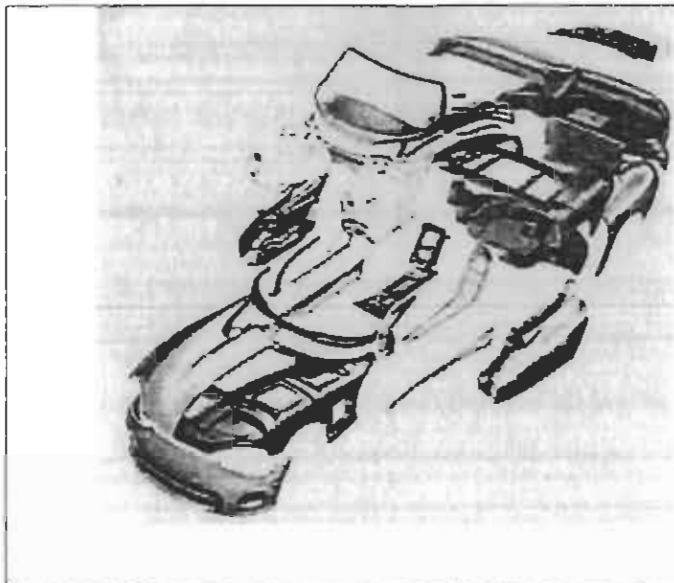
Τα **ανακυκλωμένα θερμοπλαστικά** πολυμερή, βελτιώθηκαν προς το τέλος της δεκαετίας του '80 από την εταιρεία General Eclectic (GE), η οποία παρείχε μια σημαντική ανακάλυψη για την αυτοκινητοβιομηχανία, η όποια έψαχνε για ένα θερμοπλαστικό υλικό χαμηλού ιξώδους που θα μπορούσε εύκολα να παράγει δομικά σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες. Το τελικό ενισχυμένο με ίνες υλικό (FRP) είχε τις ίδιες ιδιότητες με το χάλυβα, με ένα τρίτο περίπου σε βάρος για να παρέχει σημαντικά αποτελέσματα στην αποδοτικότητα των καυσίμων στα αυτοκίνητα. Επίδειξη δυνατότητας πραγματοποίησης αυτού του υλικού από το πρόγραμμα προηγμένης τεχνολογίας, η εταιρεία GE Ford Motor και η επιχείρηση NIST ως τμήμα της κοινοπραξίας των τριών μεγαλύτερων αυτοκινητοβιομηχανιών, δηλ. μια σύνθετη κοινοπραξία (ACC), η όποια επιδίωξε να βελτιώσει την παγκόσμια ανταγωνιστικότητα κατασκευαστών αυτοκινήτων. Για πρώτη φορά, η πρόοδος αυτή στην τεχνολογία ανακυκλωμένων πολυμερών έκανε κατάλληλη τη χρήση θερμοπλαστικών υλικών στις εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων αυτοκίνητα με χαμηλότερο κόστος στην παραγωγή πολυμερικών υλικών με την τεχνολογία μεταφοράς ρητίνης (RTM) σε καλούπια.

Για να σχηματίσουμε μια θερμοπλαστική ρητίνη ενός πολυάνθρακούμενου πολυμερούς το οποίο χρησιμοποιείται για την γονιμοποίηση ινών μέσα στο καλούπι ακολουθούνται δύο στάδια πολυμερισμού. Αρχικά, δημιουργείται ένα *ολιγομερές* από 2-20 μονομερή σε μορφή δακτυλίων ρητίνης χαμηλού ιξώδους η οποία ρέει εύκολα μέσα στο καλούπι. Κατόπιν προστίθεται ένας κατάλληλος καταλύτης για να σχηματιστεί μια γραμμική αλυσίδα πολυμερούς. Ο πολυμερικός δακτύλιος που παρουσιάζεται στο Σχ. 2-19 (α) και (β) με χαμηλό ιξώδες κάτω από θερμοκρασία 300°C, ρέει όπως το ύδωρ γύρω από το ενισχυμένο πολυμερές.



Σχ. 2-19 (α)&(β): Βήματα στην παραγωγή Α-φαινολικού - Α- υδρογονάνθρακα

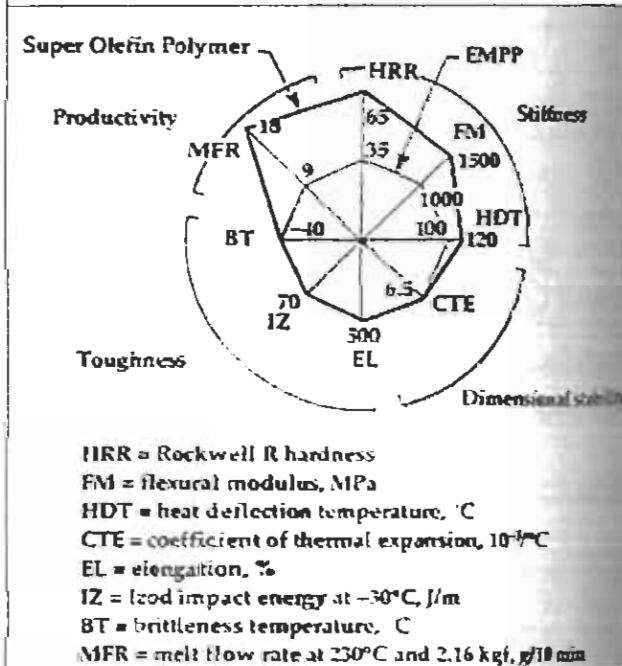
Επί πλέον στην άριστη αντίσταση σε αστοχία και τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά διαδικασιών παραγωγής, το πολυεστερικό υλικό προσφέρει άριστη αντίσταση στους κοινούς κοινά διαλύματα που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα π.χ. βενζίνη και υγρά φρένων. Αυτός το πολυκαρμπονικό υλικό είναι επίσης οικολογικός επειδή δεν εκπέμπει τα πτητικά αμετάβλητα υποπροϊόντα, ο πολυμερισμός συμπύκνωσης προσφέρει τις ευκαιρίες ανακύκλωσης επειδή είναι *θερμοπλαστικό*. Σαν παράδειγμα το υλικό RTM εφαρμόζεται στην αυτοβιομηχανία [Σχ.2 20(α) & (β)]. Η εταιρεία Chrysler επέλεξε ρητίνες για την κατασκευή του αθλητικού αυτοκινήτου επειδή πρόσφερε +40% αποταμίευση βάρους πέρα από τα χαλύβδινα φύλλα, με μειωμένο χρόνο σχεδίασης και δαπάνες σχεδίασης. Συγκρινόμενα, τα σύνθετα φύλλα (SMC) με τα υλικά RTM παρέχουν ελαφρότερα και ισχυρότερα πανέλλα σε χαμηλότερες συνθήκες πίεσης σχηματισμού με το μικρότερο κόστος παραγωγής. Τα υλικά RTM παρέχουν τα τελειότερα βιομηχανικά προϊόντα.



Σχ. 2-20: (α) Το Dodge Viper ήταν ένα πείραμα στις νέες τεχνολογίες περιλαμβάνοντας παράλληλα εφαρμοσμένη μηχανική, παραγωγή μικρής έντασης και ερευνάς ενιαίος σχεδιασμός και χρησιμοποίηση ενός πλήθους υλικών με παράλληλες διαδικαστικές καινοτομίες



Σχ.2-20: (β) Μια ολοκληρωμένη άποψη του Dodge Viper δείχνει τα πλαστικά πλαίσια (RTM) σε πλειοψηφία των εξωτερικών και εσωτερικών τμημάτων. Μόνο το κατώτερο εξωτερικό μπροστινό τμήμα χρησιμοποιεί SMC



Σχ.2-20: (γ) Κύρια πλεονεκτήματα του Super Olefin Polymer έναντι των συμβατικών EMPP παρουσιάζονται σ' αυτό το διάγραμμα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις τιμές ανθεκτικότητας, ευθραυστότητας, θερμοκρασίας, δύναμη κρούσης και επιμήκυνσης.

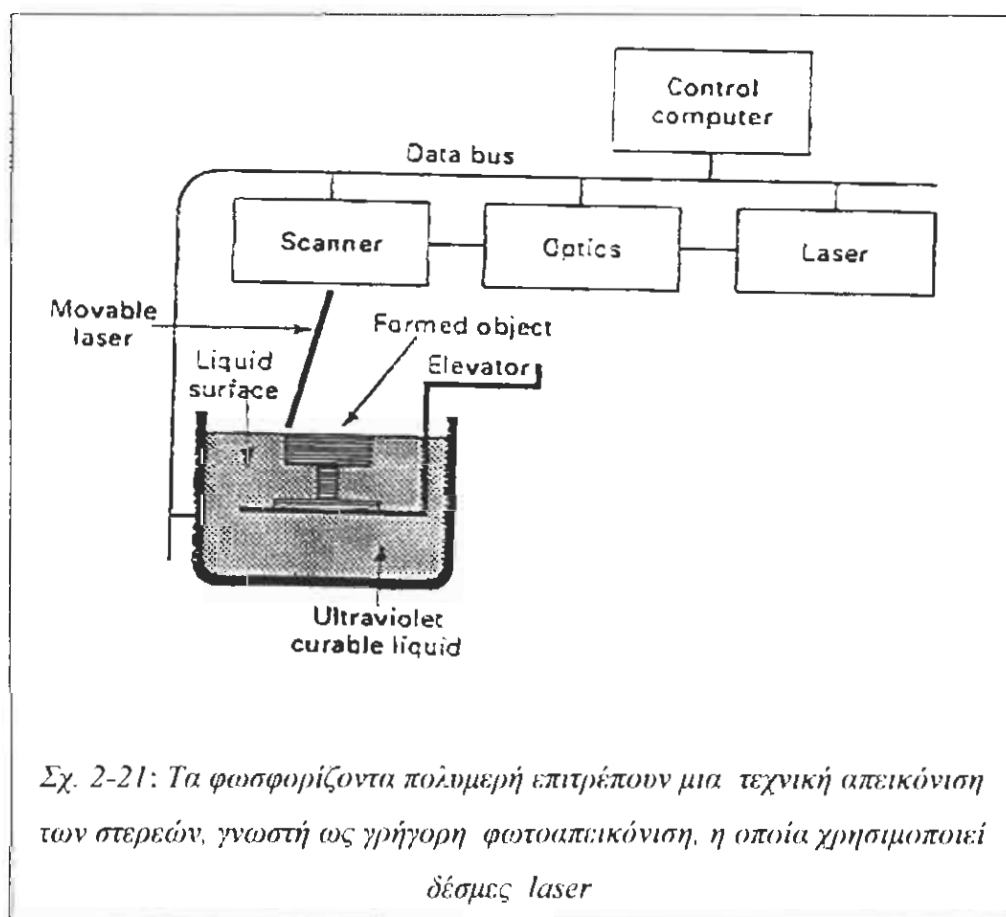
Εφαρμόζοντας νέας τεχνολογίας υλικά που συνδυάζουν ανάλυση νέας τεχνολογίας, π.χ. 'απεικόνιση μαγνητικής αντίχησης' (MRI) με τη δυνατότητα των υλικών για εφαρμογές στη μηχανολογία μπορούν να οδηγήσουν σε αξιόλογες καινοτομίες από την σκοπιά του σχεδιασμού και της παραγωγής. Παραδείγματος χάριν, οι μηχανικοί της TOYOTA έχουν παράγει ένα νέο προϊόν πολυμερές από ολεφίνες ως αποτέλεσμα της απαίτησης να αλλάξουν τις προφυλακτικές των αυτοκινήτων που παράγονται από συμβατικά υλικά σε τροποποιημένο ελαστομερές πολυπροπυλενίου (EMPP). Το Σχ. 2-20 (γ), παρέχει σύγκριση των δύο τροποποιημένων πολυμερών. Το εσωτερικό οκτάγωνο είναι το υλικό EMPP και το εξωτερικό πολύγωνο απεικονίζει τις βελτιωμένες ιδιότητες του πολυμερούς από ολεφίνες. Το υλικό EMPP είναι ένα μίγμα του πολυπροπυλενίου (PP) και το ελαστομερές από αιθυλοπροπυλένιο & (EPR). Το νέο πολυμερές που ανέπτυξε η εταιρία TOYOTA είναι κατασκευασμένο από ένα πολυμερές με βελτιωμένο μέτρο δυσκαμψίας, και σκληρότητα άνω των συμβατικών EMPP, διατηρώντας σταθερό το συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE) και υψηλή αντίσταση σε κρούση σε θερμοκρασία -30°C (-20°F) και χαμηλότερες. Για την παραγωγή του σύνθετου πολυμερούς χρησιμοποιήθηκε ένα EPR με ελαστομερική ρητίνη για να παρέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την παραγωγή των προφυλακτικών:

- a) Διατηρεί αντίσταση σε κρούση σε χαμηλές θερμοκρασίες και χαμηλό CTE.
- b) Εισάγει σκληρά τμήματα στην EPR φάση για να αυξήσει την σκληρότητα, αντοχή και δυσκαμψία, τα οποία σχηματίζουν ένα δικτύωμα μέσα στο υλικό.
- c) Μειώνει το μοριακό βάρος και μεγιστοποιεί την κρυσταλλική μορφή του υλικού PP για να το μέτρο ροής του ρευστού και την σκληρότητα.
- d) Ενισχύει το σχηματισμό της δομής με τον έλεγχο της κρυστάλλωσής του καθώς επίσης και το κρυσταλλική δομή του PP (πολυπροπυλενίου).
- e) Επέτυχε ένα ανακυκλώσιμο συστατικό πολυμερισμού.

Ο πίνακας αποκαλύπτει τις δραματικές βελτιώσεις του υλικού

	<i>Super Olefin Polymer</i>	<i>EMPP</i>
Πάχος τοιχωμάτων (mm)	3.8	4.8
Βάρος λωρίδων, kg/car	6.8	8.7
Ο χρόνος σχηματοποίησης (sec)	85	115
Σχετικό κόστος παραγωγής	89	100
Θερμοκρασία σχηματοποίησης ($^{\circ}\text{C}$)	210	230

Επειδή τα πλαστικά έχουν προσφέρει πάρα πολλά στους σχεδιαστές νέες διεργασίες σε συνδυασμό με βελτιωμένες ρητίνες συνεχίζουν να έρχονται στην αγορά. Μια άλλη ανακάλυψη στην διεργασία παραγωγής πλαστικών, *σταθερού ειδώλου* είναι η χρήση των lasers για να πολυμερίσει τα πλαστικά για διεργασίες καθαρού σχήματος (βλ. Σχ. 2-21). Τα φωσφορώδη πλαστικά είναι βασικά μονομερή ακριλικά και ολιγομερή και έχουν εφαρμοστεί κυρίως στις βιομηχανικές εφαρμογές, π.χ. στα μελάνια εκτύπωσης για επικαλύψεις, και για παραγωγή των ολογραμμάτων.



Σαν μια τεχνική γρήγορης φωτοτύπωσης UV ακτίνες λέιζερ ακολουθούν πορείες που παράγονται με τη βοήθεια υπολογιστικού σχεδιασμού (CAD) για να δημιουργήσει τα στερεά μέρη στρώμα-στρώμα καθώς το λέιζερ πολυμερίζει τη ρητίνη.

Διάφορα μέρη μπορούν να ανιχνευθούν με την τομογραφία υπολογιστών για να παραγάγουν ένα αρχείο CAD. Τα στοιχεία CAD μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το λογισμικό της διαμόρφωσης στερεοποίησης για να καθοριστεί η καλύτερη μέθοδος για

την παραγωγή εργαλείων. Ο γρήγορος εξοπλισμός διαμόρφωσης ενός πρωτοτύπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ένα σχέδιο, ενώ η υπολογιστική τομογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει το εργαλείο ή το εξάρτημα που παράγεται. Επίσης μια ακόμα ελπιδοφόρος τεχνική για τα πλαστικά είναι η τεχνική laser ελεύθερων ηλεκτρονίων (free electron laser).



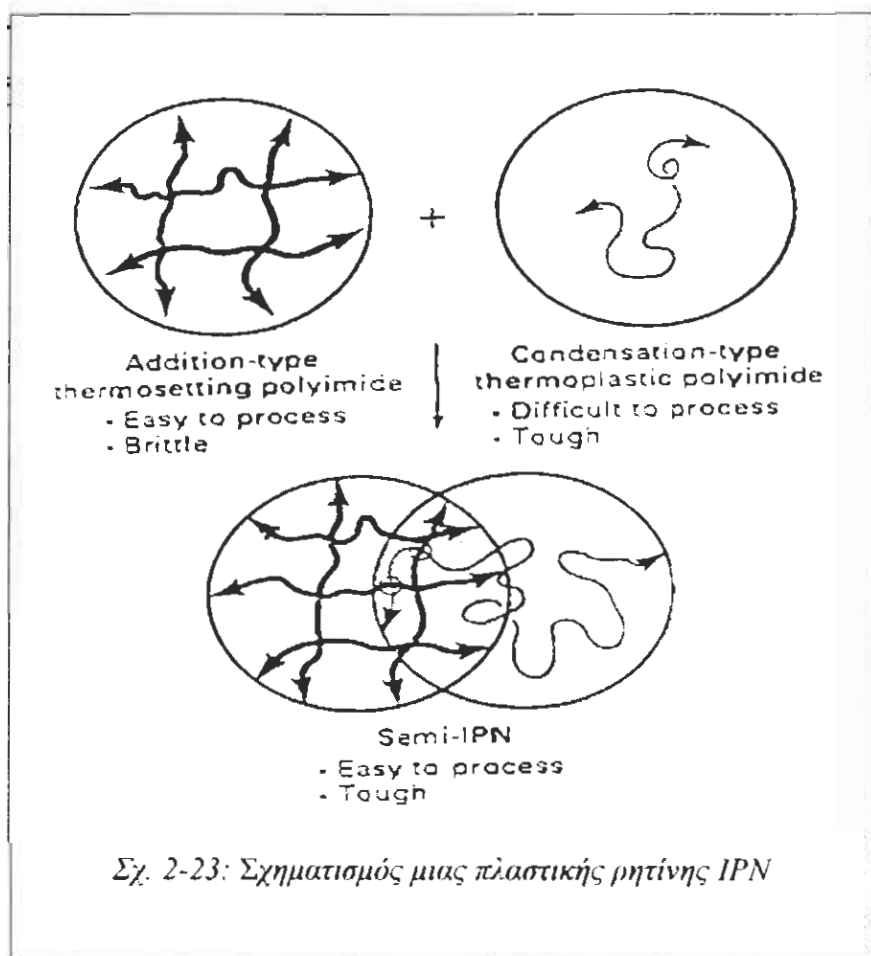
Σχ. 2-22: Σφαιρικές ή διαμορφωμένα σε ράβδους μικρές δομές.

Μια άλλη νέα κατηγορία⁶ *ολιγομερών* είναι αυτή που φαίνεται στο Σχ. 2-22, στο οποίο σφαιρικές ή διαμορφωμένα σε ράβδους μικρές δομές οδηγούν σε ευκολότερη ανάπτυξη πλαστικών με επιθυμητές ιδιότητες. Προσφέρουν τη δυνατότητα για καλύτερη προστασία των επιστρωμάτων, συγκολλητικές ικανότητες, αγωγή πολυμερή, λειωντικά και για ενισχυτές σύνθετων υλικών με πολυμερική ρητίνη.

Τα πλαστικά τύπου (Interpenetrating Polyamide Network, IPN) αντιπροσωπεύουν τα θερμοσκληρυνόμενα (TS) και θερμοπλαστικά (TP) υλικά. Η έρευνα στα εργαστήρια της NASA έχει αναπτύξει ένα σκληρό, υψηλής θερμοκρασίας πολυαμίδιο που αντιστέκεται στην μικροδιάσπωση των υδρογονανθράκων. Η *καθαρή ρητίνη* IPN (χωρίς προσθετικά ή προσμίξεις) δημιουργεί μία πολύτιμη συνθετική μήτρα, με ενίσχυση από γραφίτη, κατάλληλη για τις μηχανές αεροσκαφών και για αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Συνδυάζοντας πολυαμίδια με διασταυρωμένους (TS) και γραμμικούς δεσμούς (TP) (Σχ. 2-23), διατηρείται η

⁶ George R. Newkome, University of South Florida

ευκολία της διαδικασίας TS καθώς έχει επιτευχθεί η ανθεκτικότητα της TP.



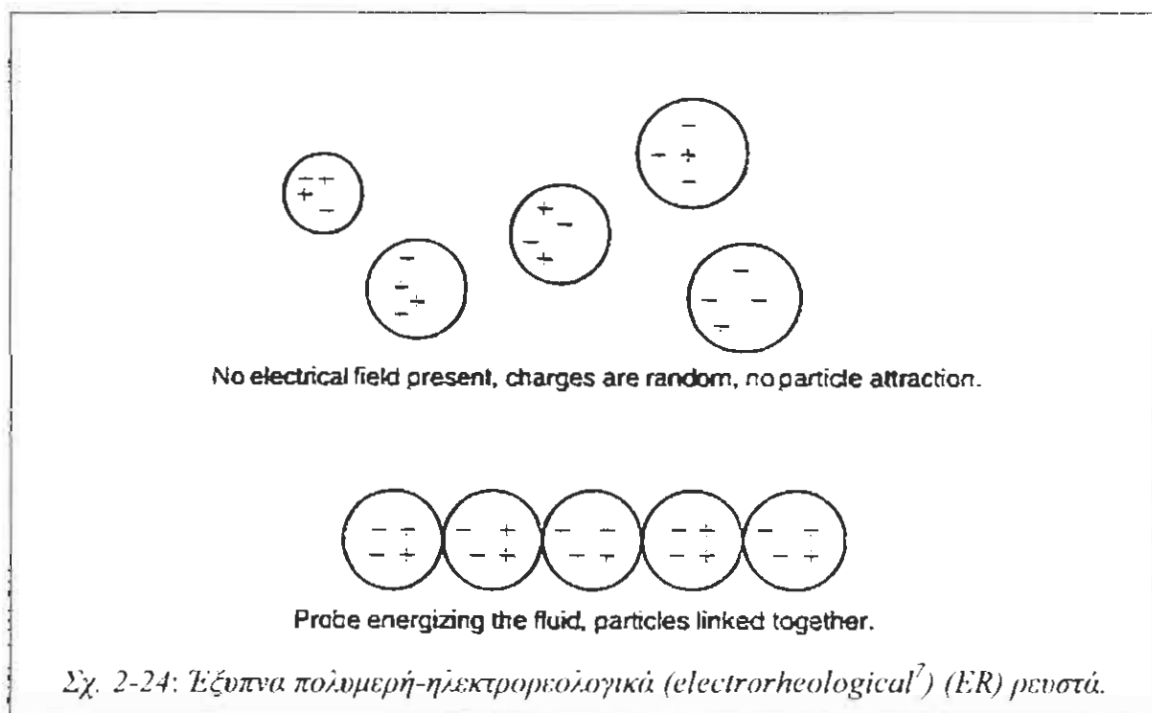
Τα συμπολυμερή είναι επίσης χρήσιμα ως σύνθετες μήτρες λόγω της δυνατότητάς τους να συνδυάσουν την ακαμψία ενός πλαστικού με την ανθεκτικότητα ενός ελαστομερούς. Ένα παράδειγμα αυτής της σύμπραξης είναι με την πλαστική-ρητινή πολυεστέρα, η οποία παρέχει *ακαμψία* σ' ένα τμήμα συμπολυμερούς μ' ένα ελαστομερές *πολυισοπρένιο* (polyisoprene) που κατέχει μεγάλη *ακαμψία*.

- **Ευφύη πολυμερή υλικά**

Επειδή οι χημικοί που ασχολούνται με τα πολυμερή μπορούν να συνθέσουν ένα ευρύ φάσμα από οργανικά πολυμερή, πολλές δυνατότητες εφαρμογής των *έξυπνων πολυμερών* πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον. Σύγχρονα παραδείγματα *έξυπνων πολυμερών* σωματίων περιέχονται πολυβαθμικά και συνθετικά λάδια λίπανσης. Το A 10W40 SAE λάδι μηχανών με την αύξηση της θερμοκρασίας

θα γίνει περισσότερο παχύρρευστο και λιγότερο με μία αντίστοιχη μείωση της διότι τα συγκεκριμένα πολυμερή διαστέλλονται και συστέλλονται με τις εναλλαγές της θερμοκρασίας.

Τα **ηλεκτορεολογικά** (Electro-rheological) (ER) και **μαγνητορεολογικά** (magneto-rheological) (MR) ρευστά αλλάζουν το ιξώδες, την πλαστικότητα, ή την ελαστικότητα τους με τις εναλλαγές του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου. Τα ER και MR υλικά μεταβαίνουν από υγρά σε μορφή ζελέ (gel) σε χιλιοστά του δευτερολέπτου δι' εφαρμογής εξωτερικών δυνάμεων. Αυτά τα **έξυπνα ρευστά** αποτελούνται από πολυμερή (λάδια και πρόσθετες ουσίες) και **κεραμικά εγκλείσματα** αιωρούνται σε υγρή φάση. Ο υγρός φορέας πρέπει να είναι ένας καλός μονωτής και τα εγκλείσματα αντίστοιχα είτε καλοί αγωγοί ή φερρομαγνητικοί. Όταν εφαρμόζεται το πεδίο, τα εγκλείσματα συνδέονται όλα μαζί για να διαμορφώσουν ένα ζελέ. Τα εγκλείσματα κινούνται αυθαίρετα μετά από την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου (Σχ. 2-24). Τα έξυπνα ρευστά προσφέρουν μία δυναμικότητα στις εφαρμογές π.χ. ρομποτική, υδραυλικές βαλβίδες, μεταδόσεις δύναμης, και άλλους αυτοματοποιημένους.



⁷ From John A. Marshall, Liquids That Take Only Milliseconds to Turn into Solids. National Educators Workshop: Update 93 - Standard Experiments in Engineering, Materials Science, and Technology. NASA Conference Publication 3259, April 1994.

Πολυμερή με μνήμη (Shape Memory Polymers, SMP), π.χ. το κράμα Nitinol προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου μετά από τον πολυμερισμό. Το πολυμερές Polynorbomene, είναι ένα shape-memory πολυμερές, είναι χυτευμένο σε μία διαθέσιμη μορφή στην οποία θα επιστρέψει όταν υποβληθεί σε φορτίο. Άλλα έξυπνα πολυμερή σώματα, περιέχουν υγρούς κρυστάλλους μπορούν και αλλάζουν χρώματα, την αδιαφάνεια τους και άλλα χαρακτηριστικά με τις εναλλαγές των εξωτερικών φορτίων. Αυτά τα πολυμερή σώματα βρίσκουν εφαρμογές σε διαφορετικούς τομείς, όπως την ιατρική (θερμόμετρα χρώματος), στον αθλητισμό (έξυπνες ρακέτες αντισφαίρισης), και στην οικοδομική (επίδειξη θέρμανσης LCD και έξυπνα παράθυρα).

Κεφάλαιο 3^ο

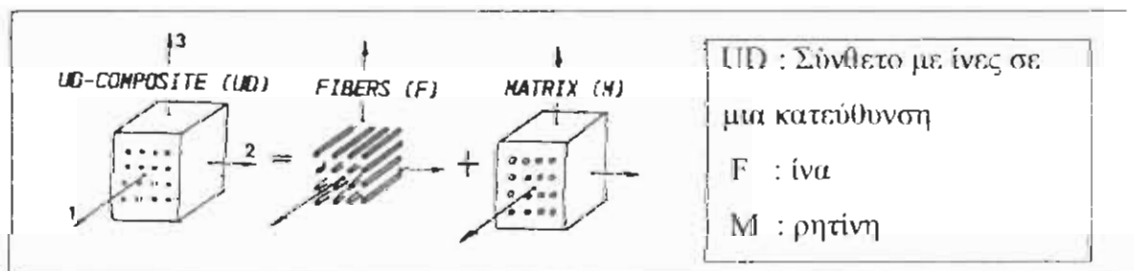
Διαδικασία Κατασκευής Γραναζιού από Εποξική Ρητίνη και Ανθρακονήματα

3.1 Εισαγωγικά: Σύνθετα Συστατικά Υλικά Πρότυπα¹

Η απόκριση ενός γραμμικού και μη γραμμικού σύνθετου υλικού μέχρι της αστοχίας του αποτυχία ή για περιοχές με διάχυτη ή περιορισμένη θραύση πριν την συγχώνευση για τη δημιουργία μεγάλων ρωγμών και στην δομική αστοχία, το αποτέλεσμα της στατικής ή δυναμικής φόρτισης μπορεί να περιγραφεί από τους ακόλουθους καταστατικούς νόμους^{2,3}.

- Διφασικό πρότυπο σύνθετου υλικού

Το πρότυπο για διφασικό υλικό προσαρμόζεται σε πολύστρωτα υλικά ενισχυμένα με ίνες σε μια κατεύθυνση (Σχ. 3.1). Η *δυσκαμψία* και η *αντοχή* των στοιχείων του συνθέτου, υπολογίζονται με την επαλληλία μιας ορθοτροπικής υλικής φάσης (ρητίνη μείον τις ίνες), και μια υλική φάση αποτελούμενη μόνο από ίνες, με ή χωρίς συμβατότητα της παραμόρφωσης. Κάθε φάση (ίνα ή ρητίνη) έχει το δικό της ρεολογικό νόμο, π.χ. ελαστικός/ εύθραυστος ορθοτροπικός, ή ελαστοπλαστικό (von Mises), ή ένα νόμο αστοχίας με βάση την θραύση του υλικού σε μικροσκοπικό επίπεδο, και ένα νόμο ελαστικό-ψαθυρό ή όλκιμος νόμος αστοχίας για τις ίνες.



Σχ. 3-1: Διφασικό πρότυπο (PAM-SOLID™ family).

¹ J.W. Bull, Numerical Analysis and Modeling of Composite Materials, Blackie Academic & Professional, NY (1996)

² Jones, R. M., Mechanics of Composite Materials, McGraw Hill, Tokyo, 1975

³ Tsai, S. W. and Hahn, H. T. Introduction to Composite Materials, Technomic, Westport, CT, 1980

Για την περίπτωση της σταδιακής φόρτωσης, οι τάσεις υπολογίζονται χωριστά σε κάθε φάση^{4,5,6}. Η αστοχία (δηλ. το ράγισμα της ρητίνης, το σπάσιμο των ινών) μπορεί να διυδοθεί ανεξάρτητα βυσιςμένη στο κριτήριο που επιλέγεται για κάθε φάση.

Εξίσωση τάσης έντασης

$$\sigma^{UD} = C^{UD} \epsilon^{UD}$$

$$C^{UD} = C^f + C^m$$

Γνωστές ιδιότητες των υλικών

$$E_{11}^{UD}, E_{22}^{UD}, G_{12}^{UD}, \nu_{12}^{UD}$$

όπου

E_{ij} είναι τα μέτρα ελαστικότητας του συνθέτου στις διευθύνσεις 1,2, G_{12} είναι το μέτρο διάτμησης του συνθέτου και ν_{12} παριστάνει το λόγο Poisson του συνθέτου.

Υπολογισμένες ποσότητες

$$\nu_{21}^{UD} = \nu_{12}^{UD} \frac{E_{22}^{UD}}{E_{11}^{UD}}$$

$$N^{UD} = 1 - \nu_{12}^{UD} \nu_{21}^{UD}$$

$$E_{11}^f = \alpha E_{11}^{f_{\text{πρακ}}}$$

⁴ Tsai, S. W., Composite Design (4th edn). Think Composites, Dayton, OH, 1988

⁵ De Rouvray, A. and Haug, E., Industrial calculation of damage tolerance and stress allowables in components made of composite materials using the PAM - FISS^{1M} / biphas material model. In *Proceedings of the Workshop: Composites Design for Space Application* (ed. Burke, W. R.) ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, 1986

⁶ de Rouvray, A. Dowlatyari, P. and Haug, E., Validation of the PAM - FISS / bi - phase numerical model for damage and strength predictions of LFRP composite laminates. In *Proceedings of MECAMAT 1989, Mechanics of Damage in Composites and Multi - Materials* (ESIS 11) (ed. Baptiste, D.) Mechanical Engineering Publications, London 1991

Παραγόμενες ορθοτροπικές σταθερές για το υλικό της ρητίνης

$$\begin{aligned}
 E_{11}^m &= E_{11}^{(D)} - E_{11}^f \\
 E_{22}^m &= E_{11}^{(D)} / (1 + \nu_{12}^2 (E_{22}^{(D)} / E_{11}^{(D)}) (E_{11}^f / (E_{11}^{(D)} - E_{11}^f))) \\
 \nu_{12}^m &= \nu_{12}^{(D)} \\
 \nu_{21}^m &= \nu_{21}^{(D)} / (1 - E_{11}^f N^{(D)} / E_{11}^{(D)}) \neq \nu_{21}^{(D)} \\
 G_{12}^m &= G_{12}^{(D)}
 \end{aligned}$$

Με τη χρήση του διφασικού προτύπου, ο ορθοτροπικός χαρακτήρας του υφάσματος και των πολύστρωτων συνθέτων με μονοαξονικές ίνες μπορεί να μοντελοποιηθεί με δύο κύριους τρόπους: είτε χρησιμοποιώντας δύο φάσεις, δηλαδή τις ίνες και τη ρητίνη (το "κλασσικό" πρότυπο), ή χρησιμοποιώντας μια φάση, δηλαδή μια ορθοτροπική ρητίνη μόνο (το "τροποποιημένο" πρότυπο).

Στην πρώτη προσέγγιση (το "κλασσικό" διφασικό πρότυπο) το ορθοτροπικό υλικό αντιπροσωπεύεται αρχικά από τη φάση των ινών. Στη δεύτερη προσέγγιση (το "τροποποιημένο διφασικό μοντέλο") ο ορθοτροπικός χαρακτήρας της ίνας ενισχύεται, το υλικό αντιπροσωπεύεται από τις κατάλληλες ορθοτροπικές σταθερές μόνο του υλικού της ρητίνης και δεν πρέπει να καθοριστεί καμία ιδιότητα των ινών. Το κλασσικό διφασικό πρότυπο είναι περισσότερο κατάλληλο για να αντιπροσωπεύει πολύστρωτα σύνθετα, ενώ η δεύτερη προσέγγιση είναι καταλληλότερη για να διαμορφώσει τα στρώματα υφασμάτων, ή ένα ζευγάρι πολύστρωτων με σταυρωτά επίπεδα ενισχύσεων, ή την αστοχία των σύνθετων πολύστρωτων αθροιστικά.

- **Ομοιογενοποίηση (φυλλόμορφη θεωρία)**

Ένα πολυδιάστατο πολύστρωτο μπορεί να διαμορφωθεί με τη τοποθέτηση διαφόρων υλικών κατά στρώσης μέσω του πάχους, με τις ίνες κατευθυνόμενες σε διαφορετικές διευθύνσεις αναφορικά με ένα καθολικό σύστημα αξόνων. (Σχ. 3.2). Ένα ισοδύναμο και απλούστερο πρότυπο λαμβάνεται μέσω της ομοιογενοποίησης του πραγματικού πολύστρωτου υλικού με ιδιότητες κελύφους^{7,8}. Η θεωρία των

⁷ Jones, R. M., *Mechanics of Composite Materials*. McGraw Hill, Tokyo, 1975

⁸ Haug, E., Dowlatyari, P. and de Royvray, A., Numerical calculation of damage tolerance and admissible stress in composite materials using the PAM FISS / bi phase material model. In

πολύστρωτων επιτρέπει τον εύκολο υπολογισμό των ισοδύναμων ομοιογενοποιημένων ιδιοτήτων για οποιαδήποτε σύνθετα μέσω των ακόλουθων βημάτων:

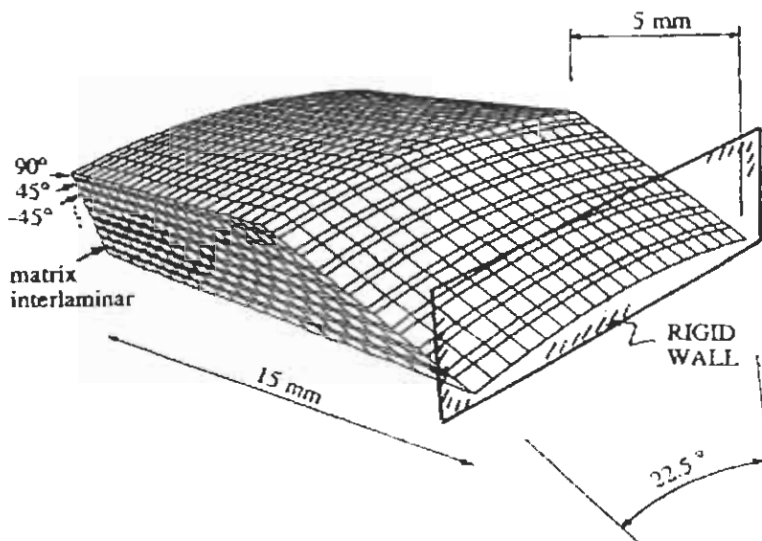
(i) Το μητρώο δυσκαμψίας των στρώσεων που βρίσκονται έξω από τον άξονα συμμετρίας του υλικού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό,

$$\{Q\} = [T]\{\bar{Q}\} \quad (3.1)$$

όπου $\{Q\}$ είναι η δυσκαμψία των στρώσεων εκτός άξονα, και $[T]$ το μητρώο μετασχηματισμού,

(ii) Το μητρώο δυσκαμψίας του πολύστρωτου πλαστικού φύλλου υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{ij}^L = \left(\sum_{k=1}^n Q_{ij}^k e^k \right) / e^L \quad (3.2)$$



Σχ. 3-2: Το στερεό πρότυπο ενός συνθέτου που συντρίβεται επάνω σε έναν τοίχο

όπου Q_y^l είναι οι συνιστώσες του ομοιογενοποιημένα του πολύστρωτου (L στρώσεων), Q_y^k οι συνιστώσες του μηρώου δυσκαμψίας της στρώσης k, στην κατεύθυνση του άξονα, και e^k είναι το πάχος της στρώσης k. Ο αριθμός των στρώσεων στο πολύστρωτο συμβολίζεται με το n και το συνολικό πάχος του πολύστρωτου e^l υπολογίζεται από

$$e^l = \sum_{k=1}^n e^k \quad (3-3)$$

(iii) οι ισοδύναμες σταθερές του υλικού υπολογίζονται από:

$$[S] = [Q]^{-1} \quad (3.4)$$

όπου

$$\begin{aligned} E_{11} &= 1/S_{11}, & E_{22} &= 1/S_{22} & E_{33} &= 1/S_{33} \\ G_{12} &= 1/S_4, & G_{13} &= 1/S_5 & G_{13} &= 1/S_6 \\ \nu_{12} &= -S_{12} E_{11} & \nu_{23} &= -S_{23} E_{22} & \nu_{13} &= -S_{23} E_{33} \end{aligned}$$

Η χρήση είτε των αληθινών ιδιοτήτων του πολύστρωτου ή οι ιδιότητες με βάση το ομοιογενοποιημένο πρότυπο εξαρτάται από το πρόβλημα και από την παραμορφωτική κλίμακα που πρέπει να μοντελοποιηθεί.

- Νόμος θραύσης με βάση το μέτρο αστοχίας (Modulus Damage Fracturing Law)

Νόμος θραύσης με βάση το μέτρο αστοχίας εισάγει την συνολική αστοχία (δηλ. μικρορηγματώσεις αστοχία λόγω μικροσχισμών), d_t , στο μέτρο ελαστικότητας του υλικού της ρητίνης και της ίνας έτσι ώστε

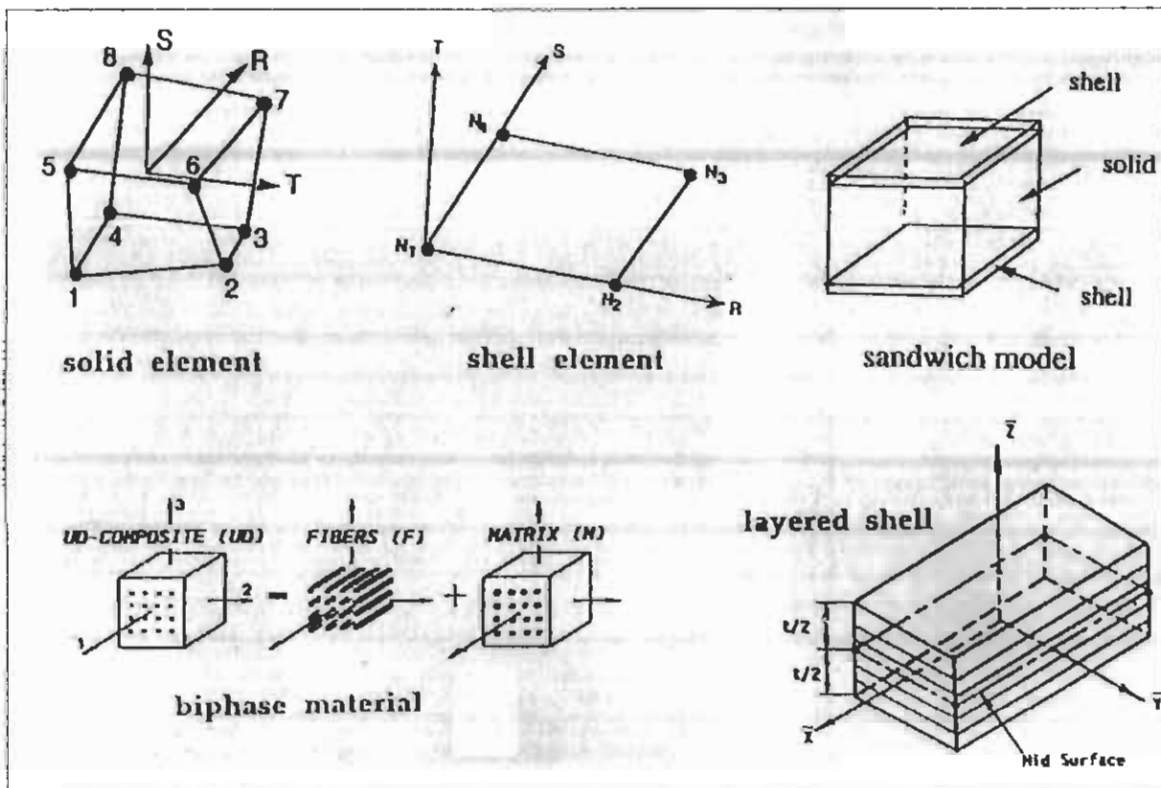
$$E(d_t) = (1 - d_t) E_0 \quad (3.5)$$

όπου το E αντιπροσωπεύει τον τρέχοντα συντελεστή ελαστικότητας και το E_0 είναι ο αρχικός συντελεστής ελαστικότητας. Η συνολική αστοχία d_t υπολογίζεται από την προσθήκη μιας ογκομετρικής παραμόρφωσης αστοχίας $d_v(\epsilon_v)$ στην διατμητική

παραμόρφωση αστοχίας, $d, (\epsilon_s)$ όπου το ϵ_s αντιπροσωπεύει την ογκομετρική παραμόρφωση και ϵ_s την διατμητική παραμόρφωση.

3.2 Διακριτικοποίηση των σύνθετων υλικών με Πεπερασμένα Στοιχεία

Ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας που λαμβάνεται από το πρότυπο με πεπερασμένα στοιχεία, διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να μοντελοποιήσουν το σύνθετο υλικό⁹. Τα επόμενα τμήματα περιγράφουν αυτά τα στοιχεία(Σχ. 3.3).



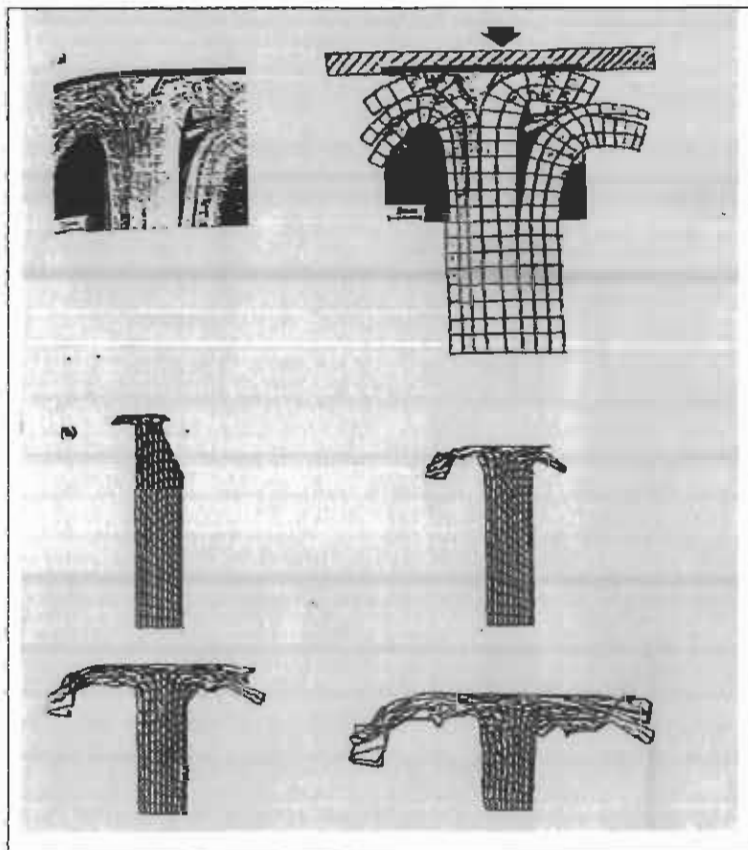
Σχ. 3-3: Πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των σύνθετων υλικών

Στερεά πρότυπα

Η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών περιγράφεται καλύτερα με τη χρήση στερεών στοιχείων. Κάθε στρώση του σύνθετου υλικού αντιπροσωπεύεται από μια

⁹ Hughes, T. J. R. The Finite Element Method. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987

σειρά των στοιχείων σε μορφή παραλληλεπίδου με το αντίστοιχο διαφασικό πρότυπο. Η αποκόλληση των στρώσεων, οι θραύσεις, τα προοδευτικά φαινόμενα ρωγμών, εκτός από τη λεπτομερή προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών καταπόνησης, είναι υποψήφιοι για την διακριτικοποίηση με στερεά πεπερασμένα στοιχεία. Στο Σχ. 3.4, ο διαχωρισμός και η σύνθλιψη ενός σωλήνα σύνθετου υλικού είναι διαμορφωμένη στο να χρησιμοποιεί στερεά στοιχεία έτσι ώστε να διαχωρίζονται οι δεσμοί μεταξύ των στρώσεων.

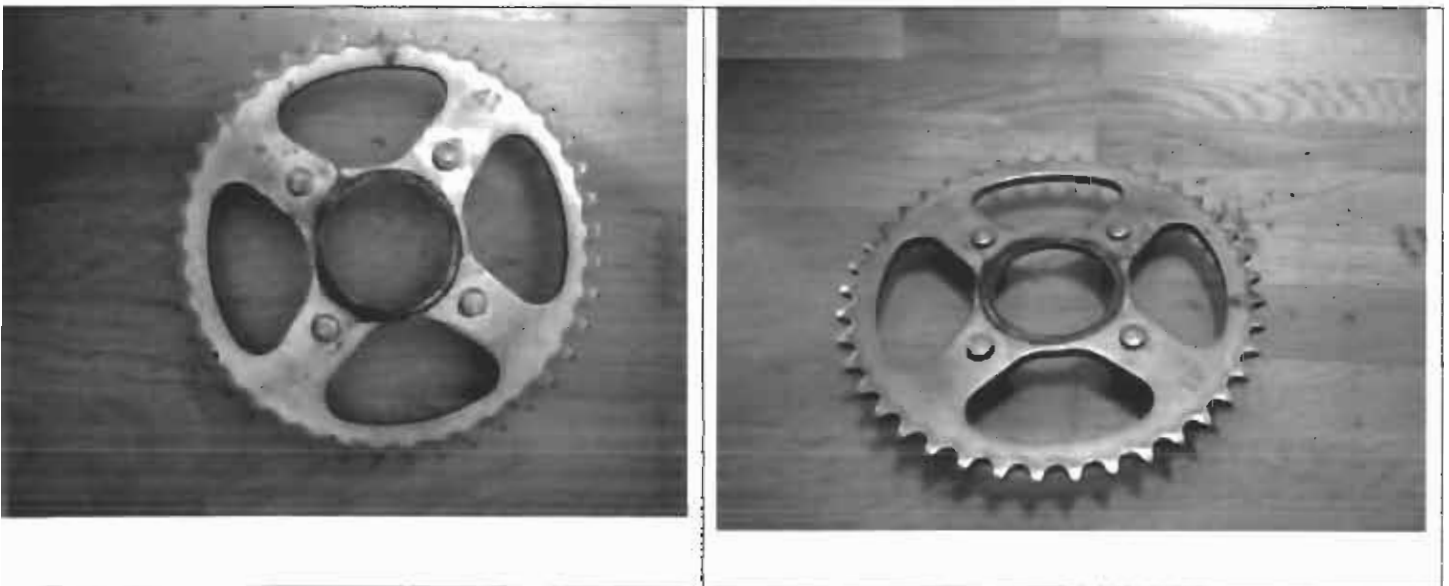


Σχ. 3-4: Στερεά διακριτικοποίηση της αστοχίας των συνθέτων (PAM-CRASH courtesy of ESI GmbH). (α) Λεπτομερές πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση τον επαναλαμβανόμενο καταστρεπτικό κύκλο (β) Διαγράμματα προσομοίωσης παραμορφωμένου πλέγματος.

3.3 Κατασκευή καλουπιού

Κατωτέρω περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής ενός γραναζιού από σύνθετα υλικά. Το καλούπι που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή ενός γραναζιού από

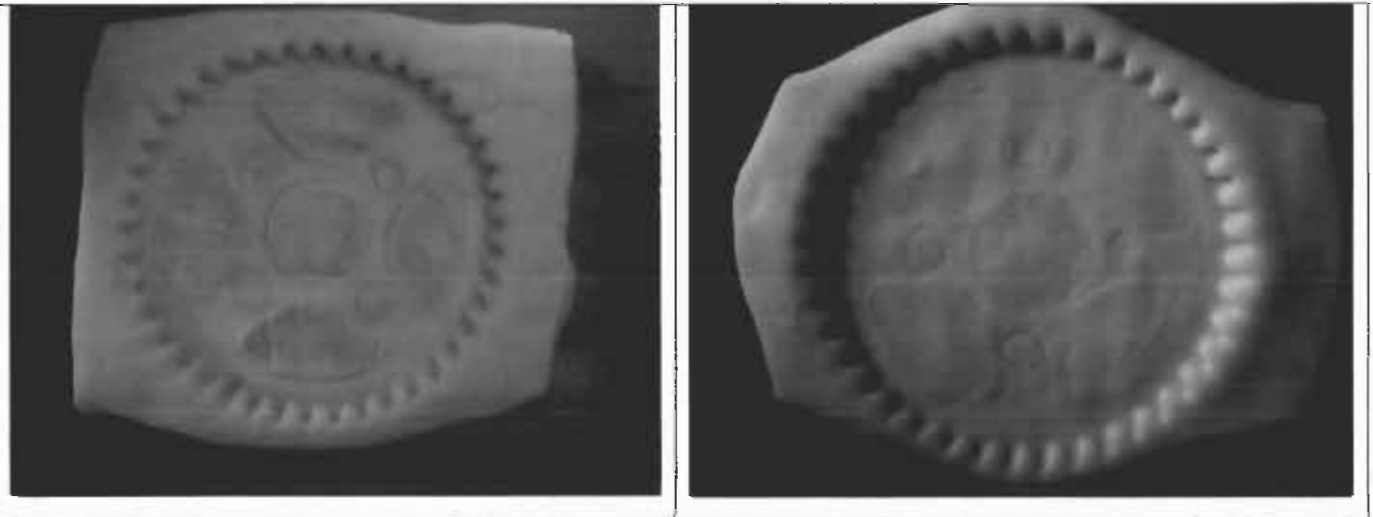
σύνθετα υλικά είναι από πορσελάνη. Η πορσελάνη έχει επιλεχθεί λόγω των εξής χαρακτηριστικών: (α) εύκολη διαμόρφωση σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος (15 - 35 °C), (β) μικρός χρόνος παραμονής στο φούρνο είναι κατά μέσο όρο 30 min, (γ) σκλήρυνση σε θερμοκρασία 100 - 130°C, η πλήρης σκλήρυνση θα επιτευχθεί στον ατμοσφαιρικό αέρα σε διάστημα περίπου δύο ωρών, (δ) ανθεκτικότητα σε μετέπειτα κατεργασίες, (ε) το κόστος ανέρχεται σε μεσαίας κατηγορίας υλικών. Αρχικά διαμορφώθηκε το υλικό του καλουπιού έτσι ώστε να επιτευχθεί το κατάλληλο πάχος του για την χύτευση της ρητίνης. Στην συνέχεια ψεκάσαμε την επιφάνεια του γραναζιού με σπρέι σιλικόνης (Σχ. 3.10) έτσι ώστε η αποκόλληση του από την πορσελάνη να είναι εύκολη. Έπειτα τοποθετήθηκε το πρότυπο γρανάζι (Σχ. 3.5) στην επιφάνεια της πορσελάνης και με την άσκηση πίεσης δημιουργήσαμε το αποτύπωμα του (Σχ. 3.6). Τέλος τοποθετήθηκε σε φούρνο σε θερμοκρασία 120°C και για χρονικό διάστημα 25 min και μετά το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος βγάζουμε το καλούπι από τον φούρνο και τοποθετείτε για πλήρη σκλήρυνση στις συνθήκες περιβάλλοντος



Σχ. 3-5: Πρότυπο Μεταλλικό γρανάζι

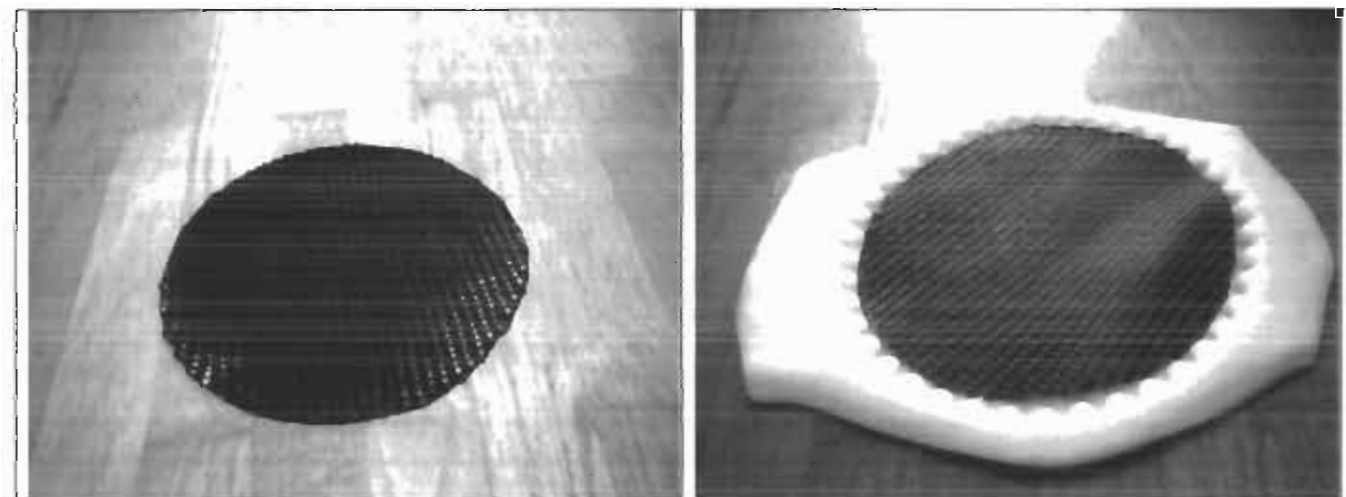
Η κοπή του ανθρακονήματος: Το ανθρακόνημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι φύλλο το οποίο χαρακτηρίζεται από ίνες μεσαίας πλέξης ± 90 με αρχικές διαστάσεις ένα μέτρο μήκος και είκοσι εκικοστά πλάτος. Στην συνέχεια δημιουργήσαμε το αποτύπωμα του πρότυπου γραναζιού πάνω στο ανθρακο-ύφισμα.

Λόγω της αραιής πλέξης των ινών κρίθηκε σκόπιμη η χρησιμοποίηση μιας ειδικής κολλητικής ταινίας για την συγκράτηση των ινών κατά την κοπή. Τέλος η κοπή του υφάσματος Σχ. 3.7 & 3.8 έγινε με την χρήση ψαλιδιού.



Σχ. 3-6: Καλούπια από πορσελάνη για την χύτευση του γρاناζιού

Διαδικασία κατασκευής γρاناζιού: Αρχικά τοποθετούμε το κουτί της ρητίνης (στοιχείο Α) μέσα σε δοχείο ζεστού νερού θερμοκρασίας 40-60°C έτσι ώστε να μειωθεί το ιξώδες και να εξαλειφθούν τυχόν φυσαλίδες αέρα που έχουν εγκλωβιστεί για την καλύτερη χύτευση του αντικειμένου. Στην συνέχεια δημιουργούμε την σχέση μίξης (στοιχείο Α/Β 2/1 κατά βάρος).

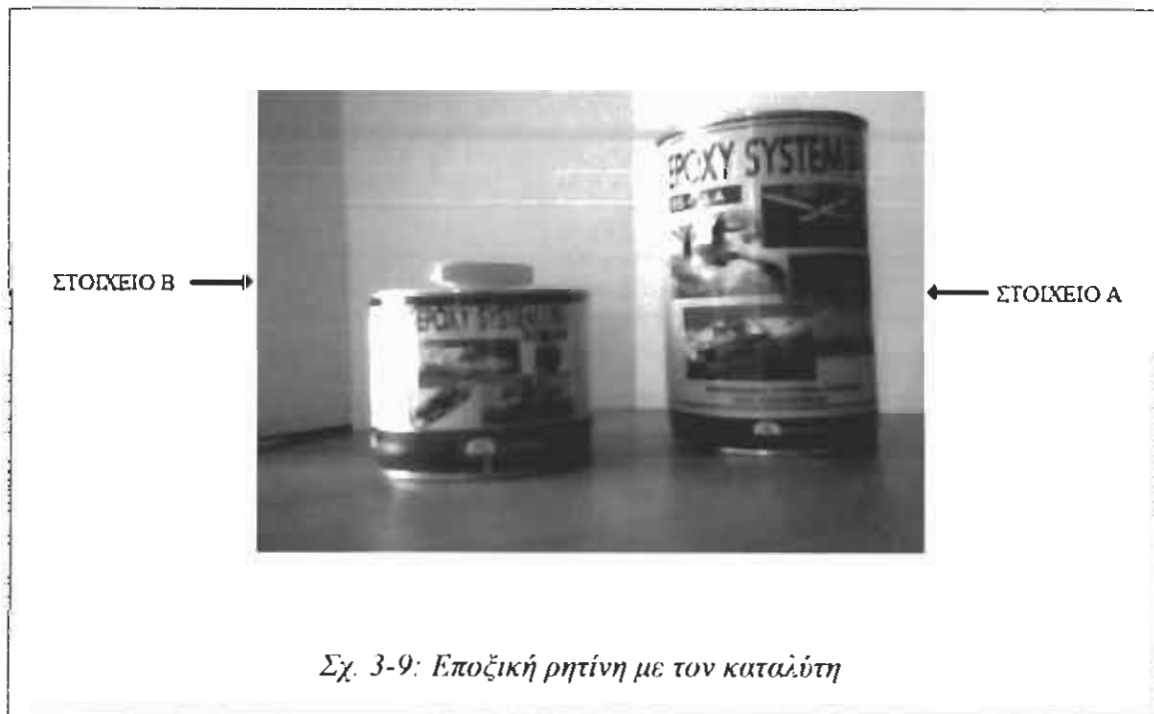


Σχ. 3-7: Ανθρακονήματα ± 90

Σχ. 3-8: Εμβάπτιση ανθρακονημάτων μέσα στο καλούπι

Έπειτα ψεκάζουμε με σπρέι σιλικόνης την επιφάνεια του αποτυπώματος στο καλούπι (εύκολη αποκόλληση). Με την βοήθεια πινέλου δημιουργούμε την πρώτη στρώση ρητίνης. Συνεχίζοντας τοποθετούμε την πρώτη στρώση ανθρακονήματος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για άλλες έξι (6) στρώσεις ανθρακονήματος. Η όλη διαδικασία δημιουργίας του γκρανζιού απαιτεί χρονικό διάστημα 30-60 λεπτά. Σε αντίθετη περίπτωση έχουμε μεγάλη αύξηση του ιξώδους της ρητίνης και η κατεργασία της είναι δύσκολη έως αδύνατη.

Εποξική ρητίνη δύο συστατικών



Σχ. 3-9: Εποξική ρητίνη με τον καταλύτη

Ιδιότητες των υλικών

Κατασκευές: Εμποτίζει άριστα carbon, Kevlar, fiber glass για κατασκευή τμημάτων αυτοκινήτου σκυφών αναψυχής και μοτοσικλετών. Μπορούν ακόμα να κατασκευασθούν κράνη, καγιάκ, ιστιοσανίδες, βατραχοπέδιλα, σκι, καλάμια ψαρέματος, ψαροντούφεκι, πτερύγια ανεμογεννητριών, διάφορα καλούπια υψηλών αντοχών, κ.α.

- **Συγκολλήσεις:** Άριστο συγκολλητικό για όλα σχεδόν τα υλικά.

- **Δομικά έργα:** Κατάλληλο για ενισχύσεις ρωγμών σκυροδέματος και παρόμοιες εργασίες.
- **Αντιοσμωτική δράση:** Πρόληψη και θεραπεία όσμωσης στα σκάφη.

Χρήση υλικών

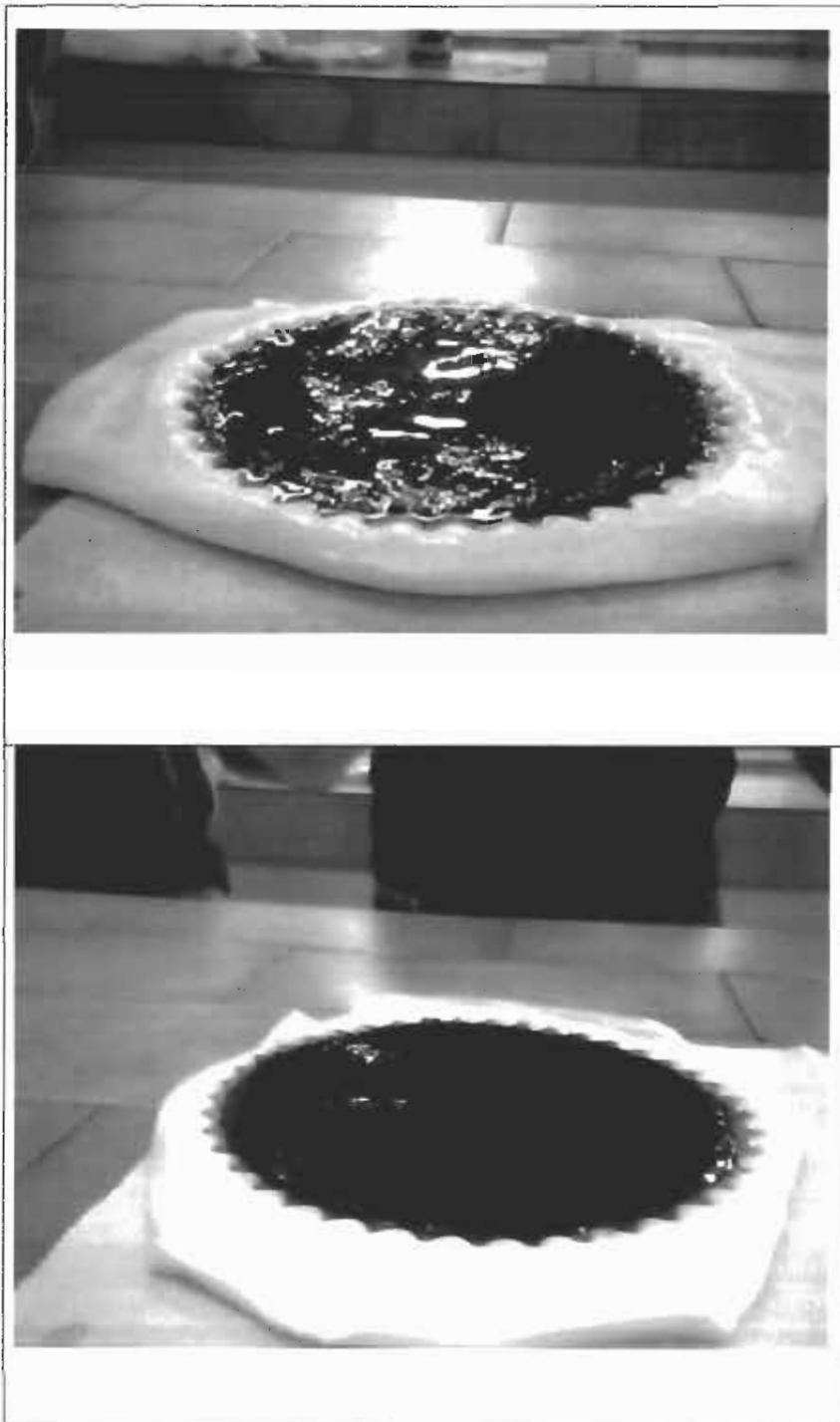
- **Σχέση ανάμιξης:** A/B 2/1 κατά βάρος
- **Χρόνος χρήσης μίγματος:** 30-60 λεπτά
- **Αρχική σκλήρυνση:** 6-7 ώρες
- **Πολυμερισμός:** 24 ώρες περίπου
- **Πλήρη σκλήρυνση:** 7 ημέρες
- **Κλιματολογικές συνθήκες εργασίας:** θερμοκρασία 12- 35°C και υγρασίας 50-80%



Σχ. 3-10: Σπρέι σιλικόνης για χρήση εύκολης αποκόλλησης του συνθέτου από το καλούπι

Αναλογίες για τη μίξη των υλικών

Το καλούπι έχει όγκο $\pi^2 \cdot h \approx 30 \text{ cm}^3$, και καθ' όσον η πυκνότητα της ρητίνης είναι περίπου 1.4 gr/cm^3 η μάζα του υλικού που απαιτείται για την παρασκευή του προτύπου είναι 52 gr.



Σχ. 3-11: Παρασκευή του προτύπου

Το υλικό της ρητίνης αποτελείται από δύο φάσεις, δηλ. την κυρίως εποξεική ρητίνη (Α) και τον καταλύτη (Β) σε αναλογία 2:1. Οπότε εάν απαιτείται ποσότητα x gr από την φάση Β, τότε η απαιτούμενη ποσότητα κάθε φάσης είναι: $2x + x = m$, ή $x = m/3$ gr (Β) και $2m/3$ gr (Α). Οπότε πρέπει να αναμείξουμε 34 gr από την ρητίνη Α και 17 gr από τον καταλύτη (Β).

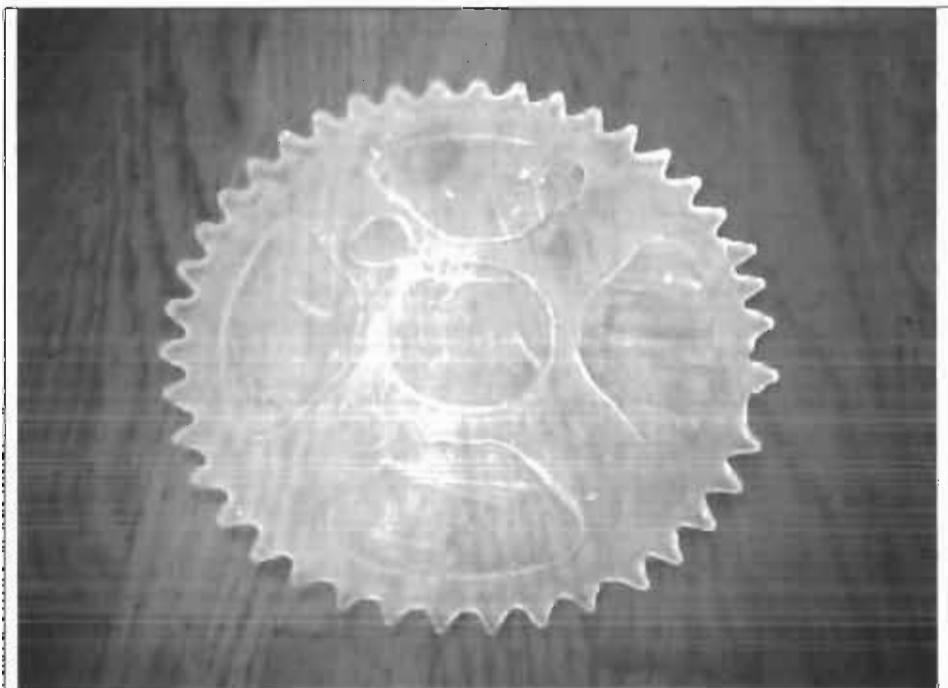


Σχ. 3-12: Φούρνος εργαστηρίου για το ψήσιμο της ρητίνης

Η μίξη γίνεται σε μεταλλικό δοχείο καθ' όσον μετά το πέρας της καλής μίξης με κατάλληλο μίξερ το υλικό μαζί με το δοχείο τοποθετείται σε ζεστό νερό για την διαφυγή των φυσαλίδων του αέρα που υπάρχουν στο μίγμα. Το μίγμα τότε χύνεται στο καλούπι μαζί με τα ανθρακονήματα και το σύστημα τοποθετείται σε φούρνο θερμοκρασίας 60°C για 45 min.



Σχ. 3-13: Γρανάζι από ανθρακονήματα και ρητίνη



Σχ. 3-14: Πρότυπο γρανάτζι από ρητίνη

3.4 Κατασκευή σύνθετων νάιλον/χάλυβα γραναζιών

Οι εταιρείες Duragear, Edgerton και Wisconsin, χρησιμοποιούν τα υλικά *nylasteel* και *nylatron* για την κατασκευή πλαστικών γραναζιών, άκαμπτων ράβδων χυτά γρανάζια από νάιλον, αλυσοτροχοί από νάιλον και νάιλον κύλινδροι.

Το NylaSteel είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από νάιλον και χάλυβα που σχεδιάζεται για τη χρήση στα μηχανικά τμήματα κίνησης. Τα στοιχεία όπως τα επεξεργασμένα γρανάζια, οι κύλινδροι και οι αλυσοτροχοί είναι όλα ιδανικές εφαρμογές για το NylaSteel.

3.4.1 Ελικοειδές γρανάζι από Nylasteel κινούμενο με ηλεκτρικό κινητήρα (EPS)

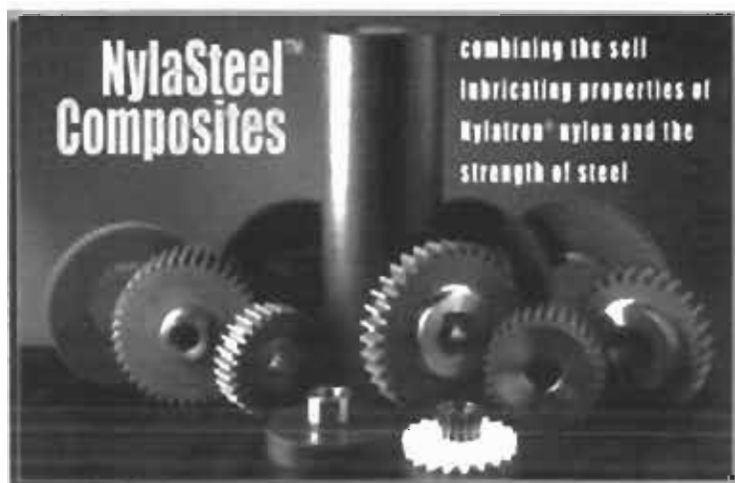
Τα ηλεκτρονικά συστήματα πλοήγησης (EPS/Electronic Power Steering) αντικαθιστούν τα παραδοσιακά υδραυλικά συστήματα ηλεκτροκίνητων αντλιών, τις μάνικες, το ρευστό, τον μάντα κίνησης και την τροχαλία στη μηχανή. Περαιτέρω, το EPS σύστημα προσφέρει την ευελιξία συσκευασίας και μειώνει σημαντικά το ποσό ενέργειας που προέρχεται από τη μηχανή, βελτιώνοντας κατά συνέπεια την οικονομία των καυσίμων, την επιτάχυνση, και την αξιοπιστία. Το EPS σύστημα προσφέρει την αίσθηση και το χειρισμό ενός παραδοσιακού υδραυλικός-τροφοδοτημένου συστήματος, χωρίς την απώλεια δύναμης που προκύπτει από τις τρέχοντας ζώνες και τις τροχαλίες υδραυλικών αντλιών που οδηγούνται από τη μηχανή.

Σήμερα τα EPS συστήματα χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα με μικρότερες μηχανές, όπου η κατανάλωση ισχύος είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για όλα τα εξαρτήματα. Ένα χαρακτηριστικό EPS σύστημα έχει μια ηλεκτρική μηχανή, αισθητήρες, ένα συναρμολογούμενο ελικοειδές γρανάζι και σύνθετους αλγορίθμους για να παρέχει επιπλέον δύναμη κατά τη διάρκεια της οδήγησης. Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην ανάπτυξη του EPS ήταν πώς να κατασκευαστεί το ελικοειδές γρανάζι, μέσω του οποίου η ηλεκτρική μηχανή παρέχει την επιπλέον δύναμη. Οι απαιτήσεις είναι: (1) αντίσταση, κατά τη διάρκεια των 'επιθετικών' ελιγμών οδήγησης, και στη μέγιστη ροπή εισαγωγής και στην επακόλουθη αξονική δύναμη του *ελικοειδούς γραναζιού* (2) μείωση των κραδασμών και του θορύβου και (3) χαμηλή ανοχή στην τριβή και ακρίβεια για όλες τις επιφάνειες των γραναζιών (4)

δυνατότητα να εφαρμόζεται σε έναν χαλύβδινο άξονα (5) διάρκεια στην κόπωση στο χρόνο ζωής του οχήματος.

Μετά από εκτενείς δοκιμές απόδοσης πολλών πλαστικών, συμπεριλαμβανομένων των ειδικών νάιλον, των ακετηλών και άλλων ενισχυμένων πλαστικών που χρησιμοποιούνται στην εφαρμοσμένη μηχανική, το υλικό Nylasteel βρέθηκε να παρέχει την υψηλότερη απόδοση. Η μακροχρόνια αντοχή και αντίσταση στην κόπωση του νάιλον που χρησιμοποιείται για να κατασκευαστεί το υλικό Nylasteel είναι πολύ μεγαλύτερη απ' όλα τα άλλα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των ενισχυμένων ινών αραμίτη που παρασκευάζονται με την τεχνική της έγχυσης μέσα σε ενώσεις του νάιλον.

Η εταιρία **NylaSteel** κατασκευάζει σύνθετα υλικά από νάιλον ενισχυμένο με χάλυβα που σχεδιάζεται για τη χρήση των επεξεργασμένων τμημάτων κίνησης στη μηχανή. Τα στοιχεία στη μηχανή όπως οι κύλινδροι και οι αλυσοτροχοί είναι όλα ιδανικές εφαρμογές για το NylaSteel υλικό (βλ. Σχ. 3-15)¹⁰



Σχ. 3-15: Εξαρτήματα μηχανών κατασκευασμένα από νάιλον ενισχυμένο με χάλυβα.

Η εταιρία **NylaSteel** συνδυάζει τα πλεονεκτήματα απόδοσης του νάιλον Nylatron με τη αντοχή του χάλυβα. Οι επιφάνειες των επαφών αποτελούνται από Nylatron, το οποίο προσφέρει την αντοχή, την ανθεκτικότητα και την καλή λειτουργία. Ο πυρήνας του συστατικού είναι χάλυβας, ο οποίος παρέχει την κρίσιμη αντοχή στον άξονα και

¹⁰ www.dyragear.com

τις εφαρμογές παρέμβασης. Το πλεονέκτημα του υλικού NylaSteel είναι: (1) το νάιλον Nylatron εκχύνεται επάνω σε μια ειδικά επεξεργασμένη επιφάνεια χάλυβα και το προκύπτον προϊόν NylaSteel συμπεριφέρεται ως ομοιογενές υλικό που μπορεί να επεξεργαστεί στη μηχανή στην κανονική μορφή (βλ. Σχ. 3-16).



Σχ. 3-16 : Γρανάζια κατασκευασμένα από νάιλον και χαλύβδινους πυρήνες

Τα σύνθετα προϊόντα που παράγονται από την εταιρία **NylaSteel** μειώνουν τις δαπάνες ολίσθησης και επεξεργασίας που συνδέονται με άλλες τεχνικές. Επειδή το νάιλον αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του χάλυβα, τα επεξεργασμένα στη μηχανή κενά που μετρούν λιγότερο πλάτος προσώπου $\frac{1}{2}$ της ίντσας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα τμήματα κίνησης όπως:

- Εργαλεία
- Αλυσοτροχοί
- Τροχαλίες
- Κύλινδροι /ρόδες

3.4.2 Σύνθετα εργαλεία από νάιλον/χάλυβα Nylasteel

Μετά από εκτενείς δοκιμές για την απόδοση πολλών πλαστικών συμπεριλαμβανομένου και του νάιλον, της ακεταλδεΐδης και άλλων ενισχύσεων τα υλικά Nylasteel χρησιμοποιήθηκαν για να παρέχουν την υψηλότερη απόδοση. Η

αυτοκίνητα, όπου η κατανάλωση ισχύος είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για όλα τα εξαρτήματα.

Ένα χαρακτηριστικό σύστημα EPS έχει μια ηλεκτρική μηχανή, αισθητήρες, με συναρμολόγηση ατέρμονα για να παρέχει δύναμη βοήθειας κατά τη διάρκεια της οδήγησης. Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις να αναπτυχθεί το σύστημα EPS ήταν η κατασκευή του ατέρμονα άξονα, μέσω του οποίου η ηλεκτρική μηχανή θα παρέχει την δύναμη βοήθειας.

Η παραγωγή των γραναζιών βασίζεται σε πρότυπα κατά μέγεθος και ανάλογα με το καλούπι που υπάρχει. Η δημιουργία του γραναζιού γίνεται σε αντλίες κενού οι οποίες αφαιρούν τις φυσαλίδες του αέρα από το υλικό. Μετά την κατασκευή του γραναζιού στο καλούπι έχουμε την επεξεργασία του σε τόρνο CNC, έτσι ώστε να δημιουργήσουμε τις τελικές διαστάσεις του γραναζιού. Ο τελικός σχεδιασμός και δημιουργία των δοντιών γίνεται σε φρέζα.

Η εταιρία Nylastee™ χρησιμοποιεί νάιλον τύπου (α) Nylatron και (β) MC[®] 901 της εταιρίας DSM. Τα πλεονεκτήματα αυτών των προϊόντων είναι:

- Η δυνατότητα σύνδεσης με άξονα χάλυβα.
- Αντίσταση και διάρκεια κόπωσης για τις εφαρμογές κάτω από 93°C σε περιβαλλοντικές συνθήκες
- Μια αποδοτική και οικονομική λύση στην κατασκευή και συναρμολόγηση πλαστικών με μεταλλικά υλικά.
- Αυξημένη ικανότητα αντοχής, υποδύναμης και ροπής λόγω του πυρήνα χάλυβα.

Κεφάλαιο 4^ο

Ανάλυση Γραναζιών με Πεπερασμένα Στοιχεία

4.1 Εισαγωγικά

Κατωτέρω περιγράφουμε αναλυτικά τα διάφορα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στην αριθμητική ανάλυση των προβλημάτων γραναζιών.

Το στοιχείο επαφής CONTA171 χρησιμοποιείται για την επαφή και την ολίσθηση μεταξύ δύο επιφανειών, η μια επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως CONTA171 και η άλλη ως TARGE169. Αυτό το στοιχείο έχει δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y. Το στοιχείο δοκού (BEAM3) είναι μονοαξονικό πεπερασμένο στοιχείο με δυνατότητες σε τάση, θλίψη και κάμψη. Το στοιχείο αυτό έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετατόπιση στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y και περιστροφή γύρω από τον Z-άξονα.

Το στοιχείο 8-κόμβων καθορίζεται από οκτώ κόμβους που έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y. Το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επίπεδο ή ως αξονοσυμμετρικό. Το στοιχείο αυτό συμπεριλαμβάνει πλαστικότητα, ερπυσμό, δύγκωση, ακαμψία, μεγάλη παραμόρφωση, και μεγάλες ικανότητες στην πίεση.

Το στοιχείο TARGE 169 χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύσει διάφορες δισδιάστατες (2-D) άκαμπτες επιφάνειες " TARGET " και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα στοιχεία επαφής CONTA171 και CONTA172.

4.2 Τύποι των Πεπερασμένων Στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση διεπιφανειών

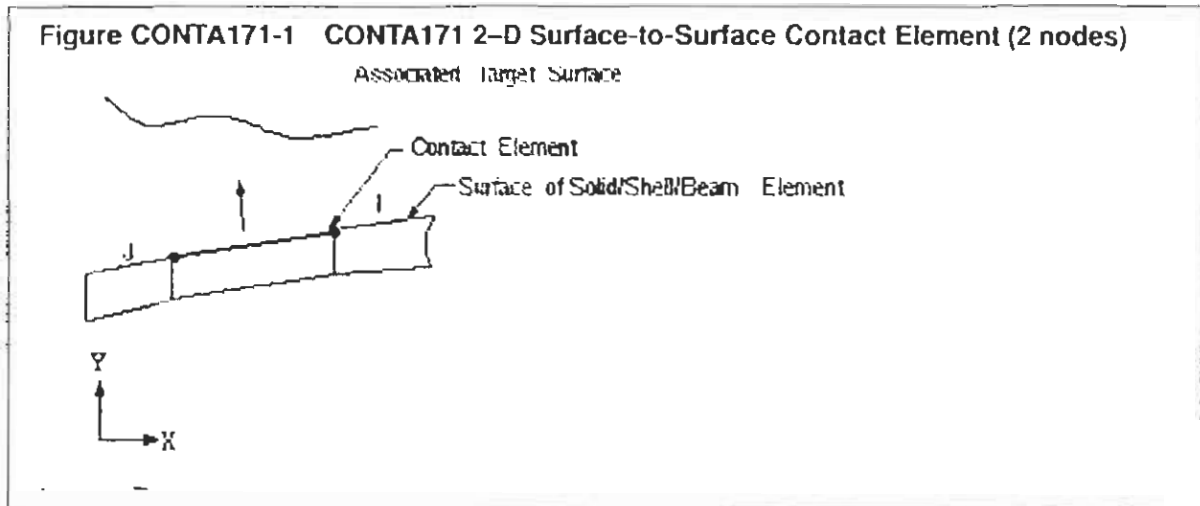
4.2.1 Περιγραφή των στοιχείων CONTA171 που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των γραναζιών

Το στοιχείο επαφής CONTA171 χρησιμοποιείται για την επαφή και την ολίσθηση μεταξύ 2 επιφανειών (TARGET169) και μιας παραμορφωμένης επιφάνειας, που καθορίζεται από αυτό το στοιχείο. Το στοιχείο CONTA 171 έχει δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y. Βρίσκεται στις επιφάνειες του 2-D στερεού σώματος, του κελύφους, ή στοιχείων δοκών χωρίς κόμβους στα μέσα των πλευρών. Έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με το στερεό, το κέλυφος ή το στοιχείο δοκού με τα οποία συνδέεται. Η διεπαφή συμβαίνει όταν η επιφάνεια του στοιχείου διαπερνά ένα από τα στοιχεία του στόχου στην επιφάνεια του στοιχείου αυτού. Γι' αυτό το στοιχείο επιτρέπεται τριβή με βάση τη θεωρία του *Coulomb* και λόγω διατμητικής τάσης. Το Σχ. 4-1 δείχνει την γεωμετρία και τη θέση των κόμβων για τα στοιχεία CONTA171-1 και CONTA171-2D.

Το στοιχείο καθορίζεται από δύο (2) κόμβους. Εάν το στερεό που βρίσκεται κάτω από το στοιχείο επαφής έχει μεσαίους κόμβους τότε χρησιμοποιούμε το στοιχείο CONTA172. Ο X-άξονας του στοιχείου βρίσκεται κατ' μήκος της γραμμής I-J του στοιχείου. Οι κόμβοι πρέπει να διαταχθούν έτσι ώστε η επιφάνεια 'στόχος' πρέπει να κείται στα δεξιά του στοιχείου 'επαφής' όταν μετακινούμεθα από το πρώτο κόμβο του στοιχείου επαφής προς τον δεύτερο κόμβο. Τα δισδιάστατα στοιχεία επαφής συνδέονται με τα 2-D στοιχεία στόχων (TARGET169) μέσω μιας κοινής πραγματικής σταθεράς.

Το πρόγραμμα ANSYS ψάχνει μόνο για επαφή μεταξύ επιφανειών με την ίδια πραγματική σταθερά. Για την προτυποποίηση είτε μιας *άκαμπτης-εύκαμπτης διεπιφάνειας* είτε μιας *εύκαμπτης-εύκαμπτης διεπαφής*, μία από τις παραμορφωμένες επιφάνειες πρέπει να αντιπροσωπεύεται από μια επιφάνεια επαφών. Εάν

περισσότερες από μια επιφάνειες στόχων έρχονται σε επαφή με το ίδιο όριο των στερεών στοιχείων, πρέπει να καθορίσουμε διάφορα στοιχεία επαφών που μοιράζονται την ίδια γεωμετρία αλλά αφορούν διαφορετικούς στόχους.



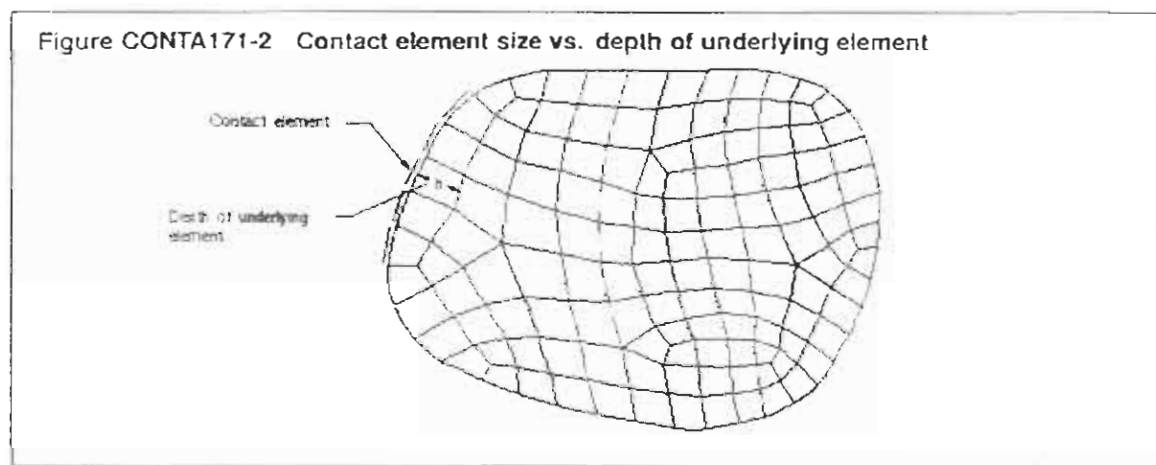
Σχ. 4-1: Διεπιφανειακά στοιχεία

Αυτό το στοιχείο υποστηρίζει διαφορετικές 2-D τασικές καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένης επίπεδης έντασης, επίπεδης παραμόρφωσης και αξονοσυμμετρικές συνθήκες. Η τασική κατάσταση ανιχνεύεται αυτόματα σύμφωνα με την τασική του στοιχείου 'στόχου'. Εντούτοις, εάν το στοιχείο στόχος είναι ένα στοιχείο ανωτέρου βαθμού πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή KEYOPT(3) για να διευκρινιστεί η τασική κατάσταση.

Η πραγματική σταθερά R1 χρησιμοποιείται μόνο για να καθορίσει την ακτίνα εάν η σχετική μορφή του στοιχείου στόχου (TARGET169) είναι κύκλος. Εάν το στοιχείο στόχος είναι ένα στοιχείο ανωτέρου βαθμού σε κατάσταση επίπεδης έντασης όπου η σταθερά R2 χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει το πάχος του στοιχείου.

Χρησιμοποιούμε την πραγματική σταθερά ΓKN για να ορίσουμε τον παράγοντα για την *ορθή δυσκαμψία* της διεπαφής. Ο παράγοντας αυτός παίρνει τιμές από 0,01-100 με προεπιλογή την τιμή 1,0. Το ANSYS αυτόματα ορίζει μια προεπιλεγμένη τιμή για την *εφαπτομενική δυσκαμψία* του στοιχείου η οποία είναι ανάλογη το MU και της ορθής δυσκαμψίας του στοιχείου. Αυτή η προεπιλεγμένη εφαπτομενική τιμή της

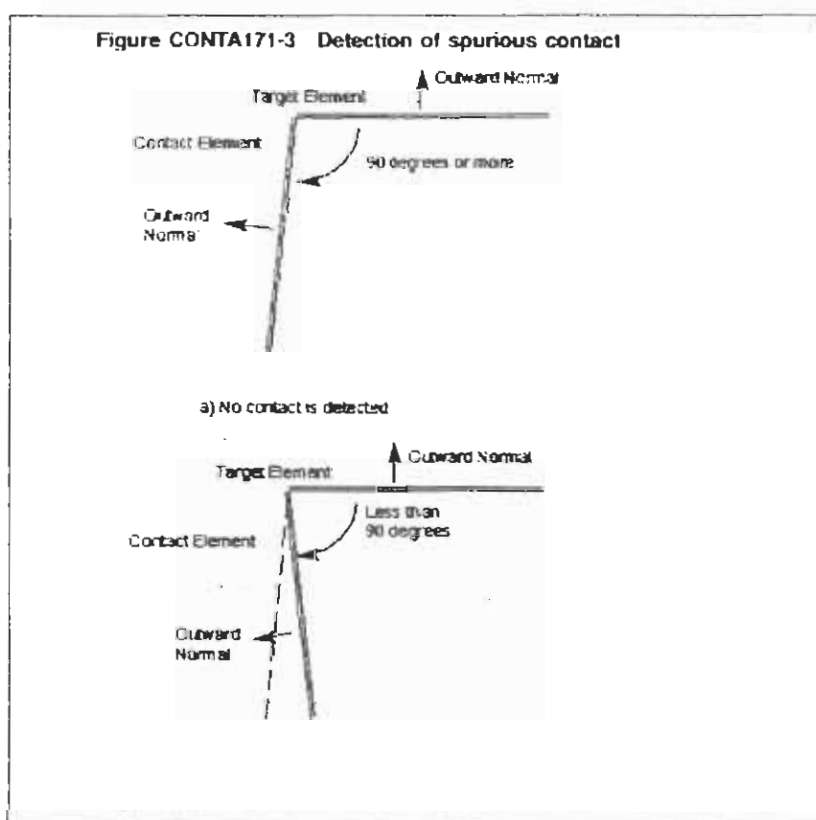
δυσκαμψίας αντιστοιχεί στην τιμή FKT = 1.0. Μπορούμε να ορίσουμε μια διαφορετική τιμή για το FKT η οποία αντιστοιχεί σε διαφορετικό μέτρο εφαπτομενικής δυσκαμψίας του στοιχείου. Αρνητικό σημείο του παράγοντα FKT δείχνει μια απόλυτη τιμή της εφαπτομένης δυσκαμψίας. Η χρήση της πραγματικής σταθερά για να καθορίσουμε έναν παράγοντα ανοχής που εφαρμόζεται στην κατεύθυνση της επιφάνειας. Η σειρά γι' αυτό τον παράγοντα είναι λιγότερο από 1,0 (συνήθως λιγότερο από 0.2), με μια προεπιλογή 0,1 και είναι με βάση το πάχος του στοιχείου. Αυτός ο παράγοντας χρησιμοποιείται για να καθορίσει εάν ικανοποιείται η συνθήκη συμβατότητας της διείσδυση όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος ποινής (penalty methods) σε συνδυασμό με τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange.



Σχ. 4-2: Απειριφανειακό στοιχείο σε συνάρτηση του βάθους του στοιχείου στόχου.

Το μέγεθος των στοιχείων επαφών εναντίον του βάθους του ελλοχεύοντος στοιχείου. Εάν η τιμή του FKN είναι πάρα πολύ μικρή και η τιμή του FTOLN πάρα πολύ μεγάλη, μπορεί να εμφανιστεί διείσδυση. Εάν η τιμή του FKN είναι πάρα πολύ μεγάλη ή τιμή του FTOLN πάρα πολύ μικρή, το πρόβλημα μπορεί να μην συγκλίνει. Μπορούμε να ορίσουμε την εντολή PINB για να έχουμε οποιαδήποτε τιμή. Εξ' ορισμού το ANSYS ορίζει την απειροελάχιστη περιοχή για να είναι 4 φορές το βάθος του στερεού που βρίσκεται κάτω από το στοιχείου στόχου, του κελύφους, ή του στοιχείου δοκού για άκαμπτη ή εύκαμπτη επαφή, και 2 φορές για την εύκαμπτη-εύκαμπτη επαφή.

Σε μερικές περιπτώσεις της συμμετρικής επαφής, συμπεριλαμβανομένης της μόνης επαφής, το ANSYS μπορεί να υποθέσει την επαφή μεταξύ μιας επαφής και μιας επιφάνειας στόχων που είναι στην πολύ στενή γεωμετρική θέση. Αυτό χαρακτηριστικά εμφανίζεται στις γωνίες, και μπορεί να προκληθεί από την αρχική γεωμετρική θέση των στοιχείων ή την κατευθείαν παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Όταν οι δύο επιφάνειες είναι μέσα στη απειροελάχιστη περιοχή και η γωνία μεταξύ τους είναι μικρότερη από 90 μοίρες, το ANSYS υποθέτει ότι έχει συμβεί μια πολύ μεγάλη διείσδυση.



Σχ. 4-3: Λιείθωση 'φανταστικής' επαφής.

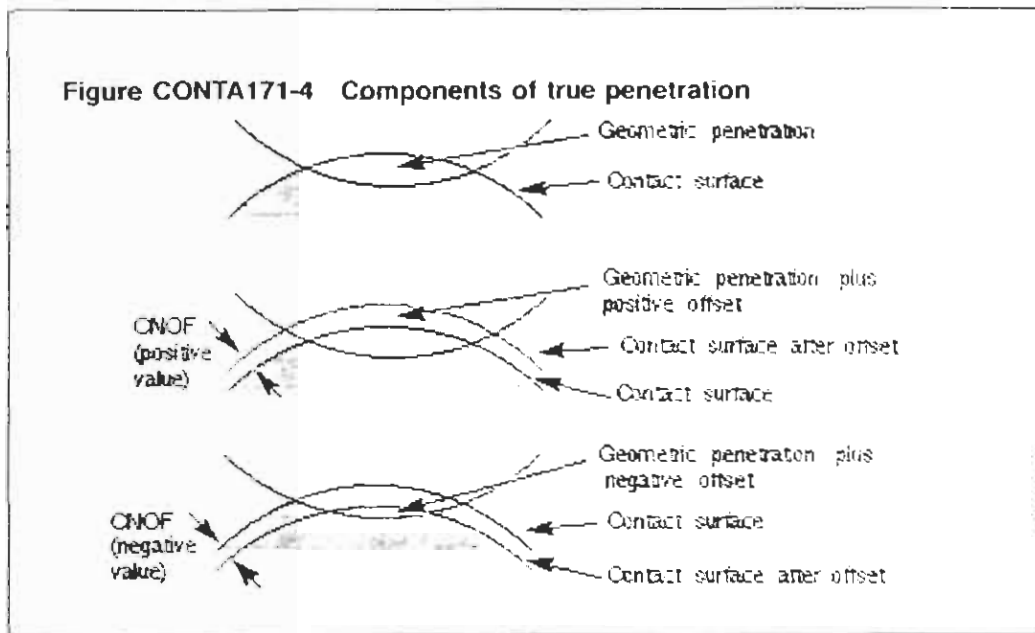
Μπορούμε να αποφύγουμε το ANSYS να θεωρήσει τέτοιες φανταστικές επαφές. Η αρχικά ανιχνευμένη διείσδυση είναι μεγαλύτερη σε 20% της τιμής ανοχής των επαφών (FTOLN). Η χρήση αυτή γίνεται μόνο εάν η μεταβαλλόμενη τιμή δεν μπορεί να αποτρέψει την πλαστική επαφή. Εάν χρησιμοποιείτε αυτήν την επιλογή και την αληθινή διείσδυση καθετί από τα παραπάνω θα αγνοηθεί. Η εντολή KEYOPT(8)

είναι η πιο χρήσιμη για τα προβλήματα *μονών-επαφών* όπως η παραμόρφωση των λαστιχένιων σφραγίδων. Σε μερικές αναλύσεις, οι επιφάνειες *επαφών* και *στόχων* δεν είναι σε αρχική επαφή λόγω της διαμόρφωσης της γεωμετρίας και της παραγωγής του πλέγματος, ή λόγω κυρτών ή ανώμαλων επιφανειών. Αυτές οι καταστάσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μητρώα ακαμψίας με μηδενική ορίζουσα για προβλήματα στατικής ανάλυσης επαφών. Χρησιμοποιούμε την πραγματική σταθερή *ICONT* για να ορίσουμε έναν αρχικό παράγοντα περάτωσης, εάν το αρχικό χάσμα είναι λιγότερο από την ανοχή. Το ANSYS εξετάζει το πρότυπο για να είναι σε αρχική επαφή. Εάν δεν ορίζεται η εντολή *ICONT*, το ANSYS παρέχει μια μικρή τιμή (μικρότερη από 0.03), ανάλογα με τη γεωμετρική διάσταση. Ορίζουμε μια πολύ μικρή τιμή εάν θέλουμε αμελητέα αρχική περάτωση επαφών. Εάν ορίσουμε το *PMIN* και το *PMAX* και ένας διαφορετικός από το μηδέν περιορισμός στην αρχή της ανάλυσης, το ANSYS κινεί ολόκληρη την επιφάνεια στόχων που είναι μέσα στη σειρά *PMIN* σε *PMAX* στην επαφή με την επιφάνεια επαφών. Επιπλέον, εάν η αρχική διείσδυση είναι μεγαλύτερη από *PMAX* το ANSYS ρυθμίζει την *επιφάνεια στόχων* για να μειώσει τη διείσδυση στη περιοχή *PMIN/PMAX*. Για *εύκαμπτη-εύκαμπτη επαφή*, αυτή η τεχνική μεταφέρει ολόκληρο το παραμορφώσιμο σώμα, το οποίο είναι προσαρτημένο με την επιφάνεια του στόχου. Πρέπει να είμαστε βέβαιοι ότι δεν υπάρχει καμία άλλη επαφή στις επιφάνειες που συνδέονται με αυτό το παραμορφώσιμο σώμα.

Η πραγματική σταθερά *CNOF* καθορίζει μια τιμή αντιστάθμισης που εφαρμόζεται στην επιφάνεια των επαφών. Μια θετική αντιστάθμιση σημαίνει ότι η ολόκληρη επιφάνεια επαφών είναι εσωτερικά αντισταθμιζόμενη από την επιφάνεια του στόχου. Αρνητική τιμή αντιστάθμισης σημαίνει ότι ολόκληρη η επιφάνεια των επαφών απομακρύνεται εσωτερικά από την επιφάνεια στόχου δηλαδή για να μειώσει τη διείσδυση ή να αυξήσει το χάσμα (Για τις ακτίνες και τα κελύφη, τα πάχη μπορούν να περιληφθούν αυτόματα εάν το *KEYOPT(11) = 1*).

Επομένως η πραγματική διείσδυση περιλαμβάνει δύο μέρη: διείσδυση λόγω της γεωμετρίας και διείσδυση που οφείλεται σε μια θετική τιμή αντιστάθμισης της επιφάνειας επαφών.

Συστατικά της αληθινής διείσδυσης



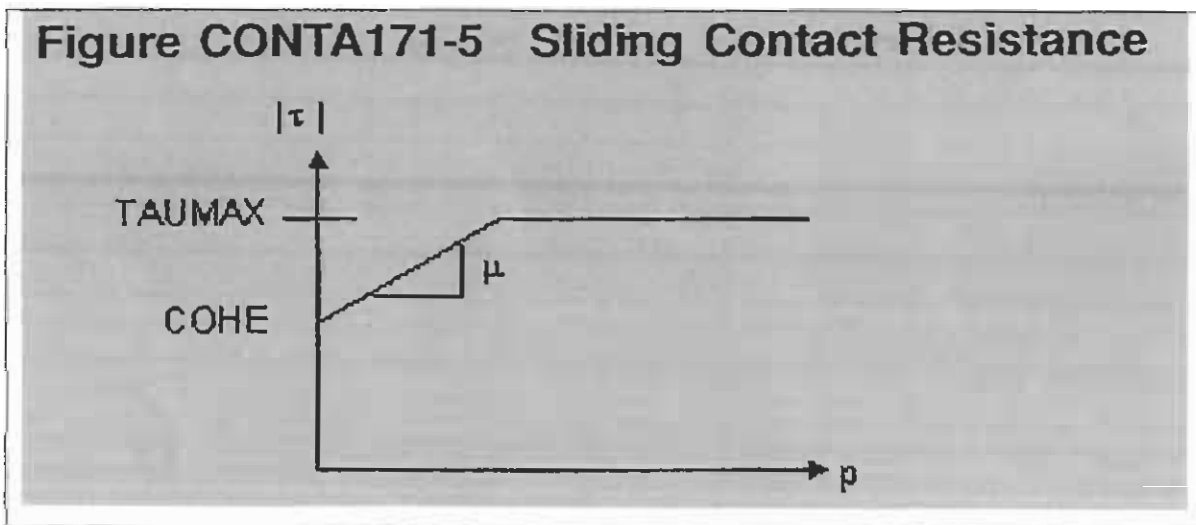
Σχ. 4-4: Συνιστώσες της πραγματικής διείσδυσης

Για να ληφθεί υπ' όψιν η αρχική διείσδυση ή η αρχική διαμόρφωση της παρέμβασης, μπορούν να περιληφθούν αμφότερες ή κάθε μια χωριστά από τις επιδράσεις αυτές. Για να συμπεριληφθεί μόνο η γεωμετρική διείσδυση και για να αποκλειστεί η επίδραση της αντιστάθμισης, ορίζεται $CNOF = 0,0$ σαν προεπιλογή. Για να περιληφθούν και οι δύο επιδράσεις, οι οποίες υπεισέρχονται στο πρώτο στάδιο φόρτισης, ορίζουμε $KEYOPT(9) = 0$. Για να αγνοήσουμε την αρχική διείσδυση και από αμφότερα μέρη, καθορίζουμε $KEYOPT(9) = 1$. Όταν $KEYOPT(12) = 4$ ή 5 , η ρύθμιση του $KEYOPT(9)$ θα αγνοήσει επίσης την αρχική δύναμη στο ανοικτό-χάσμα των ελατηρίων, δημιουργώντας κατά συνέπεια αρχικά μια "τέλεια" επιφάνεια επαφής με την επιφάνεια που δεν έχει καμία αρχική δύναμη, η οποία ενεργεί απέναντι στην διεπαφή επαφών.

Για να αγνοήσετε την αρχική διείσδυση λόγω της γεωμετρίας θέτουμε $KEYOPT(9) = 4$. Όταν $KEYOPT(12) = 4$ ή 5 , αυτή η ρύθμιση για $KEYOPT(9)$ θα αγνοήσει την αρχική δύναμη δημιουργώντας κατά συνέπεια αρχικά μια "τέλεια" επιφάνεια επαφής με την επιφάνεια που δεν έχει καμία αρχική δύναμη, η οποία ενεργεί απέναντι στην διεπαφή επαφών. Η μόνη ιδιότητα που χρησιμοποιείται γι' αυτό το στοιχείο είναι ο

διεπιφανειακός συντελεστής τριβής MU , για πρότυπο τριβή τύπου Coulomb. Η τιμή $MU=0$ είναι για επαφή χωρίς τριβή. Η MU μπορεί να οριστεί σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Εάν το στοιχείο 'στόχου' είναι το στοιχείο ανώτερου βαθμού (superelement) η ιδιότητα του υλικού πρέπει να είναι ίδια με εκείνη που χρησιμοποιείται για τα αρχικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν για το υπερ-στοιχείο (superelement). Το ANSYS παρέχει μια επέκταση της κλασσικής τριβής Coulomb: $TAUMAX$ είναι η μέγιστη διεπιφανειακή τριβή σε μονάδες τάσης. Η τιμή της μπορεί προσεγγιστικά να ισούται με $\sigma_t / \sqrt{3}$, σ_y όπου η τάση διαρροής του υλικού το οποίο παραμορφώνεται.

Αυτή η μέγιστη τάση διεπιφανειακής τριβής μπορεί να εισαχθεί έτσι ώστε, ανεξάρτητα από το μέγεθος της ορθής τάσης των επαφών, η ολίσθηση θα εμφανιστεί εάν η τάση τριβής φθάσει αυτή την τιμή. Η χρήση του $TAUMAX$ γίνεται όταν η τάση επαφών γίνεται πολύ μεγάλη.



Σχ. 4-5: Αντίσταση της επιφανειακής ολίσθησης

Μια άλλη πραγματική σταθερά που χρησιμοποιείται για το νόμο τριβής είναι η σταθερά συνοχής $COHE$, η οποία εκφράζεται σε μονάδες τάσης και παρέχει την αντίσταση ολίσθησης, ακόμη και για μηδενική ορθή πίεση.

Όταν η επαφή ολίσθησης υπερτερεί τότε η σύγκλιση του προβλήματος γίνεται δύσκολη και πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το ασύμμετρο μητρώο ακαμψίας.

Διαφορετικά, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την προεπιλογή KEYOPT (6) = 0 για το συμμετρικό μητρώο ακαμψίας. Η *ορθή* και *εφαπτόμενη* ακαμψία των επαφών μπορεί να ενημερωθεί κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, είτε αυτόματα (λόγω των μεγάλων τάσεων που αλλάζουν την ακαμψία του στοιχείου στόχου) ή έμμεσα (ορίζοντας τις σταθερές FKN ή FKT) Η εντολή KEYOPT(10) ελέγχει πώς η ορθή και εφαπτομενική διεπιφανειακή δυσκαμψία ενημερώνεται.

Εάν KEYOPT(10) = 0 τότε οποιαδήποτε διεπιφανειακή δυσκαμψία παύει να ενημερώνεται για αυτά τα στοιχεία που πυραμένουν κλειστά. Για τα στοιχεία που αλλάζουν από την "ανοικτή" στην "κλειστή" θέση, η διεπιφανειακή δυσκαμψία θα ενημερώνεται σε κάθε υποβήμα.

Εάν KEYOPT(10) = 1 τότε επιτρέπει την ακαμψία αυτών των στοιχείων που είναι ήδη στη "κλειστή" θέση για να αλλαχτούν μεταξύ των βημάτων φόρτισης ή κατά τη διάρκεια των σταδιακών νέων καταστάσεων. Για τα στοιχεία που αλλάζουν από "ανοικτή" στη "κλειστή" θέση, η ακαμψία επαφών θα ενημερωθεί σε κάθε υποβήμα. Οι αναπροσαρμογές θα εμφανιστούν σε κάθε υποβήμα για όλα τα στοιχεία, ανεξάρτητα από τη θέση τους.

Εάν KEYOPT (10)=2 το οποίο είναι το ίδιο με την εντολή KEYOPT(10) = 1 εκτός του ότι το πρόγραμμα ορίζεται αυτόματα η ενημέρωση συμβαίνει σε κάθε υποβήμα για όλα τα στοιχεία ανεξάρτητα από την κατάσταση τους.

Η χρήση του KEYOPT(12) γίνεται για να μοντελοποιήσει την συμπεριφορά διαφορετικών διεπιφανειών.

Εάν KEYOPT(12) = 0 τότε μοντελοποιείται η κανονική μονομερή διεπαφή, δηλαδή μηδενική ορθή πίεση όταν συμβαίνει αποκόλληση.

Εάν KEYOPT(12) = 1 τότε μοντελοποιείται η τέλεια τραχύτητα διεπιφανειακής τριβής όπου δεν υπάρχει καμία ολίσθηση. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε έναν άπειρο συντελεστή τριβής και αγνοεί την σταθερά του υλικού MU.

Εάν KEYOPT(12) = 2 τότε μοντελοποιείται η διεπαφή χωρίς διαχωρισμό για την οποία η επιφάνεια στόχου και επαφής είναι συνδεδεμένες για την υπόλοιπη ανάλυση καθ' όσον έχει επέλθει η επαφή.

Εάν KEYOPT(12) = 3 τότε μοντελοποιείται η συνδεδεμένη επαφή στην οποίαν οποία

η επιφάνεια στόχου και επαφής είναι συνδεδεμένες σε όλες τις κατευθύνσεις για την απόλυτη ανάλυση.

Εάν $KEYOPT(12) = 4$ τότε μοντελοποιείται διεπαφή χωρίς διαχωρισμό στην οποίαν η διεύθυνση επαφής κατευθύνεται είτε αρχικά μέσα στην απειροελάχιστη περιοχή επαφής ή στην περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται η επαφή η οποία πάντοτε ακουμπά την επιφάνεια του στόχου κατά μήκος της ορθής κατεύθυνσης της επιφανείας επαφής. Σ' αυτή την περίπτωση επιτρέπεται ολίσθησης.

Εάν $KEYOPT(12) = 5$ τότε μοντελοποιείται η συζευγμένη επαφή, στην οποία τα σημεία ανίχνευσης επαφών βρίσκονται το καθένα αρχικά μέσα στην απειροελάχιστη περιοχή ή περιλαμβάνει την επαφή η οποία συνδέεται πάντα με την επιφάνεια του στόχου κατά μήκος των ορθών κατευθύνσεων εφαπτομενικά της επιφανείας επαφών.

Εάν $KEYOPT(12) = 6$ τότε μοντελοποιείται η συζευγμένη επαφή, στην οποία τα σημεία ανίχνευσης επαφών είναι αρχικά σε μια κλειστή κατάσταση η οποία θα παραμείνει συνδεδεμένη με την επιφάνεια του στόχου και την ανίχνευση επαφών όπου τα σημεία είναι αρχικά σε μια ανοικτή κατάσταση και παραμένουν ανοικτά σε όλη την ανάλυση.

Για συνδεδεμένη επαφή, μπορεί να καθορίσουμε την πραγματική σταθερά $FKOP$ (που είναι ο παράγοντας ακαμψίας που εφαρμόζεται όταν ανοίγει η επαφή). Η αληθινή ακαμψία των επαφών είναι ίση με $FKOP$ επί την δυσκαμψία επαφής όταν η επαφή κλείνει. Εξ' ορισμού η $FKOP=1$. Η κλειστή επαφή δημιουργεί μια δύναμη επαναφοράς όταν συμβαίνει άνοιγμα της επαφής. Μπορεί να καθορίσετε μια μεγαλύτερη τιμή της σταθεράς $FKOP$ για να ελαττώσουμε το χάσμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις τυποποιημένης επαφής ($KEYOPT(12) = 0$), αναμένεται χωρισμός ενώ απαιτείται σύνδεση ακόμα και για την περίπτωση που να αποτρέψει κίνηση του στερεού σώματος. Για τις πραγματικές σταθερές $ICONT$, FKN , $FTOLN$, $PINB$, $PMAX$, MIN , και $FKOP$, μπορούμε να προκαθορίσουμε μια θετική ή αρνητική τιμή. Το ANSYS ερμηνεύει μια θετική τιμή ως παράγοντα αναλογίας και μια αρνητική τιμή ως απόλυτη τιμή. Παραδείγματος χάριν, μια θετική τιμή 0.1 για $ICONT$ δείχνει έναν αρχικό παράγοντα 0,1 επί το βάθος του στοιχείου στόχου. Εντούτοις, μια αρνητική τιμή 0,1 δείχνει μια πραγματική ζώνη ρύθμισης 0,1 μονάδων. Μπορούμε να αλλάξετε τις σταθερές FKN , $FTOLN$, $PINB$, και $FKOP$

μεταξύ των βημάτων φόρτισης.

Τα αποτελέσματα της λύσης που συνδέεται με το στοιχείο παρουσιάζονται με δύο μορφές:

- Κομβικές μετατοπίσεις που περιλαμβάνονται στη γενική κομβική λύση
- Επιπρόσθετα δεδομένα των στοιχείων όπως παρουσιάζονται στον πίνακα CONTA 171-1

Ο πίνακας 'Ορισμών Παραγωγής Στοιχείων' χρησιμοποιεί την ακόλουθη σημείωση: Η στήλη 'A' με την ονομασία "Name" δείχνει ότι το στοιχείο μπορεί να προσεγγιστεί με τη μέθοδο "Ονόματος Συστατικών" [ETABLE, ESOL]. Η στήλη 'O' δείχνει τη διαθεσιμότητα των στοιχείων στο αρχείο **Jobname.OUT**. Η στήλη 'R' δείχνει τη διαθεσιμότητα των στοιχείων στο αρχείο των αποτελεσμάτων.

Είτε στις στήλες 'O' ή 'R', το Y δείχνει ότι το στοιχείο είναι πάντα διαθέσιμο, ο αριθμός αναφέρεται σε μια υποσημείωση που περιγράφει πότε το στοιχείο είναι υπό όρους διαθέσιμο, και - δείχνει ότι το στοιχείο δεν είναι διαθέσιμο.

Ο πίνακας 4-1, CONTA171 'Ορισμοί Παραγωγής Στοιχείων' δίνει τα δεδομένα για την παραγωγή των στοιχείων. Στο αρχείο αποτελεσμάτων, τα κομβικά αποτελέσματα επιτυγχάνονται από το πιο κοντινό σημείο ολοκλήρωσής του.

Το 2-D στοιχείο επιφών πρέπει να καθοριστεί στο επίπεδο X-Y και ο Y-άξονας πρέπει να είναι ο άξονας της συμμετρίας για αξονοσυμμετρικές αναλύσεις. Μια αξονοσυμμετρική δομή πρέπει να διαμορφωθεί +X τεταρτημόρια. Αυτό το 2-D στοιχείο επιφών λειτουργεί με οποιαδήποτε τρισδιάστατα στοιχεία στο πρότυπό σας.

Name	Καθορισμός	O	R
EL	Ο αριθμός του στοιχείου	Y	Y
NODES	Κόμβοι I, J	Y	Y
XC, YC	Θέσεις όπου τα αποτελέσματα αναφέρονται	Y	5
TEMP	Θερμοκρασίες T(I), T(J)	Y	Y
LENGTH	Μήκος του στοιχείου	Y	-
VOLU	Εμβαδόν	Y	Y

Πίνακας 4-1 CONTA 171 Element Output Definitions

Μην χρησιμοποιήσετε αυτό το στοιχείο σε οποιοδήποτε πρότυπο που περιλαμβάνει τα *αξονοσυμμετρικά* αρμονικά στοιχεία. Η αρίθμηση των κόμβων πρέπει να συμπίπτει με την εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου στόχου, κέλυφος, ή στοιχεία δοκού, ή με τα αρχικά στοιχεία περιλαμβάνοντας και το υπερ-στοιχείο. Αυτό το στοιχείο είναι μη γραμμικό και απαιτεί μια πλήρη επαναληπτική λύση σύμφωνα με την μέθοδο του Newton, παρά το ότι ορίζονται οι μεγάλες ή μικρές παραμορφώσεις. Ο κανονικός παράγοντας ακαμψίας των επαφών (FKN) δεν πρέπει να είναι τόσο μεγάλος ώστε να προκληθεί αριθμητική αστάθεια. Οι σταθερές FTOI.N, PINB, και FKOP μπορούν να αλλάξουν μεταξύ των βημάτων της φόρτισης ή κατά τη διάρκεια των αλλαγών μιας νέας φόρτισης. Η τιμή FKN μπορεί να είναι μικρότερη όταν συνδυάζεται με τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών *Lagrange*, για την οποία πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή FTOI.N.

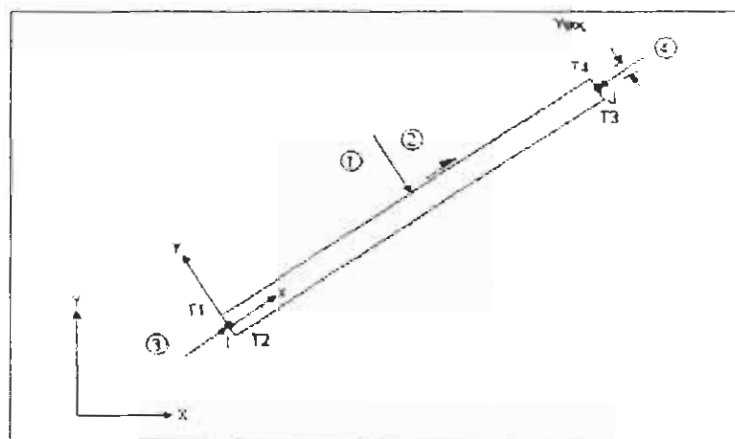
Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτό το στοιχείο στις μη γραμμικές στατικές ή τις μη γραμμικές πλήρεις μεταβατικές αναλύσεις. Επιπλέον, μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε στις κομβικές αναλύσεις και ιδιοτιμές για την ανάλυση λυγισμού. Για τις αναλύσεις ιδιοτιμών λυγισμού το πρόγραμμα υποθέτει ότι η αρχική θέση του στοιχείου (δηλ., η κατάσταση δεν αλλάζει μετά το πέρας της ολοκλήρωσης του στατικού προβλήματος). Αυτό το στοιχείο επιτρέπει τη δημιουργία και την εξαφάνιση του βασικού στερεού, κελύφους (shell), ή των στοιχείων στόχων.

4.2.2 Περιγραφή του 2-D στοιχείου δοκού (BEAM3) ελαστικής δοκού

Το στοιχείο δοκού (BEAM3) είναι μονοαξονικό πεπερασμένο στοιχείο με ικανότητες σε τάση, θλίψη και κάμψη. Το στοιχείο αυτό έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετατόπιση στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y και περιστροφή γύρω από τον Z-άξονα. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με αυτό το στοιχείο μπορούμε να συμβουλευτούμε την παράγραφο 14.3 ANSYS Theory Reference του εγχειριδίου του προγράμματος ANSYS. Άλλα δισδιάστατα (2-D) στοιχεία δοκού είναι το BEAM23 και το BEAM54.

Το σχήμα 4-6 δείχνει τα στοιχεία BEAM3-1 και BEAM3 2-D της *ελαστικής δοκού*

δηλ. τη γεωμετρία του, τις θέσεις των κόμβων, και το τοπικό σύστημα αξόνων του στοιχείου. Το στοιχείο καθορίζεται από δύο κόμβους, τη διατομή, το μέτρο αδράνειας, το ύψος, και τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής του στοιχείου. Η αρχική παραμόρφωση στο στοιχείο (ISTRN) δίνεται από το λόγο δ/I , όπου δ είναι η διαφορά μεταξύ των κομβικών μετατοπίσεων του στοιχείου, I το αρχικό μήκος του στοιχείου όπως καθορίζεται από τις θέσεις των κόμβων I και J.



Σχ. 4-6: Αξονικό στοιχείο τύπου 2-D BEAM3

Η αρχική ένταση χρησιμοποιείται επίσης για υπολογισμό του πίνακα ακαμψίας του στοιχείου για το πρώτο βήμα της επαναληπτικής μεθόδου.

Το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια αξονοσυμμετρική ανάλυση εάν τα αποτελέσματα των εφαπτομενικών συνιστωσών είναι αμελητέα, π.χ. για την ανάλυση μπουλονιών, αυλακωτούς κυλίνδρους, κ.λπ. Η επιφανειακή και η περιστροφική ροπή αδράνειας πρέπει, για μια αξονοσυμμετρική ανάλυση, να εισαχθούν για περιστροφή 360°. Η σταθερά διάτμησης του υλικού (SHEARZ) είναι προαιρετική. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια μηδενική τιμή για το SHEARZ για να παραβλέψουμε την διατμητική παραμόρφωση. Ο υπολογισμός του μέτρου διάτμησης (G_{xy}) χρησιμοποιείται μόνο με τη διατμητική παραμόρφωση. Τις ιδιότητες δεν μπορούμε να τις εισάγουμε με προεπιλογή όπως για την περίπτωση γραμμικών ιδιοτήτων του υλικού. Μια πρόσθετη μάζα ανά μονάδα μήκους μπορεί να εισαχθεί στο ANSYS με την εντολή ADDMAS.

Τις πιέσεις μπορούμε να τις εισάγουμε σαν φορτία επιφάνειας στις επιφάνειες των

στοιχείων. Οι πλευρικές πιέσεις εισάγονται ως δύναμη ανά μονάδα μήκους. Οι τελικές πιέσεις εισάγονται ως δύναμη με την εντολή KEYOPT (10) που επιτρέπει στις πλευρικές πιέσεις μείωση για την αντιστάθμιση από τις κομβικές πιέσεις. Οι θερμοκρασίες εισάγονται ως φορτία στις τέσσερις κορυφές όπως παρουσιάζεται στο σχήμα BEAM3 2-D ελαστική δοκός. Η πρώτη θερμοκρασία στις κορυφές προκαθορίζεται με την εντολή TUNIF. Εάν όλες οι άλλες θερμοκρασίες είναι απροσδιόριστες, προκαθορίζουν στο T1. Εάν μόνο τα T1 και το T2 εισάγονται, T3 προκαθορίζει στο T2 και T4 τις προεπιλογές στο T1. Για οποιοδήποτε άλλο σχέδιο εισαγωγής, οι απροσδιόριστες θερμοκρασίες προκαθορίζονται με την εντολή TUNIF.

Με την εντολή KEYOPT (9), χρησιμοποιούμε εντολές εξόδου σε ενδιάμεση θέση η οποία δεν είναι αληθής εάν

- η τάση δυσκαμψίας ενεργοποιείται με την εντολή [SSTIF,ON]
- εφαρμόζονται περισσότερες από μια γωνιακές ταχύτητες [OMEGA]
- Οποιοσδήποτε γωνιακή ταχύτητα ή επιτάχυνση εφαρμόζεται με τις εντολές CGOMGA DOMEGA, ή DCGOMG.

Περίληψη εισαγωγής δεδομένων για το στοιχείο δοκού BEAM3

Όνομα στοιχείου

BEAM3

Κόμβοι

I, J

Βαθμοί ελευθερίας

UX, UY, ROTZ

Πραγματικές σταθερές

AREA, IZZ, HEIGHT, SHEARZ, ISTRN, ADDMAS

Ιδιότητες των υλικών

EX, ALPX, DENS, GXY, DAMP

Φορτία επιφάνειας

Πίεση -Face 1 (I-J) (-Y κανονική κατεύθυνση),
 Face 2 (I-J) (+X εφαπτόμενη κατεύθυνση),
 Face 3 (I) (+X αξονική κατεύθυνση),
 Face 4 (J) (-X αξονική κατεύθυνση)

(Χρησιμοποιήστε μια αρνητική τιμή για τη φόρτωση στην αντίθετη κατεύθυνση)

Φορτία σώματος

Θερμοκρασίες -T1, T2, T3, T4

Ειδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα

Τάση δυσκαμψίας, μεγάλη μετατόπιση, δημιουργία και απώλεια

Η εντολή KEYOPT (6)

0 – Δεν εκτυπώνονται τα αποτελέσματα για τις δυνάμεις και τις ορμές

1 – Εκτυπώνεται μέρος των δυνάμεων και των ορμών στο τοπικό σύστημα του στοιχείου

Η εντολή KEYOPT (9)

Χρησιμοποιείτε για να ρυθμίσει επιπρόσθετα δεδομένα αποτελεσμάτων μεταξύ των κόμβων I και J

N - Παραγωγή στις ενδιάμεσες θέσεις N (N = 0, 1, 3, 5, 7, 9)

Η εντολή KEYOPT (10)

Χρησιμοποιείτε μόνο για επιφανειακά φορτία *SFBEAM*

0 – Η μετατόπιση για την τοποθέτηση φορτίων είναι από την άποψη των μονάδων μήκους

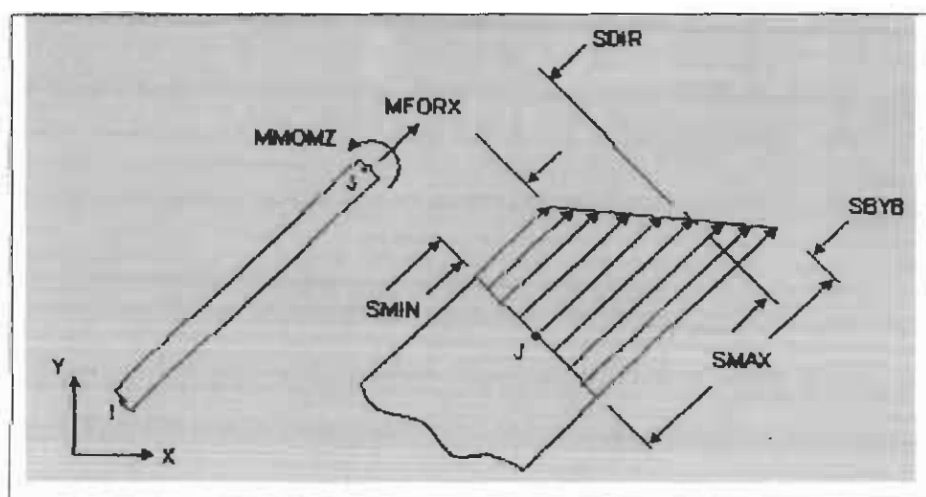
1 – Η μετατόπιση είναι από την άποψη μιας αναλογίας μήκους (0.0 to 1.0)

Σημείωση Η εντολή SHEARZ συνδυάζεται με την ροπή αδρανείας I_{zz} . Εάν SHEARZ = 0, δεν υπάρχει καμία διατμητική εκτροπή στην Y κατεύθυνση του στοιχείου.

Τα αποτελέσματα που συνδέονται με το στοιχείο είναι σε δύο μορφές:

- Κομβικές μετατοπίσεις που περιλαμβάνονται στη γενική κομβική λύση
- Επιπρόσθετα δεδομένα αποτελεσμάτων του στοιχείου όπως φαίνεται στους Πίνακες BEAM3-1, BEAM3 Ορισμοί παραγωγής στοιχείων.

Το Σχήμα 4-7 επεξηγεί την εφαρμοζόμενη πίεση στο στοιχείο.



Σχ. 4-7: BEAM3-2 BEAM3 Αποτελέσματα των τάσεων

Ο πίνακας των αποτελεσμάτων χρησιμοποιεί την ακόλουθη σημείωση: στη στήλη δείχνει ότι το στοιχείο μπορεί να προσεγγιστεί με τη μέθοδο ονόματος συστατικών TABLE, ESOL. Η στήλη '0' δείχνει τη διαθεσιμότητα των στοιχείων στο αρχείο

Jobname.OUT. Η στήλη δείχνει τη διαθεσιμότητα των στοιχείων στο αρχείο αποτελεσμάτων.

Όνομα	Καθορισμός	O	R
EL	Αριθμός στοιχείων	y	y
NODES	Κόμβοι στοιχείων - I, J	y	y
MAT	Ιδιότητες του στοιχείου	Y	Y
VOLU:	Ο όγκος του στοιχείου	N	y
XC, YC	Η θέση στην οποία αναφέρονται τα αποτελέσματα	y	3
TEMP	Η θερμοκρασία T1, T2, T3, T4	Y	Y
PRES	Η πίεση P1 στους κόμβους I,J OFFST1 at I,J; P2 at I, J OFFST2 at I, J; P3 at I; P4 at J	Y	Y
SDIR	Η αξονική άμεση πίεση	1	1
SBYT	Η καμπτική τάση στο στοιχείο + Y στην πλευρά του δοκού	1	1
SBYB	Η καμπτική τάση στο στοιχείο -Y στην πλευρά της δοκού	1	1
SMAX	Η μέγιστη τάση (άμεση τάση + εφαρμόζοντας τάση)	1	1
SMIN	Η ελάχιστη τάση (άμεση τάση - εφαρμόζοντας τάση)	1	1
EPELOIR	Η αξονική ελαστική τάση στο τέλος	1	1
EPELBYT	Η κάμψη της ελαστικής τάσης στο στοιχείο + Y στην πλευρά της δοκού	1	1
EPELBYB	Η κάμψη της ελαστικής τάσης στο στοιχείο - Y στην πλευρά της δοκού	1	1
ERTHDIR	Αξονική θερμική τάση στο τέλος	1	1
ERTHBYT	Κάμψη της θερμικής τάσης στο στοιχείο + Y στην πλευρά της δοκού	1	1
ERTHBYB	Κάμψη της θερμικής τάσης στο στοιχείο - Y στην πλευρά της δοκού	1	1
EPINAXL	Η αρχική αξονική τάση στο στοιχείο	1	1
MFOR(X, Y)	Οι δυνάμεις μελών στη συντεταγμένη στοιχείων Σύστημα X και Y κατεύθυνση	2	Y
MMOMZ	Η ροπή στο τοπικό σύστημα αξόνων στην κατεύθυνση Z	2	Y

Πίνακας 4-2: BEAM3-1 BEAM3 Ορισμοί δημιουργία στοιχείων

Είτε οι στήλες O ή R δείχνει ότι το στοιχείο είναι πάντα διαθέσιμο, ένας αριθμός αναφέρεται σε μια υποσημείωση που περιγράφει τότε το στοιχείο είναι υπό όρους διαθέσιμο, και a - δείχνει ότι το στοιχείο δεν είναι διαθέσιμο.

1. Το στοιχείο επαναλαμβάνει για το τέλος I, ενδιάμεσες θέσεις (δείτε KEYOPT (9)), και τέλος J.
2. Εάν KEYOPT (6) =1.
3. Διαθέσιμη μόνο το κέντρο μάζας ως * GET στοιχείο.

Το στοιχείο δοκού μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή διατομής για την οποία μπορεί να υπολογιστεί η ροπή αδράνειας. Εντούτοις, οι τάσεις καθορίζονται σαν η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα στην ακραία ίνα που είναι στη μισή του ύψους.

Το ύψος των στοιχείων χρησιμοποιείται μόνο στην κάμψη και στους θερμικούς υπολογισμούς πίεσης. Η εφαρμοσμένη θερμική κλίση θεωρείται γραμμική πέρα από το ύψος και κατά μήκος του στοιχείου. Το στοιχείο των δοκών πρέπει να βρεθεί στο επίπεδο x-y και δεν πρέπει να έχει μηδενικό μήκος ή περιοχή. Η ροπή αδράνειας μπορεί να είναι μηδέν εάν δεν χρησιμοποιούνται μεγάλες παραμορφώσεις.

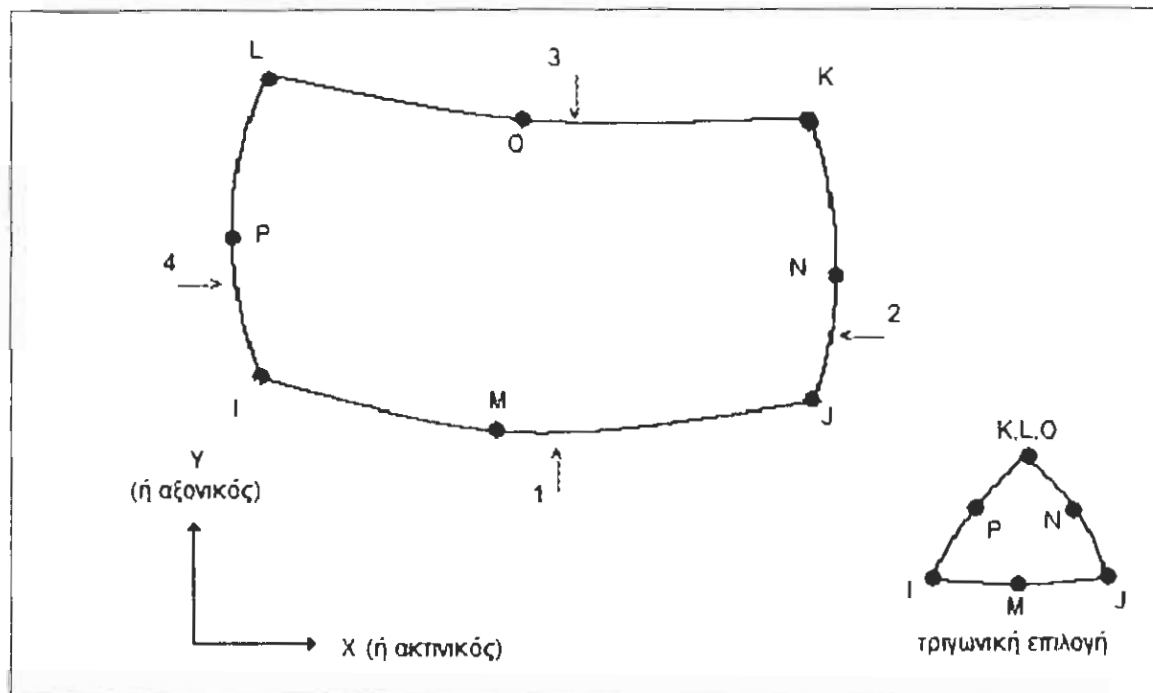
4.3.2 Περιγραφή του επίπεδου οκτακομβικού στοιχείου (PLANE82)

Το στοιχείο PLANE82 είναι υψηλότερου βαθμού παρεμβολής του δισδιάστατου, τετρακομβικού στοιχείου (PLANE42). Παρέχει ακριβέστερα αποτελέσματα για τα μικτά (τετράπλευρα-τριγωνικά) αυτόματα πλέγματα και μπορεί να εφαρμοστεί για πλέγματα με περίπλοκα σχήματα επιφανειών χωρίς μεγάλη απώλεια της ακρίβειας. Τα στοιχεία 8-κόμβων έχουν συμβατές μορφές μετατοπίσεων και είναι καλά προσαρτημένα για να διαμορφώσουν τα κυρτά όρια κατά την μοντελοποίηση του προτύπου.

Το στοιχείο 8-κόμβων καθορίζεται από οκτώ κόμβους που έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y. Το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επίπεδο ή ως αξονοσυμμετρικό. Το στοιχείο αυτό συμπεριλαμβάνει πλαστικότητα, ερπυσμό, διόγκωση, ακαμψία, μεγάλη παραμόρφωση, και μεγάλες ικανότητες στην πίεση όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4-8.

Η γεωμετρία, οι θέσεις των κόμβων και το τοπικό σύστημα αξόνων γι' αυτό το στοιχείο παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-8. Ένα τριγωνικό-τροποποιημένο στοιχείο

μπορεί να διαμορφωθεί με τον καθορισμό του ίδιου αριθμού κόμβων για τους κόμβους K, I, και O. Ένα παρόμοιο, αλλά με 6-κόμβους, τριγωνικό στοιχείο είναι το *PLANE2*. Εκτός από τους κόμβους, τα στοιχεία εισόδου περιλαμβάνουν το πάχος (TK) (για την επιλογή *επίπεδης έντασης* στοιχείου μόνο) και τις *ορθοτροπικές* ιδιότητες του υλικού. Οι ορθοτροπικές κατευθύνσεις του υλικού αντιστοιχούν στις κύριες κατευθύνσεις του στοιχείου.



Σχ 4-8: Χαρακτηριστικά του οκτακομβικού στοιχείου *PLANE82*

Οι πιέσεις μπορούν να εισαχθούν ως *επιφανειακά φορτία* στις πλευρές των στοιχείων όπως παρουσιάζονται από τους αριθμούς στο σχήμα 4-8. Οι θετικές πιέσεις ενεργούν προς το στοιχείο. Οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις μπορούν να εισαχθούν ως φορτία στους κόμβους. Ο κόμβος I με θερμοκρασία $T(I)$ προκαθορίζεται στην εντολή TUNIF. Εάν όλες οι άλλες θερμοκρασίες είναι απροσδιόριστες, θα προκαθορίζουν στο $T(I)$. Εάν όλες οι θερμοκρασίες των γωνιακών κόμβων διευκρινίζονται τότε κάθε θερμοκρασία κόμβου μέσης κλίμακας προκαθορίζει τη μέση θερμοκρασία των παρακείμενων γωνιακών κόμβων. Για οποιοδήποτε άλλο προφίλ θερμοκρασιών, απροσδιόριστες τιμές των εξ ορισμού ορίζονται με την εντολή TUNIF. Παρόμοιες

προεπιλογές ορίζονται και για τις ροές της θερμότητας εκτός που χρησιμοποιείται το μηδέν στη θέση της TUNIF.

Οι κομβικές *συγκεντρωτικές δυνάμεις* πρέπει, ενδεχομένως, να εισαχθούν ανά μονάδα βάθους για μια επίπεδη ανάλυση (εκτός από KEYOPT (3) = 3) και σε πλήρη βάση 360° για μια αξονοσυμμετρική ανάλυση. Οι παράμετροι KEYOPT (5) και KEYOPT παρέχουν τις διάφορες επιλογές εντόπων στοιχείων.

Τα αποτελέσματα που συνδέονται με αυτό το στοιχείο είναι σε δύο μορφές:

- κομβικές μετατοπίσεις που περιλαμβάνονται στη γενική κομβική λύση
- πρόσθετα αποτελέσματα του στοιχείου

Διάφορα στοιχεία διευκρινίζονται στο σχήμα 4-9

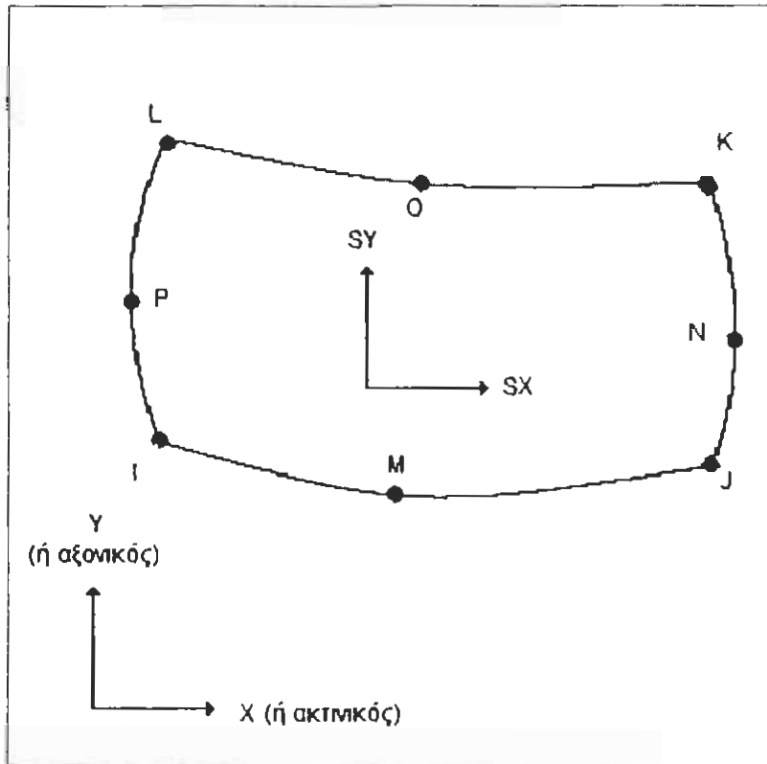
Οι κύριες κατευθύνσεις των τάσεων του στοιχείου είναι παράλληλες στο τοπικό σύστημα αξόνων του στοιχείου. Οι επιφανειακές τάσεις είναι καθορισμένες παράλληλες και κάθετες στην πλευρά ΙJ (και στην πλευρά ΚΙ.) και κατά μήκος του ζ-άξονα για επίπεδη ανάλυση ή στην εφαπτομενική κατεύθυνση για μια αξονοσυμμετρική ανάλυση.

Περιγραφή	Ονόματα της παραγωγής στοιχείων	O	R
Μη γραμμική Επίλυση σε ένα σημείο ολοκλήρωσης.	EPPL, EPEO, SRAT, SEPL, HPRES, EPCR, EPSW	1	-
Επίλυση των τάσεων σε ένα σημείο ολοκλήρωσης	TEMP, SINT, SEOV, EPEL, S	2	-
Κομβική επίλυση των τάσεων	TEMP, S, SINT, SEOV	3	-

1. Αποτελέσματα σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης, εάν το στοιχείο έχει ένα μη γραμμικό υλικό και KEYOPT(6) = 3
2. Αποτελέσματα σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης, εάν KEYOPT(5) = 1
3. Αποτελέσματα σε κάθε κόμβο, εάν KEYOPT(5) = 2

Το εμβαδόν του στοιχείου πρέπει να είναι ένας θετικός αριθμός. Το στοιχείο

πρέπει να τοποθετείται σε ένα καθολικό $X - Y$ επίπεδο όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4-9, ο άξονας- Y πρέπει να είναι ο άξονας συμμετρίας για τις αξονοσυμμετρικές αναλύσεις. Μια αξονοσυμμετρική κατασκευή πρέπει να μοντελοποιηθεί στο $+ X$ τεταρτημόριο. Μια πλευρά με έναν αφαιρούμενο μεσαίο κόμβο συνεπάγεται ότι η μετατόπιση μεταβάλλεται γραμμικά, κατά μήκος της πλευράς.

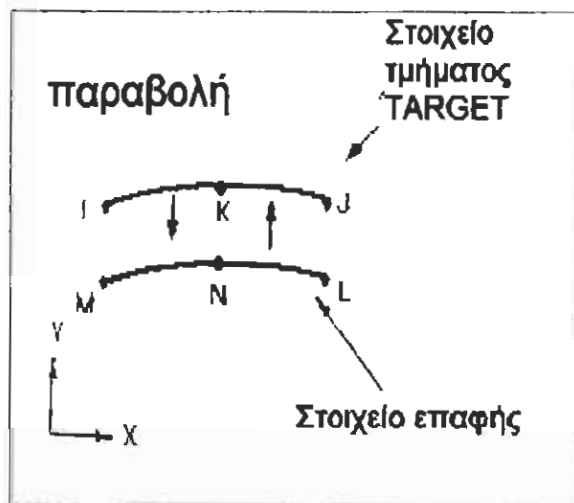


Σχ. 4-9: Αποτελέσματα των τάσεων για το στοιχείο PLANE82

4.2.4 Το στοιχείο στόχου (TARGET169 2-D Target Segment)

Το στοιχείο TARGET 169 χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύσει διάφορες δισδιάστατες (2-D) άκαμπτες επιφάνειες " TARGET " και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα στοιχεία επαφής CONTA171 και CONTA172. Τα στοιχεία επαφών τοποθετούνται στην επιφάνεια των στερεών στοιχείων περιγράφοντας το όριο ενός παραμορφώσιμου σώματος και είναι η ενδεχόμενη επαφή με κάποια άκαμπτη επιφάνεια TARGET, καθορισμένη από το στοιχείο TARGET169. Αυτή η επιφάνεια TARGET διακριτικοποιείται από ένα σύνολο ευθύγραμμων στοιχείων TARGET

(TARGET169) και είναι ταξινομημένη κατά ζεύγος με τη σχετική επιφάνεια επαφών του δια ένα κοινό πραγματικό σταθερό σύνολο. Αυτά τα στοιχεία μπορούν εύκολα να διαμορφώσουν σύνθετες TARGET επιφάνειες. Μπορούμε να επιβάλουμε οποιοδήποτε μετατροπή ή περιστροφική μετατόπιση στο στοιχείο του τμήματος TARGET. Μπορούμε επίσης να επιβάλουμε τις δυνάμεις και τις ορμές στα άκαμπτα στοιχεία TARGET. Για περισσότερες λεπτομέρειες για αυτό το στοιχείο, δείτε το τμήμα 14,169 στο ANSYS Theory Reference. Για να αντιπροσωπεύσει επιφάνειες τρισδιάστατες 3-D TARGET, χρησιμοποιείτε το στοιχείο TARGET170, στοιχεία τμήματος 3-D TARGET.



Σχ. 4-10: Στοιχείο στόχου της επιφάνειας (TARGET169)

Η επιφάνεια TARGET διαμορφώνεται μέσω ενός συνόλου τμημάτων TARGET από διάφορα τμήματα TARGET που περιλαμβάνουν μια επιφάνεια TARGET. Κάθε τμήμα TARGET είναι ένα ενιαίο στοιχείο με μια συγκεκριμένη μορφή. Οι μορφές αυτές καθορίζονται από έναν, δύο, ή τρεις κόμβους και ένας κώδικας μορφής των στόχων [TSHAP] και περιγράφονται στον πίνακα 4-3. Η εντολή TSHAP δείχνει τη γεωμετρία (μορφή) του στοιχείου. Οι διαστάσεις του τμήματος καθορίζονται από μια πραγματική σταθερά (R 1), και η θέση του τμήματος καθορίζεται από τους κόμβους. Το ANSYS υποστηρίζει έξι δισδιάστατου τύπου τμήματος. βλέπε πίνακα 4-3

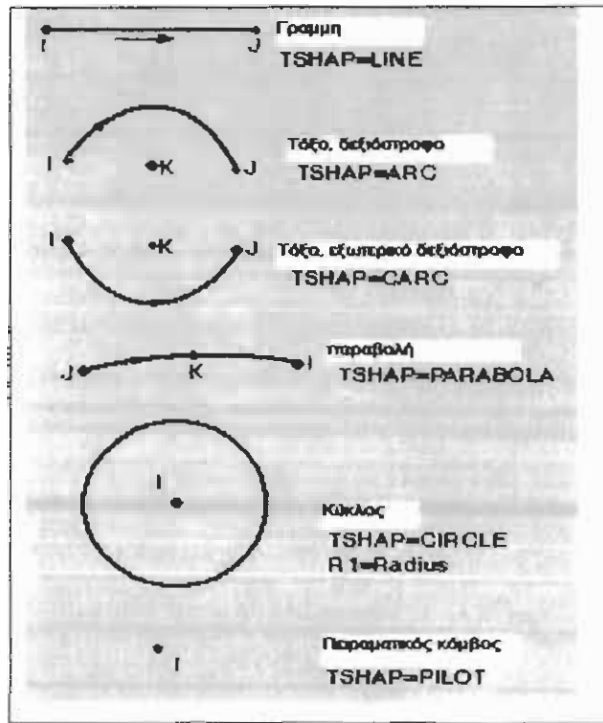
TSH AP	ΤΥΠΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΚΟΜΒΟΣ 1 (DOF)	ΚΟΜΒΟΣ 2 (DOF)	ΚΟΜΒΟΣ 3 (DOF)	R1	R2
LINE	straight line	1 st γωνία pt (UX,UY)	2 nd γωνία pt (UX,UY)	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ
ARC	Arc, clockwise	1 st γωνία pt (UX,UY)	2 nd γωνία pt (UX,UY)	Κέντρο κύκλων pt (UX,UY)	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ
CAR C	Arc, counterclockwise	1 st γωνία pt (UX,UY)	2 nd γωνία pt (UX,UY)	Κέντρο κύκλων pt (UX,UY)	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ
PAR A	parabola	1 st γωνία pt (UX,UY)	2 nd γωνία pt (UX,UY)	Μέση πλευρά pt (UX,UY)	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ
CIRC	circle	Κέντρο κύκλων pt (UX,UY, ROTZ)	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ		ΚΑΝΕΝΑ
PILO	Pilot node	2-D: UX,UY, ROTZ.	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ	ΚΑΝΕΝΑ

Πίνακας 4-3: Τύποι τμήματος, Target Κώδικες μορφής, και κόμβοι

1. Όταν δημιουργείται ένας κύκλος μέσω της άμεσης παραγωγής πρέπει να καθορίζεται την πραγματική σταθερά R1 πριν να δημιουργηθεί το στοιχείο.

Ο πιλοτικός κόμβος παρέχει έναν κατάλληλο, δυναμικό τρόπο για να προσδιοριστούν τα περιοριστικά όρια των συνθηκών όπως οι περιστροφές οι μετατοπίσεις και οι αποκλίσεις σε μια επιφάνεια στόχων. Ορίζουμε τις συνθήκες μόνο στον πιλοτικό κόμβο, εξαλείφοντας την απαίτηση να προσδιοριστούν οι συνθήκες στα όρια σε κάθε κόμβο και να μειώσουμε την πιθανότητα λάθους. Ο πιλοτικός κόμβος, αντίθετα από τους άλλους τύπους τμήματος, χρησιμοποιείται για να καθορίσει τους βαθμούς ελευθερίας για ολόκληρη την επιφάνεια των στοιχείων του στόχου. Αυτός ο κόμβος μπορεί να είναι οποιοσδήποτε από τους κόμβους επιφάνειας στόχων, αλλά δεν είναι απαραίτητο και να είναι. Για το τμήμα κύκλων, το ANSYS θέτει τον πρώτο κόμβο ως πιλοτικός. Επίσης το ANSYS δεν θα επιτρέψει έναν πρόσθετο πιλοτικό κόμβο για αυτόν τον τύπο τμήματος. Όλες οι πιθανές άκαμπτες κινήσεις της επιφάνειας στόχων θα είναι ένας συνδυασμός μετατοπίσεων και ροπών και μιας περιστροφής γύρω από τον πιλοτικό κόμβο. Οι οριακές συνθήκες (συμπεριλαμβανομένης της μετατόπισης,

περιστροφής, δύναμης και απόκλισης) της επιφάνειας των στοιχείων του στόχου μπορούν να διευκρινιστούν μόνο στους πιλοτικούς κόμβους.



Σχ. 4-11: Τύποι τμημάτων για το στοιχείο στόχου TARGET169 2-D.

Για οποιοδήποτε καθορισμένη επιφάνεια στόχων, η εντολή κόμβου του στοιχειώδους τμήματος στόχου είναι κρίσιμη για την κατάλληλη ανίχνευση της επαφής. Οι κόμβοι πρέπει να διαταχθούν έτσι ώστε, για μια 2-D επιφάνεια, τα σχετικά στοιχεία επαφών (CONTA171) ή (CONTA172) πρέπει να βρίσκονται δεξιά της επιφάνειας στόχων κατά την κίνηση από τον κόμβο I προς τον κόμβο J. Για έναν 2-D πλήρη κύκλο, η επαφή πρέπει να εμφανιστεί έξω από τον κύκλο. Η εσωτερική επαφή δεν επιτρέπεται. Για τις απλές επιφάνειες στόχων, μπορείτε να καθορίσετε τα στοιχειώδη τμήματα στόχων χωριστά από την άμεση παραγωγή. Γενικά για 2-D επιφάνειες, τα στοιχειώδη τμήματα στόχων μπορούν να καθοριστούν από το δίκτυο γραμμών (LMESH) ή με την παραγωγή των στοιχείων κατά μήκος των ορίων ενός υπάρχοντος πλέγματος (ESURF). Μπορείτε επίσης να χρησιμοποιήσετε πλέγμα σημείου (KMESH) για να παραχθεί ο πιλοτικός κόμβος. Ο στόχος και η σχετική επιφάνεια επαφών προσδιορίζονται μέσω ενός κοινού πραγματικού σταθερού συνόλου. Αυτό το

πραγματικό σταθερό σύνολο περιλαμβάνει όλες τις πραγματικές σταθερές και για τα στοιχεία στόχων αλλά και επαφών. Η πραγματική σταθερά R1 καθορίζει τις διαστάσεις της μορφής των στόχων. Για τις περιγραφές των υπόλοιπων πραγματικών σταθερών, βλέπε CONTA171 και CONTA172.

Κάθε επιφάνεια στόχου μπορεί να συνδεθεί με μόνο μια επιφάνεια επαφών, και αντίστροφα. Εντούτοις, διάφορα στοιχεία επαφών θα μπορούσαν να αποτελέσουν την επιφάνεια επαφών και να έρθουν έτσι σε επαφή με την ίδια επιφάνεια στόχου. Επιπλέον, διάφορα στοιχεία στόχων θα μπορούσαν να αποτελέσουν την επιφάνεια αυτή και να έρθουν έτσι σε επαφή με την ίδια επιφάνεια επαφών. Και για την επιφάνεια στόχου αλλά και την επιφάνεια επαφών, μπορούν να τοποθετηθούν πολλά στοιχεία σε μια ενιαία επιφάνεια στόχου ή επαφών, αλλά έχοντας αυτές τις δυνατότητες αυξάνεται έτσι το υπολογιστικό κόστος. Για ένα αποδοτικότερο πρότυπο, εντοπίζουμε τις επιφάνειες επαφών και στόχων με το διαχωρισμό των μεγάλων επιφανειών σε μικρότερες επιφάνειες στόχων και επαφών, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει λιγότερα στοιχεία. Επίσης, κάθε 2-D πλήρης κύκλος πρέπει, ιδανικά, να οριστεί ως μια *επιφάνεια στόχων*.

Εάν περισσότερες από μια επιφάνειες στόχων θα έρθουν σε επαφή με το ίδιο όριο στερεών στοιχείων, πρέπει να καθορίσετε διάφορες επιφάνειες επαφών που μοιράζονται την ίδια γεωμετρία αλλά αφορούν τους χωριστούς στόχους. Πάλι, οι 2-D πλήρεις κύκλοι πρέπει να οριστούν ως μεμονωμένες επιφάνειες στόχων. Εάν προγραμματίζετε να παραγάγετε τα στοιχεία TARGET169 μέσω της άμεσης παραγωγής, πρέπει πρώτα να καθορίσετε τον κώδικα μορφής για το στοιχείο. Ο κώδικας μορφής καθορίζεται μέσω της εντολής TSHAP. Κατά τη δημιουργία των κύκλων μέσω της άμεσης παραγωγής, πρέπει να καθορίσετε την πραγματική σταθερά R1 πριν από τη δημιουργία του στοιχείου. Εάν τα στοιχεία TARGET169 θα δημιουργηθούν μέσω του προγράμματος δικτύου (LMESH, ESURF), τότε το ANSYS επιλέγει τους σωστούς κώδικες μορφής αυτόματα.

4.3 Υποθέσεις και ορισμοί παραγωγής των στοιχείων

Το δισδιάστατο στοιχείο 2-D τμήματος είναι καθορισμένο στο επίπεδο X-Y. Για κυκλικά τόξα, ο τρίτος κόμβος καθορίζει το πραγματικό κέντρο του κύκλου και πρέπει να καθοριστεί ακριβώς όταν το στοιχείο παράγεται και κινείται ταυτόχρονα με τους άλλους κόμβους κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραμόρφωσης, εάν ο τρίτος κόμβος δεν είναι συμβατός με τους άλλους κόμβους, το τόξο θα μεταβληθεί κατά την κίνηση του κόμβου. Για να εξασφαλίσουμε τη σωστή συμπεριφορά, εφαρμόζουμε όλες τις συνοριακές συνθήκες στον πιλοτικό κόμβο. Για το παραβολικό τόξο, το τρίτο σημείο πρέπει να βρεθεί στη μέση της παραβολής. Για το κυκλικό τμήμα, το ANSYS χρησιμοποιεί τον πρώτο κόμβο σαν πιλοτικό κόμβο. Δεν πρέπει να ορίζουμε έναν επιπρόσθετο πιλοτικό κόμβο και δεν μπορούν να εφαρμοστούν εξωτερικές δυνάμεις στους κόμβους των στόχων εκτός από έναν πιλοτικό κόμβο, και δεν μπορούμε να αλλάξουμε τις πραγματικές σταθερές R1 ή τις ιδιότητες των στοιχείων μεταξύ των βημάτων φορτίσης ή κατά τη διάρκεια μιας νέας αρχής. Κατά τη χρησιμοποίηση της άμεσης παραγωγής για τους κύκλους η πραγματική σταθερά R1 πρέπει να οριστεί πριν την εισαγωγή των κόμβων. Εάν ένας πιλοτικός κόμβος ορίζεται για μια επιφάνεια στόχων, το ANSYS αγνοεί τις οριακές συνθήκες στους κόμβους της επιφάνειας στόχων εκτός από τους πιλοτικούς κόμβους, δεν μπορείτε να χρησιμοποιήσουμε αμφότερες τις εξισώσεις περιορισμών (ή τη σύζευξη) και τους πιλοτικούς κόμβους.

Κεφάλαιο 5^ο

Δημιουργία Προτύπων με το πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ANSYS¹

5.1 Εισαγωγικά

Στο δεύτερο μέρος του μαθήματος διδάσκετε ο τρόπος επίλυσης προβλημάτων με το πρόγραμμα ANSYS. Με το εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ο μηχανικός μπορεί να επιλύσει όλα τα προβλήματα που συναντώνται σε θέματα Μηχανολόγων, Πολιτικών Μηχανικών και σε οποιαδήποτε άλλη επιστήμη. Το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων ANSYS δίνει τη δυνατότητα στους Μηχανικούς να πραγματοποιήσουν τους ακόλουθους στόχους:

- Να δημιουργήσουν *υπολογιστικά πρότυπα* ή να μεταφέρουν πρότυπα των κατασκευών από το CAD, συστημάτων, συνιστωσών ή τμημάτων μιας κατασκευής.
- Να εφαρμόσουν φορτία ή άλλες συνθήκες στην υπό ανάλυση κατασκευή.
- Να μελετήσουν τις φυσικές αποκρίσεις, π.χ. τάσεις, κατανομές θερμοκρασίας ή την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.
- Να βελτιστοποιήσουν μια κατασκευή στα αρχικά στάδια ανάπτυξής της με σκοπό να ελαττώσει το κόστος παραγωγής.
- Να πραγματοποιήσουν πρότυπα πειράματα σε συνθήκες περιβάλλοντος όπου αυτό πιθανόν να ήταν ανεπιθύμητο ή αδύνατο.
- Το πρόγραμμα ANSYS επικοινωνεί με γραφικά (GUI) για να παρέχει στο χρήστη εύκολη λειτουργία των συναρτήσεων του προγράμματος, εντολές, περιγραφή και υλικό αναφοράς. Ένας κατάλογος βοηθά τους χρήστες να επικαλεστούν βοήθεια μέσα από το πρόγραμμα ANSYS. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει δεδομένα χρησιμοποιώντας το ποντίκι, το πληκτρολόγιο ή ένα συνδυασμό και των δύο.

¹ Π.Α. Κακαβάς, Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, ΤΕΙ Πάτρα (2003)

5.2 Προτυποποίηση προβλήματος με το ANSYS

Η προτυποποίηση προβλημάτων με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS αποσκοπεί στην μαθηματική επαναδημιουργία της συμπεριφοράς ενός πραγματικού προβλήματος. Με άλλα λόγια, η ανάλυση πρέπει να είναι ένα ακριβές μαθηματικό πρότυπο ενός φυσικού προτύπου. Με την ευρεία έννοια αυτό το πρότυπο συμπεριλαμβάνει όλους τους κόμβους, στοιχεία, ιδιότητες των υλικών, σταθερές, οριακές συνθήκες και άλλα χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν το φυσικό σύστημα.

Στην ορολογία του ANSYS ο όρος δημιουργία προτύπου συνήθως σημαίνει τη δημιουργία κόμβων και στοιχείων τα οποία αντιπροσωπεύουν τον όγκο και την σύνδεση με το φυσικό πρόβλημα. Οπότε, η δημιουργία προτύπου σ' αυτό το κεφάλαιο σημαίνει η διαδικασία ορισμού της γεωμετρικής παράστασης των κόμβων και στοιχείων του προτύπου. Το πρόγραμμα ANSYS προσφέρει στο χρήστη τις ακόλουθες δυνατότητες στη δημιουργία προτύπου:

- Δημιουργία ενός στερεού προτύπου μέσα στο ANSYS.
- Χρησιμοποιώντας άμεση δημιουργία προτύπου.
- Εισάγοντας ένα πρότυπο το οποίο δημιουργείται σε ένα CAD σύστημα.

Τα βήματα που περιλαμβάνονται στη δημιουργία προτύπου με το ANSYS είναι τα κάτωθι:

- Αρχίζουμε με το σχεδιασμό, δηλαδή ορίζουμε τους σκοπούς, αποφασίζουμε για το βασικό τύπο που θα έχει το πρότυπο, τον κατάλληλο τύπο των στοιχείων, και θα αποφασίσουμε πως πρέπει να δημιουργηθεί το κατάλληλο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.
- Εισάγουμε τον *προεπεξεργαστή* (preprocessor) για να αρχίσει τη δημιουργία του προτύπου. Συχνά, θα δημιουργήσουμε το πρότυπο χρησιμοποιώντας τη διαδικασία *προτυποποίησης* στερεού.
- Καθορίζουμε το επίπεδο εργασίας.
- Δημιουργούμε βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας γεωμετρικά primitives και τελεστές Boolean.

- Ενεργοποιούμε το κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων.
- Δημιουργούμε άλλα χαρακτηριστικά του στερεού προτύπου από το τέλος προς την αρχή, δηλαδή δημιουργούμε σημεία κλειδιά και κατόπιν ορίζουμε γραμμές, επιφάνειες και όγκους.
- Χρησιμοποιούμε περισσότερο τελεστές Boolean ή αριθμητικούς ρυθμιστές για να ενώσουμε τα χωριστά τμήματα του υπό ανάλυση προτύπου.
- Δημιουργούμε πίνακες των χαρακτηριστικών των στοιχείων, π.χ. τύπο στοιχείων, σταθερές, ιδιότητες των υλικών και συστήματα συντεταγμένων.
- Θέτουμε ρυθμιστές για τη δημιουργία του πλέγματος για να προσδιορίσουμε την επιθυμητή πυκνότητα του πλέγματος.
- Δημιουργούμε κόμβους και στοιχεία φτιάχνοντας το πλέγμα του προτύπου.
- Εφ' όσον έχουμε δημιουργήσει τους κόμβους και τα στοιχεία, προσθέτουμε χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα, στοιχεία επαφής μεταξύ επιφανειών που έρχονται σε επαφή, αλληλοσυνδεόμενους βαθμούς ελευθερίας και οριακές εξισώσεις.
- Αποθηκεύονται τα δεδομένα του προτύπου σε ένα φάκελο με κωδικό *.db
- Εξέρχουμε από τον προεπεξεργαστή

5.3 Σύγκριση της στερεάς προτυποποίησης και της άμεσης δημιουργίας προτύπου

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο διαφορετικές μεθόδους για να δημιουργήσουμε το πρότυπο (1) στερεό πρότυπο και (2) άμεση δημιουργία. Με το στερεό πρότυπο περιγράφουμε τις γεωμετρικές οριακές συνθήκες του προτύπου, καθορίζουμε ρυθμιστές για το μέγεθος και το επιθυμητό σχήμα των στοιχείων και τότε καλούμε το πρόγραμμα ANSYS να δημιουργήσει αυτόματα τους κόμβους και τα στοιχεία. Σε αντίθεση, με την απ' ευθείας μέθοδο δημιουργίας στοιχείων ορίζουμε τη θέση κάθε κόμβου και το μέγεθος, σχήμα και σύνδεσμο κάθε στοιχείου πριν ορίσουμε αυτές τις ιδιότητες στο ANSYS πρότυπο.

Μολονότι είναι δυνατόν η αυτόματη δημιουργία κάποιων δεδομένων, η μέθοδος της απ' ευθείας δημιουργίας του πλέγματος είναι βασικά μια μη αυτόματη μέθοδος η οποία απαιτεί να παρακολουθήσει όλους τους κόμβους καθώς δημιουργείται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η λεπτομερής εγγραφή μπορεί να γίνει επίπονη για μεγάλα πρότυπα. Η στερεά προτυποποίηση είναι συνήθως περισσότερο δυναμική και διαδεδομένη απ' ότι η απ' ευθείας μέθοδος δημιουργίας του πλέγματος, και είναι η κύρια μέθοδος για τη δημιουργία του προτύπου.

Σ' αντίθεση των πολλών προτερημάτων της στερεάς προτυποποίησης, μπορούμε κατά διαστήματα να απαριθμήσουμε περιπτώσεις όπου η απ' ευθείας μέθοδος είναι περισσότερο χρήσιμη. Μπορούμε να εναλλάσσουμε μεταξύ της μεθόδου απ' ευθείας δημιουργίας προτύπων και της στερεάς προτυποποίησης χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές κατάλληλες να ορίσουμε διαφορετικά τμήματα του προτύπου.

5.3.1 Στερεά προτυποποίηση

Από την θετική πλευρά, η στερεά προτυποποίηση

- Είναι γενικά κατάλληλη για μεγάλα ή περίπλοκα πρότυπα, ιδιαίτερα 3-D πρότυπα στερεών όγκων
- Επιτρέπει να εργαστούμε με ένα σχετικά μικρό αριθμό δεδομένων
- Επιτρέπει γεωμετρικές λειτουργίες οι οποίες δεν μπορούν να γίνουν με κόμβους και στοιχεία
- Υποβαστάζει τη χρήση των κύριων επιφανειών και όγκων και τελεστών Boolean για την κατασκευή του προτύπου
- Απαιτείται με το σκοπό να δημιουργήσει επιφανειακή πύκνωση του πλέγματος εφ' όσον έχουν εφαρμοστεί τα φορτία
- Εύκολα επιτρέπει την τροποποίηση της γεωμετρίας
- Μπορεί να μεταβάλλει εύκολα την κατανομή των στοιχείων

Οπωσδήποτε, η στερεά προτυποποίηση

- Μερικές φορές απαιτεί μεγάλους CPU χρόνους
- Μερικές φορές μπορεί να είναι επίπονη, απαιτώντας να εισαχθούν περισσότερα δεδομένα απ' ότι στην απ' ευθείας μέθοδο.

- Μπορεί να αποτύχει κάτω υπό ορισμένες περιπτώσεις

5.3.2 Απ' ευθείας δημιουργία του προτύπου

Από τη θετική πλευρά, η απ' ευθείας δημιουργία προτύπου (1) είναι βολική για μικρά ή μεγάλα πρότυπα και (2) παρέχει στο χρήστη πλήρη έλεγχο σε όλη τη γεωμετρία και αρίθμηση κάθε κόμβου και στοιχείου. Αλλά η μέθοδος της απ' ευθείας δημιουργίας προτύπου

- Συνήθως απαιτεί πολύ χρόνο για όλα ακόμη και για απλά μοντέλα
- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με adaptive πλέγμα.
- Κάνει δυσκολότερο τον βέλτιστο σχεδιασμό.
- Κάνει δύσκολο την τροποποίηση του πλέγματος
- Μπορεί να γίνει επίπονος, απαιτώντας από τον χρήστη να δώσει μεγάλη προσοχή σε κάθε λεπτομέρεια του πλέγματος

5.4 Επιλογή του τύπου ενός προτύπου (2-D, 3-D, κ.λπ.)

Το πρότυπο των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να τεθεί στην κατηγορία των προβλημάτων 2-D ή 3-D και ότι συντίθεται από σημειακά, γραμμικά, επιφανειακά ή στερεά στοιχεία. Φυσικά μπορούμε να αναμείξουμε διαφορετικά είδη στοιχείων ανάλογα με την απαίτηση του προβλήματος. Για παράδειγμα, μπορεί να προτυποποιήσουμε μια σκληρότερη κελυφωτή κατασκευή με τη χρήση 3-D κελυφωτών στοιχείων και 3-D στοιχείων δοκού για να παραστήσουν τις πλευρές. Η επιλογή των διαστάσεων του προτύπου και το είδος των στοιχείων συχνά ορίζει ποια μέθοδος του δημιουργούμενου προτύπου θα είναι περισσότερο πρακτική για το πρόβλημα.

Για γραμμικά πρότυπα μπορούν να παραστήσουν 2-D και 3-D κατασκευές από δοκούς ή σωλήνες, καθώς 2-D πρότυπα των 3-D αξονοσυμμετρικών κελυφωτών κατασκευών. Στερεά προτυποποίηση δεν προσφέρει συνήθως πολλά πλεονεκτήματα για τη δημιουργία γραμμικών προτύπων. Συνήθως δημιουργούνται με την απ' ευθείας δημιουργία προτύπων. Τα 2-D στερεά πρότυπα χρησιμοποιούνται για λεπτές επίπεδες κατασκευές (επίπεδης έντασης) απείρου μήκους κατασκευές οι οποίες έχουν σταθερή

διατομή (επίπεδης παραμόρφωσης) ή αξονοσυμμετρικές στερεές κατασκευές. Μολονότι η ανάλυση ενός προβλήματος με 2-D στοιχεία είναι σχετικά εύκολη με την εφαρμογή της απ' ευθείας δημιουργίας προτύπων, είναι συνήθως ευκολότερη να γίνει με στερεά στοιχεία.

Τα 3-D κελυφωτά πρότυπα χρησιμοποιούνται για λεπτές κατασκευές στο 3-D χώρο. Μολονότι, κάποια 3-D πρότυπα κελυφωτής ανάλυσης είναι σχετικά εύκολα να δημιουργηθούν με την απ' ευθεία μέθοδο δημιουργίας στοιχείων, είναι ευκολότερο να δημιουργηθούν με στερεά στοιχεία. Τα 3-D πρότυπα κελυφών χρησιμοποιούνται για παχιές κατασκευές στο 3-D χώρο και δεν έχουν σταθερή διατομή ή άξονα συμμετρίας. Δημιουργώντας ένα πρότυπο με 3-D στερεά ανάλυση με την επ' ευθείας μέθοδο δημιουργίας στοιχείων συνήθως απαιτεί μεγάλη προσπάθεια. Η στερεά προτυποποίηση συνήθως κάνει ευκολότερη την ανάλυση.

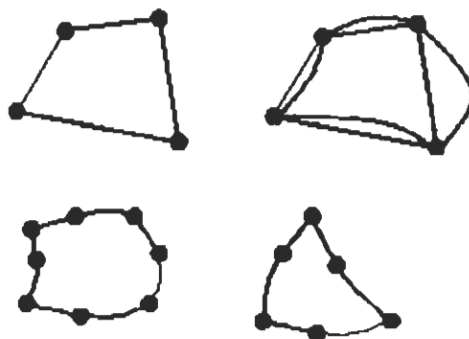
5.5 Επιλογή μεταξύ γραμμικών και υψηλότερου βαθμού στοιχείων

Η βιβλιοθήκη των στοιχείων του προγράμματος ANSYS συμπεριλαμβάνει δύο βασικούς τύπους επιφανειακών και στερεών στοιχείων: τα γραμμικά και δευτέρου βαθμού. Οι βασικοί τύποι αυτών των στοιχείων δείχνονται στο Σχήμα 5-1. Κατωτέρω θα εξετάσουμε μερικές από τις προϋποθέσεις που συμπεριλαμβάνονται στην επιλογή αυτών των βασικών τύπων στοιχείων: Οι βασικοί τύποι επιφανειακών και στερεών στοιχείων στο πρόγραμμα ANSYS είναι

- Γραμμικά ισοπαραμετρικά
- Γραμμικά ισοπαραμετρικά με επί πλέον σχήματα
- Δευτέρου βαθμού

5.5.1 Γραμμικά στοιχεία (χωρίς κόμβους στα μέσα των πλευρών)

Στην περίπτωση κατασκευαστικής ανάλυσης, τα στοιχεία με κόμβους μόνο στις κορυφές του στοιχείου με επί πλέον συναρτήσεις μορφής συνήθως οδηγούν σε μία ακριβή λύση σε λογικό υπολογιστικό χρόνο. Όταν χρησιμοποιούνται αυτά τα στοιχεία είναι σημαντικό να αποφεύγονται οι εκφυλισμένοι τύποι σε κρίσιμα στοιχεία. Δηλαδή, αποφεύγουμε να χρησιμοποιούμε τριγωνικό τύπο 2-D γραμμικών

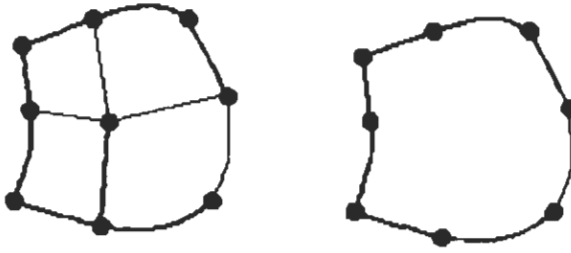


Σχ. 5-1: Επιφανειακά και Στερεά είδη στοιχείων

στοιχείων σε περιοχές μεγάλης μεταβολής κλίσης ή σε άλλες περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος. Επίσης πρέπει να προσέχουμε να μην χρησιμοποιούμε μεγάλης παραμόρφωσης γραμμικά στοιχεία. Στην μη-γραμμική κατασκευαστική ανάλυση, εάν χρησιμοποιήσουμε ένα πυκνότερο πλέγμα των γραμμικών στοιχείων επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη ακρίβεια με λιγότερο κόστος απ' ό,τι εάν χρησιμοποιήσουμε ένα αραιότερο πλέγμα στοιχείων δευτέρου βαθμού. Παραδείγματα γραμμικών και δευτέρου βαθμού στοιχείων δείχνονται στο Σχήμα 5-2.

Όταν προτυποποιούμε ένα καμπυλωτό κέλυφος πρέπει να επιλέξουμε μεταξύ καμπυλωτών (δηλ. δευτέρου βαθμού) ή επίπεδα γραμμικά στοιχεία κελύφους. Κάθε επιλογή έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για τις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις οι πλειονότητα των προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν με μεγάλη ακρίβεια με τον ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο χρησιμοποιώντας επίπεδα στοιχεία. Πρέπει φυσικά να χρησιμοποιήσουμε αρκετά επίπεδα στοιχεία για να προτυποποιήσουμε καμπύλες επιφάνειες. Όσο μικρότερα είναι τα στοιχεία τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της λύσης.

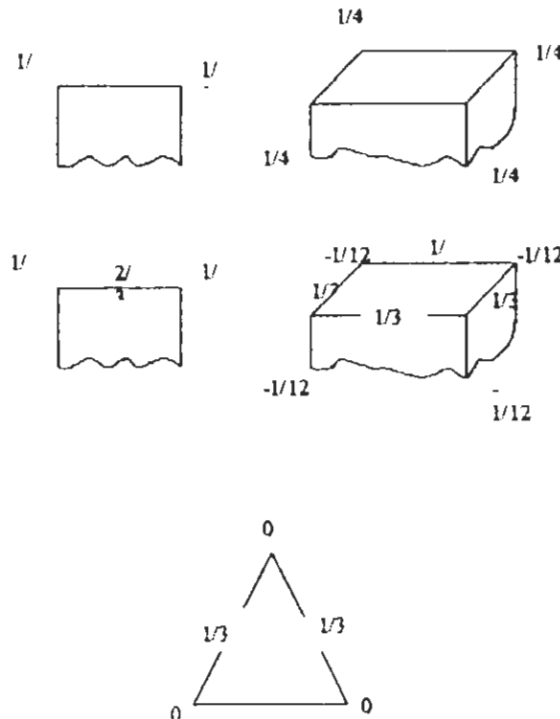
Για τις περισσότερες μη-κατασκευαστικές αναλύσεις (θερμικές, μαγνητικές, κ.λ.π.) τα γραμμικά στοιχεία είναι εξ' ίσου καλά με τα στοιχεία υψηλότερου βαθμού και είναι λιγότερο δαπανηρά στη χρήση τους. Παραμορφωμένα στοιχεία (τριγωνικά και τετραεδρικά) συνήθως παράγουν ακριβή αποτελέσματα σε μη-κατασκευαστικά προβλήματα.



Σχ. 5-2: Συγκρινόμενα πλέγματα

5.5.2 Στοιχεία δευτέρου βαθμού (κόμβοι στα μέσα των πλευρών)

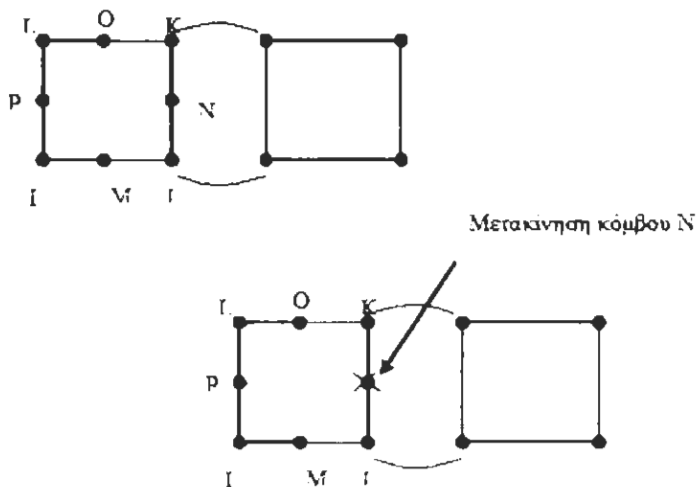
Για γραμμική κατασκευαστική ανάλυση με παραμορφωμένο σχήμα στοιχείων (δηλ. Τριγωνικά 2-D στοιχεία και τετράεδρα 3-D στοιχεία), τα δευτεροβάθμια στοιχεία θα δώσουν καλύτερα αποτελέσματα στο μικρότερο κόστος. Οπωσδήποτε, με το σκοπό να χρησιμοποιήσουμε σωστά αυτά τα στοιχεία απαιτείται να είμαστε ενημερωμένοι για ορισμένα χαρακτηριστικά



Σχ. 5-3: Ισοδύναμη κομβική κατανομή

- Κατανεμημένα φορτία και πιέσεις στις ακμές δεν κατανομούνται στους κόμβους των στοιχείων όπως γίνεται στα γραμμικά στοιχεία.

- 3-D θερμικά στοιχεία με κόμβους στα μέσα των πλευρών που υφίσταται φορτία μεταφοράς θερμότητας δια μεταφοράς έμφυτα κατανέμει τη ροή θερμότητας καθώς ρέει σε μια διεύθυνση στους κόμβους στα μέσα των πλευρών και στην άλλη διεύθυνση στους κόμβους στις κορυφές.
- Για δομικά στοιχεία, μια θερμοκρασία που ορίζεται σε ένα μέσο κόμβο ο οποίος κείται έξω από το θερμοκρασιακό πεδίο δύο παρακείμενων κόμβων στις κορυφές επαναπροσδιορίζεται με τη μέση θερμοκρασία αυτών των κόμβων στις κορυφές.
- Εφ' όσον η μάζα στους μεσαίους κόμβους είναι μεγαλύτερη απ' ότι στους κόμβους στις κορυφές, είναι συνήθως καλύτερο να πάρουμε κύριους βαθμούς ελευθερίας στους μεσαίους κόμβους. Ισοδύναμες κομβικές κατανομές ενός μοναδιαίου ομοιόμορφου επιφανειακού φορτίου είναι: (1) 2-D στοιχεία (2) 3-D στοιχεία (3) τριγωνικά 3-D στοιχεία (Σχήμα 5-3)
- Στη δυναμική ανάλυση όπου η διάδοση κυμάτων είναι του άμεσου ενδιαφέροντος τα στοιχεία με κόμβους στα μέσα των πλευρών δεν σφινιστούνται λόγω της μη-ομοιόμορφης κατανομής μάζας.
- Δεν ενδείκνυται να ορίσουμε επιφάνειες επαφής στις πλευρές με κόμβους στα μέσα των πλευρών. Παρομοίως, για θερμικά προβλήματα δεν εφαρμόζουμε δεσμούς ακτινοβολίας ή μη-γραμμικές επιφάνειες μεταφοράς στις πλευρές με μεσαίους κόμβους.



Σχ. 5-4: Αποφυγή μεσαίων κόμβων στο συνδυασμό στοιχείων

- στοιχεία τα οποία έχουν κόμβους στα μέσα των πλευρών, είναι γενικά επιθυμητό ότι τέτοιοι κόμβοι πρέπει να τοποθετούνται στην ευθεία γραμμή στο μέσο της απόστασης που συνδέει τους κόμβους στις κορυφές. Φυσικά υπάρχουν

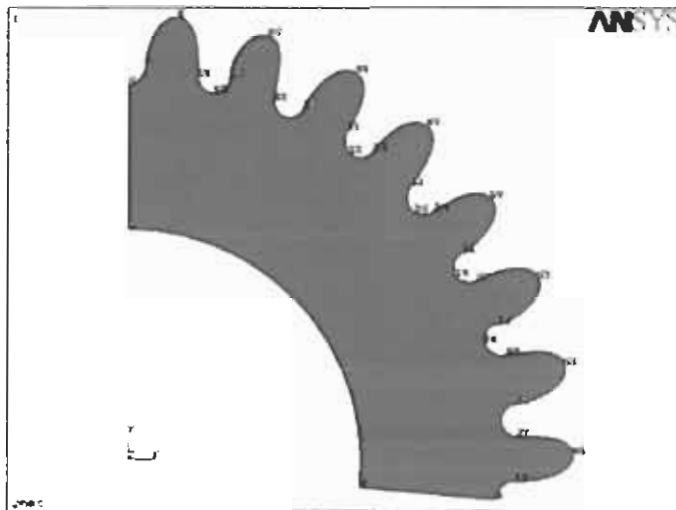
περιπτώσεις όπου άλλες θέσεις μπορούν να επιλεγούν για τους μεσαίους κόμβους, π.χ. (1) κόμβοι που ακολουθούν καμπύλα γεωμετρικά όρια συνήθως παράγουν ακριβέστερα αποτελέσματα (2) είναι δυνατόν να μιμηθούμε τα όρια μιας ρωγμής με στοιχεία *δευτέρου βαθμού σημείου* με μεσαίους κόμβους ελεύθερα τοποθετημένους εκτός του μέσου της πλευράς.

- Εάν δεν ορίσουμε μια θέση για το μεσαίο κόμβο, το πρόγραμμα αυτόματα θα τοποθετήσει το μεσαίο κόμβο ανάμεσα στους δύο γωνιακούς κόμβους με βάση μιας γραμμικής καρτεσιανής παρεμβολής.
- Συνδυαζόμενα πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων κατά μήκος της κοινής πλευράς. Όταν συνδυάζονται στοιχεία διαφορετικού τύπου είναι αναγκαίο να αφαιρέσουμε το μεσαίο κόμβο από το στοιχείο. Ο κόμβος N του οκτακομβικού στοιχείου που δείχνεται στο Σχ. 5-4 πρέπει να αφαιρεθεί όταν το στοιχείο συνδέεται με ένα τετρακομβικό στοιχείο.
- Η αφαίρεση του μεσαίου κόμβου συνεπάγεται ότι η πλευρά είναι και παραμένει ευθεία, με αποτέλεσμα την αντίστοιχη αύξηση της στιβαρότητας του στοιχείου. Συνίσταται τα στοιχεία στα οποία αφαιρούνται κόμβοι να χρησιμοποιούνται μόνο στις μεταβατικές περιοχές και όχι εκεί που χρησιμοποιούνται απλά γραμμικά στοιχεία με επιπρόσθετες συναρτήσεις σχήματος.
- Ένα στοιχείο *δευτέρου βαθμού* δεν έχει περισσότερα σημεία ολοκλήρωσης απ' ό,τι ένα γραμμικό στοιχείο. Γι' αυτή την αιτία γραμμικά στοιχεία συνήθως προτιμούνται στη μη-γραμμική ανάλυση.

5.6 Αριθμητική Επίλυση Συνθετικών Γραναζιών με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Το υπό ανάλυση συνθετικό γρανάζι λόγω συμμετρίας αναλύεται με πεπερασμένα στοιχεία μόνο το ένα τέταρτο της ολικής γεωμετρίας, όπως φαίνεται στο Σχ. 5-5. Το πρότυπο σχεδιάστηκε με τον προεπεξεργαστή του προγράμματος ANSYS, ο οποίος διαθέτει μια πληθώρα εντολών για τον 2-D ή 3-D μηχανολογικό σχεδιασμό εξαρτημάτων και άλλων μηχανολογικών κατασκευών. Η σχεδίαση του γραναζιού έγινε με βάση το πρότυπο συνθετικό γρανάζι που κατασκευάσαμε στο εργαστήριο, από εποξική ρητίνη και ανθρακονήματα (βλ. Κεφ. 3). Οι ιδιότητες των υλικών έχουν ήδη καταγραφεί στο τρίτο κεφάλαιο και εισαχθεί στο ANSYS με

κατάλληλες εντολές. Ο σχεδιασμός των οδόντων του γραναζιού έγινε με αποτόπωση του πρότυπου αντικειμένου σε χιλιοστομετρικό χαρτί και δι' εισαγωγής των σημείων στον προεπεξεργαστή του προγράμματος. Με ειδικές εντολές κατασκευάζονται οι γραμμές σύνδεσης των σημείων και η επιφάνεια του αντικειμένου. Λόγω συμμετρίας το πρόβλημα επιλύθηκε σαν 2-D, οπότε ο σχεδιασμός του όγκου δεν είναι αναγκαίος.

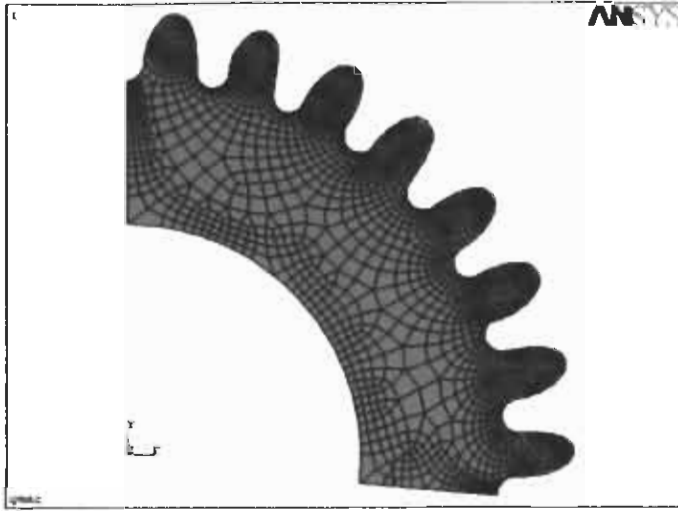


Σχ. 5-5: Μοντελοποίηση του ενός τετάρτου του γραναζιού

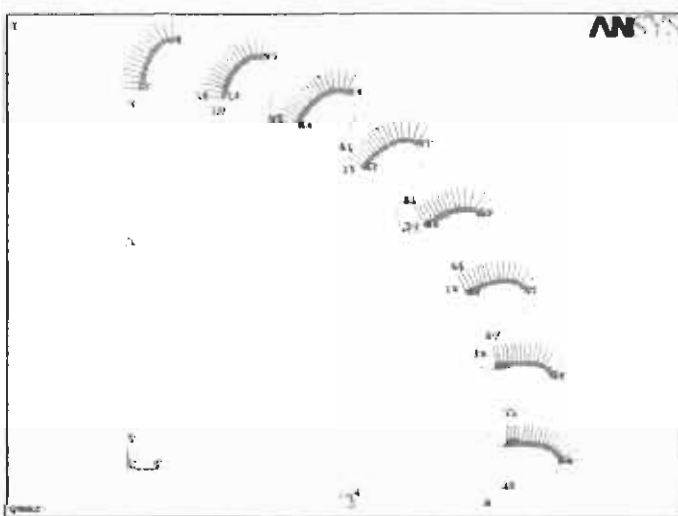
Οι διαστάσεις του αντικειμένου είναι: εσωτερική διάμετρος 20 cm, εξωτερική 21 cm, δηλαδή το βάθος των γραναζιών είναι 0,5 cm. Το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού είναι περίπου 200 GPa, το οποίο υπολογίστηκε από τον νόμο των μιγμάτων, δηλ. $E_c = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$, όπου E_f, E_m παριστάνουν τα μέτρα ελαστικότητας των ανθρακονημάτων και ρητίνης αντίστοιχα και V_f το ποσοστό των ινών που είναι εμβαπτισμένες στη ρητίνη. Ο λόγος Poisson υπολογίζεται με τον ίδιο νόμο και η τιμή του συνθέτου είναι περίπου 0,29.

Το πρότυπο χωρίζεται σε οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία, με κόμβους στις κορυφές και τα μέσα των πλευρών. Ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων είναι 2707 και 8572 αντίστοιχα. Στην περιοχή πλησίον των δοντιών του γραναζιού έχουμε μια σχετική πύκνωση του πλέγματος για την ακριβέστερη ανάλυση των τάσεων και παραμορφώσεων. Η φόρτιση έγινε μόνο κατά την μια πλευρά των οδόντων καθ' όσον θεωρήσαμε ότι το γρανάκι είναι σταθερό στο κεντρικό άξονα και γνωστή πίεση εφαρμόζεται στα δόντια. Η εφαρμοζόμενη πίεση ήταν αυξανόμενη από 50 Pa μέχρι 1000 Pa (N/m^2). Οι οριακές συνθήκες είναι πάκτωση στην εσωτερική περιφέρεια του

υπό ανάλυση γραναζιού. Το σχετικό πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων δείχνεται στο Σχ. 5-6 και η φόρτιση στο Σχ. 5-7.

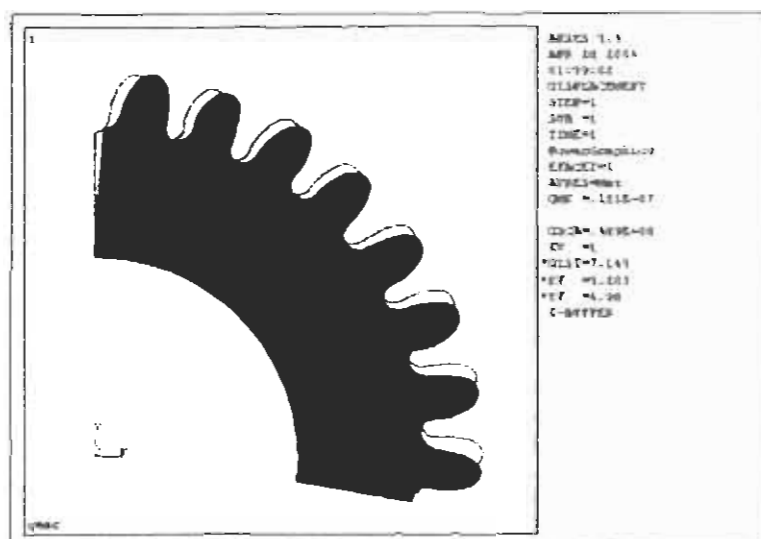


Σχ. 5-6: Πλέγμα Πεπερασμένων Στοιχείων



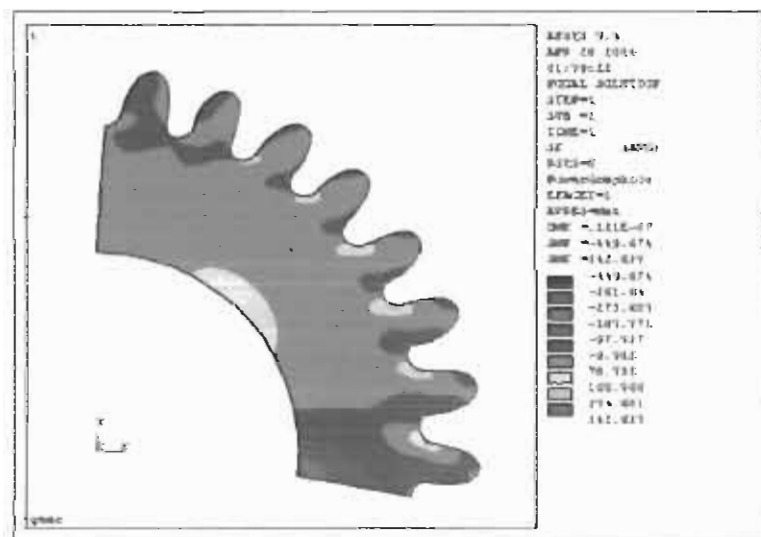
Σχ. 5-7: Φόρτιση του γραναζιού

Η παραμορφωμένη γεωμετρία του υπό ανάλυση αντικειμένου συγκριτικά με την μη παραμορφωμένη δείχνεται στο Σχ. 5-8.



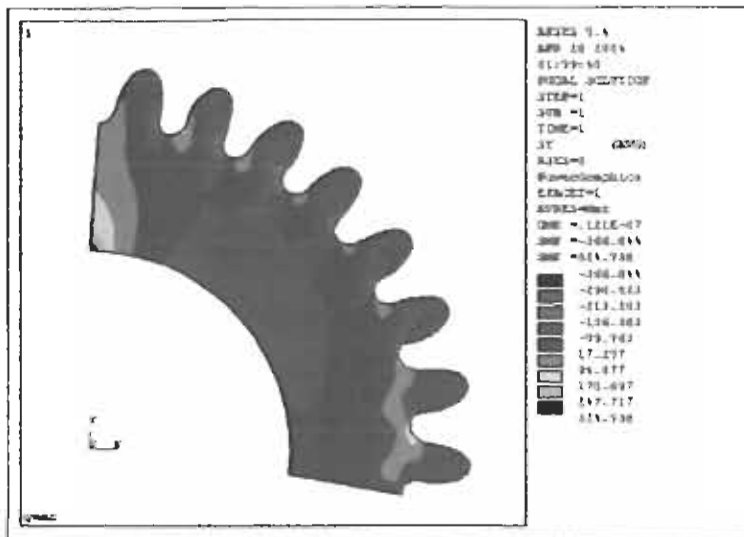
Σχ. 5-8: Παραμορφωμένο πλέγμα σχετικά με το μη παραμορφωμένο.

Η κατανομή της τάσης κατά την x -διεύθυνση δείχνεται στο Σχ. 5-9. παρατηρούμε ότι μέγιστη τάση, 340 Pa εμφανίζεται στη βάση του δοντιού από την πλευρά που δέχεται την πίεση, ενώ η ελάχιστη τάση -450 Pa εμφανίζεται στο τέλος της πακτωμένης πλευράς του γραναζιού. Η μέγιστη είναι εφελκυστική ενώ η ελάχιστη είναι θλιπτική και η κατανομή αυτή υπολογίστηκε για φόρτιση 50 Pa.



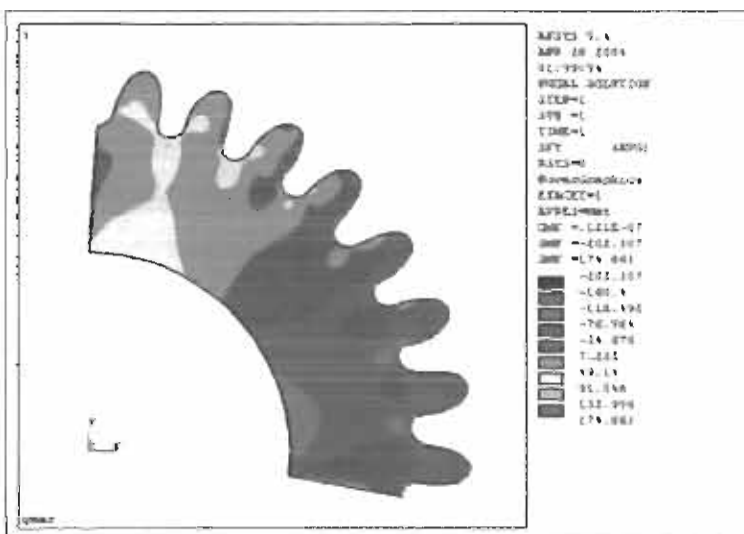
Σχ. 5-9: Κατανομή της σ_x τάσης

Αντίστοιχα η κατανομή της σ_y τάσης δείχνεται στο Σχ. 5-10.



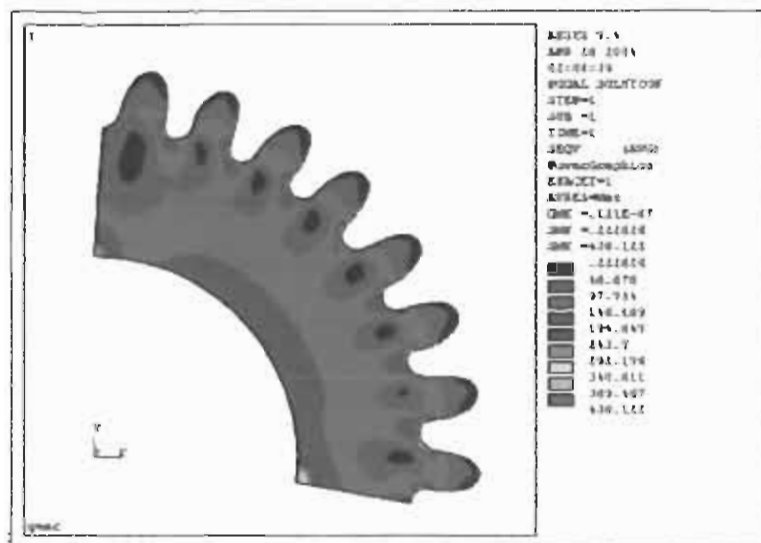
Σχ. 5-10 : Κατανομή της σ_y τάσης

Η μέγιστη ολμπτική τάση, -366 Pa , εμφανίζεται στο πίσω μέρος των δοντιών, όπως είναι φανερό από το σχήμα. Στα κάτω όμως δόντια εμφανίζεται μια εφελκυστική τάση ίση με 324 Pa . Συμπερασματικά μπορεί κανείς να πει ότι τα άνω δόντια καταπονούνται περισσότερο και απαιτείται καλύτερος σχεδιασμός για την αρτιότερη συμπεριφορά του συστήματος. Η διατμητική τάση σχεδιάζεται στο Σχ. 5-11, όπου μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι μέγιστη διάτμηση παρουσιάζεται στα άνω δόντια το οποίο συνηγορεί ότι πρέπει να δοθεί έμφαση στον καλύτερο σχεδιασμό αυτού του τμήματος στο γρανάζι.



Σχ. 5-11: Κατανομή των διατμητικών τάσεων

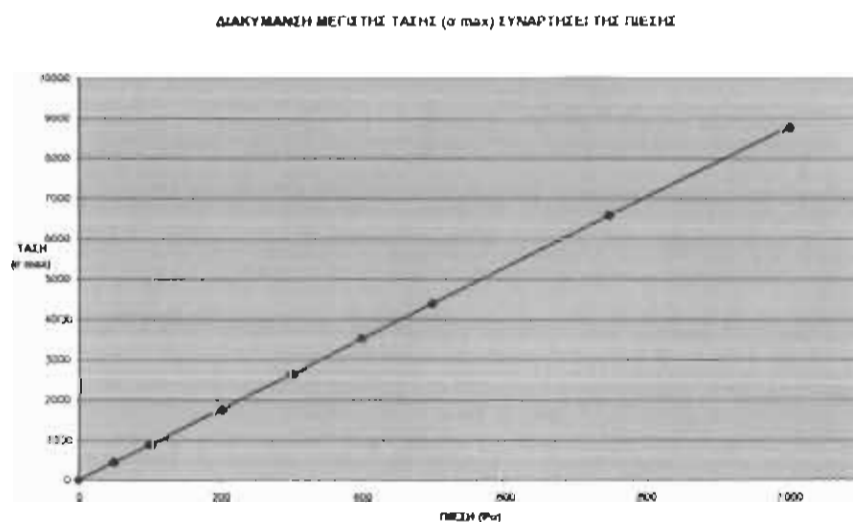
Ο συνδυασμός όλων των ανωτέρων τάσεων μπορεί να αποδοθεί σε ένα διάγραμμα, το γνωστό Von Misses σχέδιο, το οποίο βλέπουμε στο Σχ. 5-12.



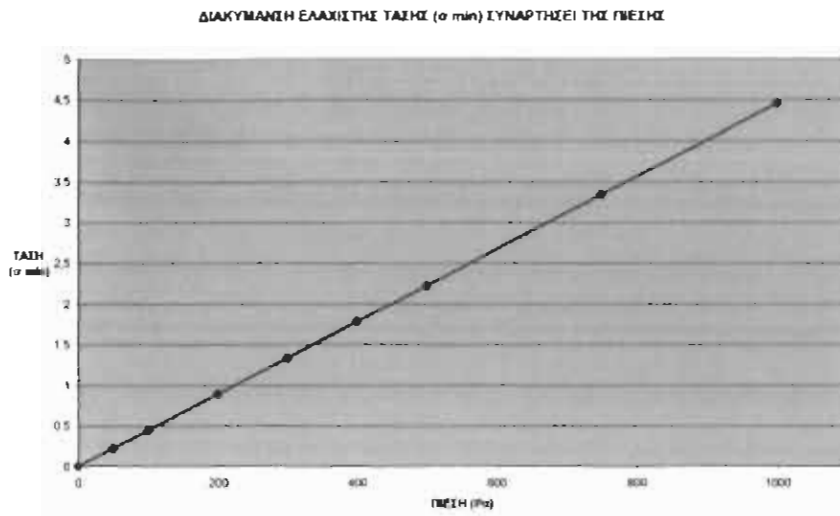
Σχ. 5-12: Κατανομή τάσεων κατά Von Misses.

Το διάγραμμα αυτό είναι το πληρέστερο για τον μηχανολογικό σχεδιασμό του αντικειμένου καθ' όσον παριστάνει την ολική εικόνα των τάσεων μέσα στο δοκίμιο υπό συνθήκες φόρτισης. Προφανώς το άνω μέρος των δοντιών παίρνει πολύ μικρές τάσεις και το βαθούλωμα των δοντιών λαμβάνουν μεγάλες εφελκύστικες τάσεις.

Η μέγιστη τάση σε συνάρτηση της εφαρμοζόμενης πίεσης φαίνεται στο Σχ. 5-13, ενώ η αντίστοιχη ελάχιστη φαίνεται στο Σχ. 5-14.



Σχ. 5-13: Μέγιστη τάση σ_a συναρτήσει της πίεσης



Σχ. 5-14: Ελάχιστη τάση σ_{α} συναρτήσει της πίεσης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. D.Hull, An Introduction to Composites Materials, Cambridge univ. press (1993)
2. J.Delmonte, Technology of Carbon & Graphite Fiber Composites, Van Nostrand Reinhold, co. (1981)
3. J. Baptiste Donnet, R. Bansal, Carbon Fibers, M. Dekker Inc, (1990)
4. www.americanplasticscouncil.org/benefits/in_your_life/pop/power_plastics_april99.html
5. George R. Newkome, University of South Florida
6. From John A. Marshall, Liquids That Take Only Milliseconds to Turn into Solids. National Educators Workshop: Update 93 – Standard Experiments in Engineering, Materials Science, and Technology. NASA Conference Publication 3259, April 1994.
7. J.W. Bull, Numerical Analysis and Modeling of Composite Materials, Blackie Academic & Professional, NY (1996)
8. Jones, R. M., Mechanics of Composite Materials. McGraw – Hill, Tokyo, 1975
9. Tsai, S. W. and Hahn, H. T. Introduction to Composite Materials. Technomic, Westport, CT, 1980
10. Tsai, S. W., Composite Design (4th edn). Think Composites, Dayton, OH, 1988
11. De Rouvray, A. and Haug, E., Industrial calculation of damage tolerance and stress allowables in components made of composite materials using the PAM – FISSTM / biphas material model. In *Proceedings of the Workshop: Composites Design for Space Application* (ed. Burke, W. R.) ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, 1986
12. de Rouvray, A. Dowlatyari, P. and Haug, E., Validation of the PAM – FISS / bi - phase numerical model for damage and strength predictions of LFRP composite laminates. In *Proceedings of MECAMAT 1989, Mechanics of Damage in Composites and Multi – Materials* (ESIS 11) (ed. Baptiste, D.) Mechanical Engineering Publications, London 1991

13. Haug, E., Dowlatyari, P. and de Royvray, A., Numerical calculation of damage tolerance and admissible stress in composite materials using the PAM – FISS / bi – phase material model. In Proceedings of the Conference: Spacecraft Structures, CNES, Toulouse, 1985(ed. Burke, W. R.) (ESA SP – 238). ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, 1986
14. Hughes, T. J. R. The Finite Element Method. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987
15. Π.Α. Κακαβάς, Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, ΤΕΙ Πάτρα (2003)
16. www.dyragear.com

