



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ
ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΣΩΛΗΝΕΣ ΑΠΟ FRP**

ΡΑΜΜΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ



Επιβλέπων: Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2016



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΠΛΟΙΟΥ
ΜΕ ΣΩΛΗΝΕΣ ΑΠΟ FRP**

ΡΑΜΜΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

N. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΠΑΝΤΕΛΗΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

M. ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2016

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου με την παρούσα Διπλωματική Εργασία στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, την οικογένεια μου, τους φίλους και την σύντροφο μου.

Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Τσούβαλη Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την διαρκή βοήθεια και καθοδήγησή του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω για την παροχή απαραίτητων στοιχείων για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας τον κ. Βασίλη Ττριακίδη, την κα Θωμαΐδα Ττριακίδου, τον κ. Κοσμά Ττριακίδη, τον κ. Παναγιώτη Γεωργάκη, τον κ. Χρήστο Μπεζά, τον κ. Γιάννη Φρυδά. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Λάμπρο Καϊκτσή Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ και τον κ. Χρήστο Παπαδόπουλο Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ για τις χρήσιμες υποδείξεις τους.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή – Σωληνώσεις από FRP και οι εφαρμογές τους

1.1 Τα σύνθετα υλικά σήμερα και η χρήση τους στην ναυπηγική.....	9
1.2 Σωληνώσεις από ενισχυμένο με ίνες πλαστικό.....	15
1.2.1 Θαλάσσιες εφαρμογές.....	15
1.2.2 Χερσαίες εφαρμογές.....	21
1.3 Κατασκευή σωληνώσεων FRP με περιέλιξη ινών.....	23
1.4 Σκοπός της διπλωματικής.....	26

Κεφάλαιο 2 Μηχανικές/φυσικές ιδιότητες και κόστος υλικών για ίνες και πλαστικές μήτρες

2.1 Εισαγωγή.....	27
2.2 Ενισχυτικές ίνες, μηχανικές/φυσικές ιδιότητες και κόστος.....	27
2.2.1. Υλικά ινών.....	27
2.2.1.1 Ίνες γυαλιού.....	28
2.2.1.2 Ίνες άνθρακα.....	30
2.2.1.3 Ίνες aramid.....	32
2.2.1.4 Σύγκριση υλικών ινών.....	33
2.2.2 Προσανατολισμός ινών.....	35
2.2.3 Γεωμετρία ινών.....	36
2.2.4 Ποσοστό ινών στο σύνθετο υλικό.....	36
2.2.5 Προστατευτικές επικαλύψεις ινών.....	37
2.3 Πλαστικές μήτρες, μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και κόστος.....	38
2.3.1 Γενικά για τις μήτρες.....	38
2.3.2 Πλαστικές (πολυμερικές) μήτρες.....	39
2.3.2.1 Εποξικές ρητίνες.....	40
2.3.2.2 Πολυεστερικές ρητίνες.....	40
2.3.2.3 Βυνιλεστερικές ρητίνες.....	41
2.3.2.4 Φαινολικές ρητίνες.....	41
2.3.2.5 Σύγκριση ρητινών.....	42
2.4 Χημικά πρόσθετα σε FRP υλικά.....	42
2.5 Συνεργασία ίνας και μήτρας.....	44
2.6 Επιλογή FRP υλικού για σωλήνωση πλοίου.....	44

Κεφάλαιο 3 Σχεδίαση σωληνώσεων FRP

3.1 Εισαγωγή.....	46
3.2 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες σωληνώσεων FRP.....	48

3.2.1 Θερμοκρασία σχεδίασης και θερμική αγωγιμότητα.....	49
3.2.2 Βάρος.....	51
3.2.3 Τραχύτητα και οι απώλειες πιέσεων.....	52
3.2.4 Μέτρο ελαστικότητας.....	56
3.2.5 Τάσεις και πιέσεις.....	58
3.2.6 Αλλαγή μήκους.....	64
3.2.7 Αξονική δύναμη από τις αγκυρωμένες στηρίξεις.....	68
3.2.8 Απόδοση σε φωτιά.....	71
3.2.9 Ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	76
3.2.10 Συμπεριφορά σε κόπωση.....	77
3.2.11 Υδραυλικό πλήγμα και σπηλαίωση.....	81
3.2.12 Απορρόφηση υγρασίας και περιβαλλοντική υποβάθμιση.....	83
3.2.13 Ερπυσμός.....	86
3.2.14 Αντίσταση στην Κρούση.....	87
3.2 Στηρίξεις σε σωλήνωση FRP.....	89
3.3 Ένωση τεμαχίων σωλήνωσης FRP.....	101
3.3.1 Περιτυλιγμένος σύνδεσμος (butt and wrap).....	101
3.3.2 Ένωση με κόλληση (adhesive bonding).....	103
3.3.3 Μηχανικές συζεύξεις (mechanical couplings).....	105
3.3.4 Αρμοί διαστολής (expansion joints).....	108
3.3.5 Βρόγχοι σωλήνωσης (pipe loops).....	110

Κεφάλαιο 4 Σωληνώσεις FRP για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον

4.1 Συνηθισμένες πρακτικές κατά την εγκατάσταση σωληνώσεων FRP για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον.....	112
4.1.1 Εγκατάσταση σωληνώσεων που περνούν από στεγανές φρακτές και καταστρώματα.....	112
4.1.2 Αγκυρωμένες στηρίξεις σωληνώσεων FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον.....	115
4.1.3 Πλάκες στήριξης σωληνώσεων FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον.....	117
4.1.4 Στηρίξεις-οδηγοί σωληνώσεων FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον.....	120
4.1.5 Επιτρεπτό όριο απώλειας ευθυγράμμισης σωλήνωσης FRP μεταξύ των στηρίξεων.....	121
4.1.6 Διαδικασία συναρμολόγησης της μηχανικής σύζευξης Viking Johnson κατά την εγκατάσταση σωληνώσεων FRP.....	122
4.2 Ενδεικτικές ιδιότητες σωληνώσεων FRP για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον.....	124
4.3 Ενδεικτικές διαστάσεις και χαρακτηριστικά εξαρτημάτων σωληνώσεων FRP για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον.....	129
4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σωληνώσεων από FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον.....	136

Κεφάλαιο 5 Κανονισμοί για χρήση σωληνώσεων από σύνθετο υλικό σε θαλάσσιο περιβάλλον

5.1 Εισαγωγή.....	138
5.2 Κανονισμοί νηογνομόνων για χρήση σωληνώσεων από σύνθετο υλικό σε πλοία.....	138
5.3 Απαιτήσεις σχεδίασης σωληνώσεων από σύνθετο υλικό.....	141
5.4 Απαιτήσεις εγκατάστασης σωληνώσεων από σύνθετο υλικό.....	153

Κεφάλαιο 6 Αντικατάσταση χαλύβδινων σωληνώσεων πλοίου με FRP

6.1 Εισαγωγή.....	157
6.2 Καθορισμός και στοιχεία δικτύου σωλήνωσης και πλοίων.....	158
6.2.1 Στοιχεία σωληνώσεων έρματος πλοίου 1.....	160
6.2.2 Στοιχεία σωληνώσεων έρματος πλοίου 2.....	164
6.2.3 Στοιχεία σωληνώσεων έρματος πλοίου 3.....	167
6.2.4 Στοιχεία σωληνώσεων έρματος πλοίου 4.....	170
6.3 Υπολογισμός στοιχείων σωλήνωσης από FRP.....	172
6.4 Σύγκριση κόστους σωληνώσεων χάλυβα και FRP.....	178

Συμπεράσματα.....

188

Παραρτήματα.....

189

Παράρτημα Α – Κατάλογος εταιρειών σωληνώσεων FRP..... 189

Παράρτημα Β – Τιμοκατάλογοι χαλύβδινων σωληνώσεων πλοίου..... 190

Βιβλιογραφία.....

196

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή – Σωληνώσεις από FRP και οι εφαρμογές τους

1.1 Τα σύνθετα υλικά σήμερα και η χρήση τους στην ναυπηγική

Συνοπτικά αναφέρουμε ότι τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που προκύπτουν από ένα συνδυασμό υλικών (μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά) και έχουν διαφορετικές ιδιότητες από τα υλικά τα οποία τα αποτελούν. Οι διάφοροι συνδυασμοί υλικών που φαίνονται στο σχήμα 1.1 αποτελούν και κατηγορίες σύνθετων υλικών. Η χρησιμότητα ενός σύνθετου υλικού βασίζεται στην αξιοποίηση των επιθυμητών ιδιοτήτων των υλικών από τα οποία αποτελείται. Όπως αναφέρεται από Παντελή (2008), τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από την συνύπαρξη δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα, χαρακτηριζόμενο ως συστατικό ενίσχυσης, προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό, το οποίο καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Όπως αναφέρεται από Τσούβαλη (1998), τα σύνθετα υλικά υποδιαιρούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή τους, στα ινώδη σύνθετα υλικά (fibre reinforced plastics, FRP), στα σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composite materials) και στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composite materials).



Σχήμα 1.1: Κατηγορίες σύνθετων υλικών ανάλογα με το υλικό της μήτρας και της ενίσχυσης

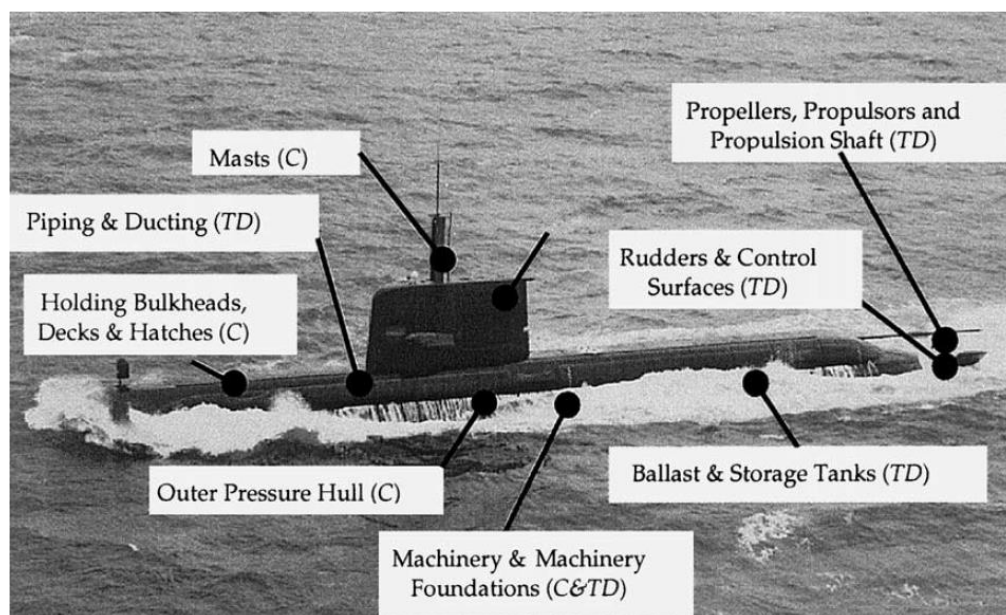
Αν και παραδείγματα χρήσης σύνθετων υλικών παρατηρούνται ήδη από την αρχαιότητα, η μεθοδευμένη και γενικευμένη χρήση και εξέλιξή τους εντοπίζεται στην περίοδο μετά τον Β Παγκόσμιο Πόλεμο. Όπως αναφέρεται από Τσούβαλη (1998), του γεγονότος αυτού (της ανάπτυξης των ινώδων σύνθετων υλικών) προηγήθηκε η ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ιών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ιών boron το 1960, καθώς και η ισχυρή επιθυμία της αεροδιαστημικής βιομηχανίας να αυξηθεί η απόδοση και να ελαττωθεί το βάρος των

αεροσκαφών. Εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκαν ίνες από άνθρακα (1964) που πλέον χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροδιαστημική βιομηχανία και ίνες από aramid-Kevlar (1971) που χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανίες (αυτοκινήτων, αεροδιαστημική, ναυπηγική).

Πλέον η χρήση των σύνθετων υλικών εκτείνεται σε ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών, όπως στην οικοδομή (οπλισμένο σκυρόδεμα), την αυτοκινητοβιομηχανία (ελαστικά, μέρη αυτοκινήτων), την αεροναυπηγική (μέρη αεροσκαφών, πτερύγια στροβιλοκινητήρων και πηδάλια αεροσκαφών, πτερύγια βλημάτων), την αεροδιαστημική βιομηχανία (μέρη διαστημοπλοίων από ίνες άνθρακα) και την ναυπηγική βιομηχανία. Οι σημαντικότεροι παράγοντες για αυτήν την επέκταση των σύνθετων υλικών είναι οι υψηλές τιμές ειδικής αντοχής και ειδικής δυσκαμψίας, η υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, η μεγάλη ευελιξία στην σχεδίαση λόγω της πληθώρας ινών, μητρών και τεχνικών κατασκευής και το χαμηλό κόστος συντήρησης.

Ναυπηγική και σύνθετα υλικά

Οι γενικές απαιτήσεις που υπάρχουν για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική όπως η υψηλή αντοχή σε διάβρωση και οι υψηλές τιμές ειδικής αντοχής, δυσθραυστότητας και αντοχής σε κόπωση επέτρεψε στα σύνθετα υλικά να αποτελέσουν αξιοπρόσεκτη εναλλακτική λύση στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης τους. Όπως έχει αναφερθεί σε Mouritz & Gellert & Burchill & Challis (2001), η χρήση των σύνθετων υλικών ξεκίνησε στην ναυπηγική μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο σε μικρά επιβατηγά σκάφη του πολεμικού ναυτικού των ΗΠΑ, γενικεύτηκε μέχρι την περίοδο του πολέμου του Βιετνάμ σε μικρά σκάφη διαφόρων χρήσεων (επιβατηγά, περιπολικά, αναγνωριστικά) και σε διάφορα επιμέρους συστήματα πλοίων (καταστρώματα μικρών πλοίων, σωληνώσεις σε αντιτορπιλικά). Την ίδια περίοδο έγινε χρήση σύνθετων υλικών σε παρόμοιες ναυπηγικές εφαρμογές και από το πολεμικό ναυτικό διαφόρων χωρών (Αγγλία, Σουηδία, Νορβηγία, Ολλανδία). Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 αυξήθηκε πολύ η χρήση σύνθετων υλικών στην ναυπηγική σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως: υπερκατασκευές, καταστρώματα, φρακτές, φουγάρα, κατάρτια, έλικες, άξονες πρόωσης, πηδάλια, σωληνώσεις, αντλίες, βαλβίδες. Αυτή η αύξηση που αφορούσε πλοία στρατιωτικών σκοπών, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην προσπάθεια του στρατού να μειώσει το συνολικό κόστος και να αυξήσει την επιχειρησιακή απόδοση των διάφορων τύπων πολεμικών πλοίων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2, οι σταδιακές βελτιώσεις στην σχεδίαση, κατασκευή και στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών χαμηλού κόστους έχουν οδηγήσει σε μια διαρκή αύξηση του μήκους των πλοίων που κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι πλέον ένα σκάφος περιπολίας από ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη (Glass Reinforced Epoxy, GRE) είναι σύμφωνα με μελέτες 36% ελαφρύτερο και έχει 7% μικρότερο συνολικό κόστος στη διάρκεια ζωής του από το αντίστοιχο σκάφος από χάλυβα (Mouritz & Gellert & Burchill & Challis, 2001). Η χρήση ωστόσο σύνθετων υλικών σε πλοία μεγαλύτερου μήκους περιορίζεται από την χαμηλή ακαμψία που δημιουργεί μη επιτρεπτό βέλος κάμψης στην γάστρα. Χαρακτηριστικοί τύποι στρατιωτικών πλοίων με σημαντική χρήση σύνθετων υλικών είναι οι φρεγάτες, τα αντιτορπιλικά, τα αεροπλανοφόρα, ενώ τύποι πλοίων όπου είναι



Σχήμα 1.4: Εφαρμογές σύνθετων υλικών σε πολεμικά υποβρύχια, Mouritz & Gellert & Burchill & Challis, 2001

Παρά την μεγάλη σημασία των στρατιωτικών εφαρμογών στην εισαγωγή και καθιέρωση των σύνθετων υλικών στην ναυπηγική, η ίδια η θέση της εμπορικής ναυτιλίας στην παγκόσμια οικονομία υπήρξε και αυτή πολύ σημαντική για την περαιτέρω έρευνα και χρήση σύνθετων υλικών. Η κυριαρχία της εμπορικής ναυτιλίας στην παγκόσμια μεταφορά εμπορευμάτων (80-85%) και η σημασία μιας σειράς θαλάσσιων δραστηριοτήτων (εξόρυξη και μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου), καθιστούν κομβική και επικερδή για την παγκόσμια οικονομία την βελτιστοποίηση της απόδοσης των διάφορων θαλάσσιων κατασκευών (πλοία, εξέδρες άντλησης πετρελαίου, υποθαλάσσιες σωληνώσεις). Ταυτόχρονα οι υψηλές απαιτήσεις των διεθνών κανονισμών για ποιότητα, ασφάλεια, αξιοπιστία και προστασία του περιβάλλοντος αναδεικνύουν την ανάγκη για τα αντίστοιχα υλικά υψηλών προδιαγραφών. Σε αυτό το πλαίσιο ερμηνεύεται η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη εξειδικευμένων σύνθετων υλικών για απαιτητικές εφαρμογές, η σταδιακή αντικατάσταση των μεταλλικών υλικών σε πληθώρα εφαρμογών και η διαρκώς επεκτεινόμενη χρήση σύνθετων υλικών στην ναυπηγική βιομηχανία.

Περίπου το 1/3 των θαλάσσιων εφαρμογών κατασκευάζονται πλέον από σύνθετα υλικά (Miller 2001). Αυτή η διάδοση των σύνθετων υλικών στην ναυπηγική περιορίζεται ωστόσο από παράγοντες όπως το υψηλό αρχικό κόστος, τη δυσκολία προσδιορισμού της μακροπρόθεσμης αντοχής, την έλλειψη εξοικείωσης των σχεδιαστών καθώς και αξιόπιστων πειραματικών δεδομένων για την συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επίσης σημαντικός παράγοντας που περιορίζει την χρήση σύνθετων υλικών σε ναυπηγικές εφαρμογές είναι οι απαιτήσεις των κανονισμών για την αντοχή σε φωτιά και την τοξικότητα του καπνού.

Η κατασκευή ολόκληρων πλοίων από ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά (που δεν αφορούν στρατιωτικούς σκοπούς) αφορά κυρίως ταχύπλοα σκάφη και σκάφη αναψυχής που δεν

υπερβαίνουν τα 75 m, καθώς η κατασκευή εμπορικών πλοίων μεγάλου μεγέθους αντιμετωπίζει προβλήματα όπως η έλλειψη μεθόδων για την ποσοτική αξιολόγηση κινδύνων από πυρκαγιά και οι πολύπλοκες διαδικασίες έγκρισης και αποδοχής της κατασκευής (Παπάζογλου, Παντελής, Τσούβαλης 2007). Η πλειοψηφία της παραγωγής μικρών σκαφών είναι πλέον από FRP με ίνες γυαλιού (SIMS and BROUGHTON 2000). Άλλα είδη πλοίων που έχουν κατασκευασθεί από σύνθετα υλικά είναι τα αλιευτικά σκάφη όπου τα πλοία από σύνθετα υλικά αποτελούν το 50% (Ship Structure Committee 1990), επιβατηγά και οχηματαγωγά πλοία, σωστικές λέμβοι. Ιδιαίτερη πετυχημένη είναι και η χρήση σύνθετων υλικών ως στηρίξεις (chokes) για την ευθυγράμμιση διαφόρων στοιχείων του μηχανολογικού εξοπλισμού ενός πλοίου με πιο συνηθισμένη επιλογή την εποξική ρητίνη (National Shipbuilding Research Program 1977). Άλλες πιθανές μελλοντικές εφαρμογές σύνθετων υλικών σε εμπορικά πλοία είναι σε υπερκατασκευές, φουγάρα, φρακτές και καταστρώματα, στόμια κυτών, δεξαμενές έρματος (Howarth 2012).

Η χρήση σύνθετων υλικών σε θαλάσσιες εφαρμογές πέρα των πλοίων, εκτείνεται ήδη από σχοινιά αγκυρώσεων, υποβρύχιες σωληνώσεις, αγωγούς γεωτρήσεων πετρελαίου σε μεγάλα βάθη, κιγκλιδώματα, σχάρες. Άλλωστε η αύξηση του βάθους στις υποθαλάσσιες εφαρμογές δημιουργεί ώθηση για χρήση σύνθετων υλικών πολύ υψηλής απόδοσης με ίνες άνθρακα. Η δημιουργία ενός αγωγού γεωτρήσης πετρελαίου από FRP θα μπορούσε λόγω του μικρότερου βάρους σε σχέση με τους χαλύβδινους να δώσει την δυνατότητα άντλησης από περισσότερες γεωτρήσεις μέσω της ίδιας πλατφόρμας άντλησης πετρελαίου μειώνοντας το κόστος της εξόρυξης (Hossain 2011). Επίσης υπάρχουν εξέδρες άντλησης πετρελαίου όπως της BP-Amoco (σχήμα 1.5) όπου ήδη ένα μεγάλο μέρος του συνολικού βάρους (10%) προέρχεται από σύνθετα υλικά σε διάφορες εφαρμογές (σχάρες για δάπεδα, κιγκλιδώματα, διάδρομοι, τοίχοι με θερμοπροστασία, σωληνώσεις). Η σύγκριση βάρους και κόστους για αυτήν την πλατφόρμα ανάλογα με την ποσότητα χρήσης σύνθετου υλικού που επιλέγεται κατά την σχεδίαση φαίνεται στον πίνακα 1.1. Η χρήση σύνθετων υλικών σε υπεράκτιες εξέδρες αν και σταδιακά επεκτείνεται, συναντά ωστόσο αναχώματα όπως: την αυστηρή σε χρόνο και χρήμα παραγωγή τους, το μικρομεσαίο μέγεθος των επιχειρήσεων που αδυνατούν να καλύψουν τις ανάγκες της ναυπηγικής βιομηχανίας γενικά, τις δυσκολίες παραγωγής πολύ μεγάλων κατασκευών όπως οι υπεράκτιες εξέδρες με τις υπάρχουσες κατεργασίες σύνθετων υλικών (GIBSON 2003).

Πίνακας 1.1: Σύγκριση βάρους και κόστους για πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου της BP-Amoco ανάλογα με την ποσότητα χρήσης σύνθετου υλικού που επιλέγεται κατά την σχεδίαση, GIBSON 2003

Characteristic	Baseline steel structure.	Composite ‘Conforming’ solution.		Composite ‘Radical’ solution	
		Weight & cost	Saving	Weight & cost	Saving
Weight	187 t.	116 t.	38%	84 t.	55%
Cost	£992,000	£920,000	7%	£736,000	26%



Σχήμα 1.5: Πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου της BP-Amoco με 10% του συνολικού βάρους τους από σύνθετα υλικά, GIBSON 2003

Οι τωρινές και οι μελλοντικές εφαρμογές σύνθετων υλικών σε θαλάσσιες εφαρμογές και πλατφόρμες φαίνονται στους πίνακες 1.2 και 1.3.

Πίνακας 1.2: Τωρινές εφαρμογές σ.υ. σε θαλάσσιες εφαρμογές και πλατφόρμες, GIBSON 2003

Fire protection	Walkways and flooring	Lifeboats
Blast protection	Handrails	Buoys and floats
Corrosion protection	Sub sea anti-trawl structures	ESDV protection
Partition walls	Casings	Boxes, housings and shelters
Aqueous pipe systems	J-tubes	Loading gantry
Tanks and vessels	Caissons	Pipe refurbishment
Firewater systems	Cable trays and ladders	Riser protection
Pipe liners	Accumulator bottles	Bend restrictors
Separator internals	Well intervention	Subsea instrument housings

Πίνακας 1.3: Μελλοντικές εφαρμογές σ.υ σε θαλάσσιες εφαρμογές και πλατφόρμες, GIBSON 2003

Rigid risers	Coilable tubing	Flexible risers
Tendons	Primary structure	Separators

1.2 Σωληνώσεις από ενισχυμένο με ίνες πλαστικό (FRP)

Οι σωληνώσεις αποτελούν τα μέσα με τα οποία μεταφέρονται τα απαραίτητα ρευστά για την λειτουργία κάθε μηχανολογικής εγκατάστασης. Πιθανή αστοχία τους μπορεί να προκαλέσει μεγάλη διαρροή του μεταφερόμενου ρευστού, φωτιά, ρύπανση του περιβάλλοντος και να οδηγήσει σε επιβράδυνση ή και διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης. Αυτή η σημασία των σωληνώσεων για κάθε μηχανολογική εγκατάσταση αλλά και η σημασία της αντίστασης σε διάβρωση των υλικών των σωληνώσεων οδήγησε στην χρήση πιο εξελιγμένων μεταλλικών υλικών (ανοξείδωτος χάλυβας), στον συνδυασμό μεταλλικών και σύνθετων υλικών (προστατευτικές επιστρώσεις από σύνθετα υλικά έναντι της διάβρωσης) και στην σταδιακή αύξηση της χρήσης σωληνώσεων από FRP. Το πιο διαδεδομένο υλικό των ενισχυτικών ινών στις FRP σωληνώσεις είναι το γυαλί ενώ ο τύπος της χρησιμοποιούμενης μήτρας ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Η κύρια μέθοδος κατασκευής των σωληνώσεων FRP είναι η περιέλιξη ινών, ενώ η μεγαλύτερη δυσκολία στην εγκατάσταση τους θεωρείται ότι είναι στα σημεία σύνδεσης των επιμέρους τεμαχίων της σωληνώσεως (Ship Structure Committee 1990).

1.2.1 Θαλάσσιες εφαρμογές σωληνώσεων FRP

Η διάβρωση στις θαλάσσιες εφαρμογές σωληνώσεων (πλοία και θαλάσσιες κατασκευές) είναι ακόμα πιο σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του υλικού της σωληνώσεως από τις αντίστοιχες εφαρμογές στην στεριά. Οι σωληνώσεις, λόγω της έκτασής τους (διατρέχουν όλο το πλοίο) αλλά και του εύρους των λειτουργιών τους (μεταφορά καυσίμων και λιπαντικών, ψυκτικών υγρών και αέρα, φορτίου, έρματος, πόσιμου νερού) είναι κομβικές για την ομαλή λειτουργία του πλοίου. Όπως αναφέρεται και στο The standard P&I Club (2012), η κυριαρχία των μεταλλικών υλικών στις σωληνώσεις των πλοίων δημιουργεί ένα αντικειμενικό πρόβλημα, η διάβρωση που λειτουργεί σωρευτικά με την πάροδο του χρόνου στα μεταλλικά συστήματα σωληνώσεων δεν αντισταθμίζεται επαρκώς από τα μεγαλύτερα πάχη στα τοιχώματα των σωληνώσεων. Επίσης είναι πρακτικά αδύνατη η εσωτερική συντήρηση και γενικότερα δύσκολη η συντήρησή τους λόγω του αριθμού τους και της δυσκολίας πρόσβασης σε αυτές. Αυτό το πρόβλημα οδηγεί σταδιακά σε αστοχίες τις μεταλλικές σωληνώσεις του πλοίου και σε βαθμιαία αντικατάσταση μέρους αυτών αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος των μεταλλικών σωληνώσεων κατά την διάρκεια ζωής του πλοίου. Παρότι τα μεταλλικά υλικά κυριαρχούν στις σωληνώσεις των πλοίων, τα προβλήματα από την χρήση τους που προαναφέρθηκαν έχουν οδηγήσει στην επέκταση της χρήσης των σωληνώσεων από σύνθετα υλικά στις θαλάσσιες εφαρμογές γενικά και στα πλοία συγκεκριμένα. Όπως αναφέρεται και στο The standard P&I Club (2012) για τα υλικά των σωληνώσεων πλοίων: οι περισσότερες σωληνώσεις είναι από μαλακό χάλυβα (mild steel), οι σωληνώσεις που μεταφέρουν επικίνδυνα χημικά ή ιδιαίτερα διαβρωτικά υγρά είναι από ανοξείδωτο χάλυβα, μερικές μικρές σωληνώσεις αναρρόφησης θάλασσας (sea water pipe) είναι από χαλκό και ορισμένα πλοία έχουν σωληνώσεις έρματος από ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη (GRE). Οι σωληνώσεις GRE είναι το πιο συνηθισμένο είδος FRP τόσο για χερσαίες όσο και για θαλάσσιες εφαρμογές (σχήμα 1.6), ωστόσο ενώ στις χερσαίες εφαρμογές χρησιμοποιείται για διάφορα υγρά και πιέσεις, στις θαλάσσιες εφαρμογές

περιορίζεται κυρίως για δίκτυα σωληνώσεων χαμηλής πίεσης μεταφοράς νερού (GIBSON 2003). Επίσης αναφέρεται από David Howarth (2012) ότι υπάρχουν και άλλες εφαρμογές από σύνθετο υλικό και κυρίως FRP σε σωληνώσεις εμπορικών πλοίων όπως σε σωληνώσεις ψύξης με θαλασσινό νερό, καθαρισμού καυσαερίων (scrubber) και πόσιμου νερού. Επίσης υπάρχουν επιθέματα επιδιόρθωσης από σύνθετο υλικό σε σωληνώσεις χάλυβα που έχουν υποστεί σημαντική διάβρωση (σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.6: Σωλήνωση GRE της AMERON σε πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου



Σχήμα 1.7: Σωλήνωση GRE της AMERON σε πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου

Δεδομένου ότι τηρούνται οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής και αντοχής σε φωτιά των Νηογνομώνων, τότε οι σωληνώσεις από FRP μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και σε εφαρμογές που απαιτούν κλάση 1 και 2 (οι κλάσεις ορίζονται στο κεφάλαιο 4). Άλλη εφαρμογή σωληνώσεων από FRP είναι για δίκτυα πυρόσβεσης σε πλοία και εξέδρες άντλησης πετρελαίου, όπου η μείωση του βάρους έχει σημαντικό ρόλο στην μείωση του κόστους κατασκευής της εξέδρας. Σωληνώσεις από FRP χρησιμοποιούνται για την μεταφορά πετρελαίου σε εξέδρες άντλησης πετρελαίου και σε υποβρύχιες εφαρμογές. Όπου στην περίπτωση των υποβρύχιων σωληνώσεων αυτές αποτελούνται από ίνες άνθρακα περιφερειακά για να αντέχουν στην εξωτερική πίεση και από ίνες γυαλιού στο διάμηκες για ευλυγισία (Ship Structure Committee 1990).

Η χρησιμοποίηση μεταλλικών σωληνώσεων σε θαλάσσιο περιβάλλον οδηγεί λόγω διάβρωσης στην ανάγκη αντικατάστασης αυτών των σωληνώσεων κατά μέσο όρο 2 με 3 φορές κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής (πλοίο, πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου). Αυτή η αθροιστικά μεγάλη οικονομική επιβάρυνση που προστίθεται στις αυξημένες δαπάνες συντήρησης των μεταλλικών σωληνώσεων και στο υψηλότερο συνολικό κόστος εγκατάστασης (λόγω και του μεγαλύτερου βάρους τους), είναι που καθιστά ελκυστικές για χρήση σε θαλάσσιες εφαρμογές τις σωληνώσεις από FRP (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012). Η περαιτέρω εξάπλωση των σωληνώσεων από σύνθετα υλικά περιορίζεται ωστόσο κυρίως από τις απαιτήσεις υψηλής αντοχής σε φωτιά των Νηογνομώνων για τα διάφορα συστήματα σωληνώσεων και δευτερευόντως από τους υψηλούς δείκτες ασφαλείας που αυξάνουν το κόστος και οφείλονται στην ανεπαρκή ποσοτικοποίηση και δημιουργία βάσης δεδομένων των μηχανικών ιδιοτήτων και ορίων των διάφορων FRP.

Μελέτες για την χρήση FRP σωληνώσεων σε εξέδρες άντλησης πετρελαίου

Το 1992 ολοκληρώθηκε η μελέτη κόστους της Amoco Norway Oil Company (REINFORCED PLASTICS DECEMBER 1992) για αντικατάσταση των χαλύβδινων σωληνώσεων πυρόσβεσης σε μία από τις πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου της με άλλα υλικά. Η αναγκαιότητα αυτής της μελέτης υπαγορεύτηκε από το γεγονός ότι οι χαλύβδινες σωληνώσεις για πυρόσβεση (dry deluge firewater systems) που χρησιμοποιούνται στις εξέδρες άντλησης πετρελαίου (αρκετά χιλιόμετρα μικρής διαμέτρου σωληνώσεων ανά εξέδρα) έχουν μεγάλη εσωτερική διάβρωση και μείωση πάχους λόγω της χρήσης θαλασσινού νερού και εμφανίζουν επίσης «μπλοκάρισμα» των ψεκαστήρων από τα παράγωγα της διάβρωσης που αυξάνεται σημαντικά μετά από 2 χρόνια χρήσης. Η μελέτη αυτή κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι οι σωληνώσεις από FRP με ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη έχουν το μικρότερο αρχικό κόστους (κόστος αγοράς και εγκατάστασης) και αποτελούν την πρώτη επιλογή αναφορικά με το κόστος (πίνακας 1.4). Είναι σαφές από τα στοιχεία του ίδιου πίνακα ότι:

- η διατήρηση του ίδιου χάλυβα απαιτεί μεγάλα έξοδα συντήρησης και καθαρισμού που τελικά δεν διασφαλίζουν και την απαιτούμενη αξιοπιστία των χαλύβδινων σωληνώσεων
- η αντικατάσταση των παλιών χαλύβδινων σωληνώσεων με νέες έχει ελαφρά μεγαλύτερο αρχικό κόστος από το FRP με ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη, ωστόσο δεν

υπολογίζονται σε αυτό το συγκριτικό κόστος το απαιτούμενο κόστος συντήρησης των νέων χαλύβδινων σωληνώσεων

- τα υπόλοιπα υλικά έχουν αρκετά υψηλότερο αρχικό κόστος από το FRP με ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη

Πίνακας 1.4: Σχετικό κόστος (αγοράς και εγκατάστασης) σωληνώσεων πυρόσβεσης διάφορων υλικών για χρήση σε εξέδρας άντλησης πετρελαίου, REINFORCED PLASTICS DECEMBER 1992

Option	Installed cost relative to insulated GRP	Comments
Replace with insulated GRP	1.0	Preferred option
Maintain steel with high pressure water flushing	1.9	2 year retreatment rate. 1990 cost over field life. Assumes no replacements. Inadequate reliability.
Maintain steel with acid cleaning and wax coating	2.3	3 year retreatment rate. 1990 cost over field life. Assumes no replacements. Inadequate reliability.
Replace with carbon steel	1.1	Inadequate reliability. Maintenance not included.
Replace with cupronickel	1.6	May not last for field life. Reliability unknown.
Replace with titanium	1.2	Optimistic estimate. Reliability unknown.
Replace with 6% Mo stainless	1.5	
Replace with super duplex stainless	1.7	

Στη συνέχεια αυτή η μελέτη επεκτάθηκε και συμπεριέλαβε μια μελέτη ρίσκου για να καθορίσει κριτήρια λειτουργίας και αποδεκτά όρια, δοκιμές αντοχής σε φωτιά, συστήματα διασφάλισης ποιότητας και τελικά βοήθησε να εγκρίνουν οι κανονισμοί την χρήση FRP με ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη σε συστήματα πυρόσβεσης. Το χειρότερο σενάριο από αυτά που μελετήθηκαν (έκρηξη, φωτιά, ζημιά από κρούση και μακροπρόθεσμη αντοχή) ήταν η φωτιά αερίου υψηλής πίεσης μετά από έκρηξη, όπου βρέθηκε ότι η σωλήνωση FRP (με ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη) :

- άντεχε για μικρό χρονικό διάστημα στην ξηρή κατάσταση όπου η σωλήνωση δεν διαρρέεται από νερό
- αν υπήρχε κατάλληλη εξωτερική προστατευτική επικάλυψη (πάχους περίπου 8 mm από εποξική ρητίνη ή πολυμερές) ή διαρρέοταν από νερό η σωλήνωση, δεν υπήρχε κανένα πρόβλημα αντοχής στη φωτιά (μέσα σε 30 s από την έναρξη της φωτιάς η σωλήνωση διαρρέεται από νερό όπου ακόμα και αν το σύστημα δεν ανταποκριθεί αυτόματα τότε ο χρόνος για την χειροκίνητη έναρξη της πυρόσβεσης είναι 5-10 min)
- έχει επιτρεπτό από τους κανονισμούς επίπεδο διάδοσης της φωτιάς, καθώς και ποσότητα και τοξικότητα του καπνού

- αν η σωλήνωση χτυπηθεί από ισχυρό φορτίο λόγω έκρηξης χρειάζεται άμεση επισκευή, αν και δεν είναι πιο ευαίσθητη από την αντίστοιχη χαλύβδινη
- έχει αντίσταση στην διάβρωση από θαλασσινό νερό που δίνει διάρκεια ζωής 20 χρόνων παρά την σταδιακή απώλεια ιδιοτήτων, όταν η λειτουργική διάρκεια ζωής του ανθρακούχου χάλυβα είναι 5 χρόνια.

Πρέπει να σημειωθεί ότι πλέον οι σωληνώσεις FRP για δίκτυα πυρόσβεσης είναι πολύ πετυχημένες και έχουν καταφέρει να αντικαταστήσουν σε μεγάλο βαθμό υλικά όπως χάλυβα, κράματα νικελίου, ανοξείδωτο χάλυβα, τιτάνιο. Επίσης έχουν αναπτυχθεί ειδικές ρητίνες (σιλοξάνη / φαινολική, PSX) που να μπορούν να αντέξουν σε φωτιά χωρίς να διαρρέονται από νερό για τον χρόνο (5-10 min) που απαιτείται μέχρι την χειροκίνητη έναρξη της πυρόσβεσης (GIBSON 2003).

Μελέτες για την χρήση FRP σωληνώσεων σε πλοία

Μία από τις πρώτες εφαρμογές σύνθετων υλικών στην ναυπηγική ήταν στις σωληνώσεις (Mouritz & Gellert & Burchill & Challis 2001). Το 1951 το πολεμικό ναυτικό των ΗΠΑ εγκατέστησε σωληνώσεις από σύνθετο υλικό σε αντιτορπικό με την προσδοκία να είναι φθηνότερες, ελαφρύτερες και με μεγαλύτερη αντίσταση στην διάβρωση από τις συμβατικές ορειχάλκινες σωληνώσεις. Ωστόσο αυτή η προσπάθεια ήταν ανεπιτυχής γιατί οι σωληνώσεις γρήγορα υποβαθμίστηκαν και είχαν διαρροές όταν μετέφεραν ζεστό νερό. Η μετέπειτα βελτίωση στην ποιότητα και την αντοχή των σύνθετων υλικών οδήγησε το πολεμικό ναυτικό της Αγγλίας και των ΗΠΑ να εγκαταστήσουν κατά την περίοδο 1960 - 1970 σωληνώσεις έρματος από σύνθετο υλικό σε πολεμικά πλοία και φρεγάτες περιπολίας αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, την περίοδο 1969-1973 εγκαταστάθηκαν σε πολλά ταχύπλοα σκάφη του πολεμικού ναυτικού των ΗΠΑ σωληνώσεις έρματος και πόσιμου νερού από FRP και PVC με εξαιρετικά αποτελέσματα (National Steel and Shipbuilding Company 1976). Παρότι εκτιμήθηκε ότι το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης σωληνώσεων από σύνθετα υλικά είναι 15-50% χαμηλότερο από τις αντίστοιχες σωληνώσεις ορείχαλκου ή ανοξείδωτου χάλυβα, σήμερα υπάρχουν ελάχιστες εφαρμογές σύνθετων υλικών στις σωληνώσεις πολεμικών πλοίων και η έρευνα συνεχίζεται αναφορικά με την μελλοντική χρήση σωληνώσεων από σύνθετα υλικά σε πολεμικά πλοία.

Το 1976 ολοκληρώθηκε μια συνεργατική έρευνα πολλών αμερικάνικων οργανισμών (κατασκευαστών FRP σωληνώσεων, βιομηχανιών, ναυπηγείων) αναφορικά με την τεχνική δυνατότητα και την διαφορά αρχικού κόστους (κόστος αγοράς και κόστος αντικατάστασης) από την αντικατάσταση των χαλύβδινων σωληνώσεων μεταφοράς πετρελαίου και έρματος ενός δεξαμενόπλοιου 90000 DWT με FRP. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας παρουσιάζονται στο National Steel and Shipbuilding Company (1976) και το FRP υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τις σωληνώσεις ήταν εποξική ρητίνη με ίνες γυαλιού με μέθοδο κατασκευής την περιέλιξη ινών. Η διαφορά στο κόστος μεταξύ χαλύβδινων και FRP σωληνώσεων και τα γενικά συμπεράσματα ήταν ως εξής:

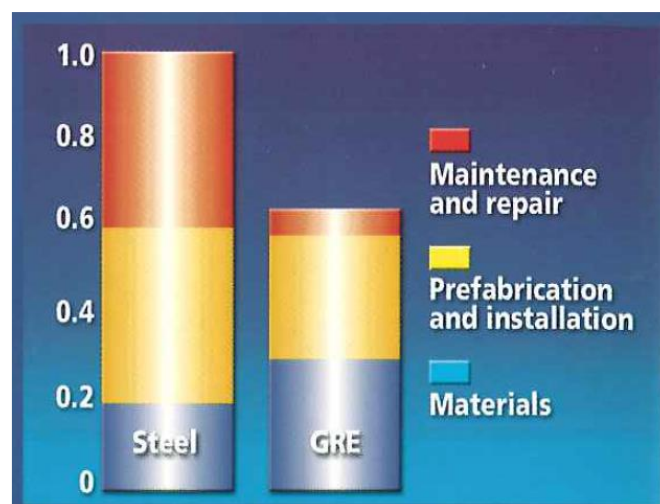
1. Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των σωληνώσεων μεταφοράς πετρελαίου σε όλο το πλοίο (εκτός από το αντλιοστάσιο) είναι στην περίπτωση του FRP 15% μικρότερο σε σχέση με τον χάλυβα.
2. Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των σωληνώσεων έρματος σε όλο το πλοίο (εκτός από το αντλιοστάσιο) είναι στην περίπτωση του FRP 20% μικρότερο σε σχέση με τον χάλυβα.
3. Αυτές οι εκτιμήσεις είναι συντηρητικές καθώς υπολογίστηκαν αρκετά υψηλά εργατικά έξοδα στην περίπτωση των FRP σωληνώσεων παρότι δεν απαιτούνται ιδιαίτερα εξειδικευμένοι εργάτες και οι σωληνώσεις είναι πιο ελαφριές. Μελλοντικά αναμένεται η εξοικονόμηση να αυξηθεί και άλλο με την αυξανόμενη εμπειρία των ναυπηγείων και την βελτίωση στη σχεδίαση FRP σωληνώσεων που θα επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των εργασιών κατά την εγκατάσταση στο πλοίο.
4. Δεν υπάρχουν προβλήματα εγκατάστασης ή σχεδίασης που να αποτρέπουν την εφαρμογή FRP στις σωληνώσεις εμπορικών πλοίων.
5. Λόγω της υψηλής αντίστασης σε διάβρωση, οι σωληνώσεις FRP από εποξική ρητίνη και ίνες γυαλιού μπορούν να έχουν την διάρκεια ζωής του πλοίου
6. Η τραχύτητα των σωληνώσεων FRP είναι μικρότερη από αυτή των χαλύβδινων και μένει σταθερή με την πάροδο του χρόνου οδηγώντας σε μικρότερες απώλειες πίεσης στις σωληνώσεις από FRP.
7. Διάφορα εξαρτήματα μεγάλου βάρους χρειάζονται ξεχωριστή στήριξη στις FRP σωληνώσεις αυξάνοντας τις απαιτήσεις σχεδίασης
8. Η συμπεριφορά της σωλήνωσης FRP σε φωτιά βελτιώνεται αρκετά με κατάλληλη προστατευτική επικάλυψη, ωστόσο στην περίπτωση που δεν υπάρχει ροή υγρού στο εσωτερικό της σωλήνωσης τότε δεν πληρούνται οι απαιτήσεις των Νηογνομόνων

Επισημαίνεται σε αυτή την έρευνα ότι οι βασικοί παράγοντες που περιορίζουν εκείνη την περίοδο την χρήση FRP σε σωληνώσεις πλοίων είναι:

- οι περιορισμένες γνώσεις και εξοικείωση με τα FRP υλικά των σχεδιαστών και των ναυπηγείων και οι περιορισμοί στους κανονισμούς των Νηογνομόνων και γενικά των διαφόρων οργανισμών
- η έλλειψη δεδομένων για τις τάσεις που δημιουργεί η κίνηση του πλοίου στην σωλήνωση ενός πλοίου
- η έλλειψη αποδεκτών πειραματικών κριτηρίων για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης απόδοσης των FRP σωληνώσεων και των ενώσεων τους
- η έλλειψη βασικών σχεδιαστικών πρακτικών σε λεπτομέρειες όπως στηρίξεις, αγκυρώσεις, εγκατάσταση σωληνώσεων που περνούν από στεγανές φρακτές και καταστρώματα, ενώσεις σωληνώσεων

Η εκτίμηση ενός από τους μεγαλύτερους κατασκευαστές σωληνώσεων FRP, της National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (πρώην AMERON) για την σύγκριση του κόστους στην διάρκεια ζωής του πλοίου μεταξύ μιας χαλύβδινης και μιας FRP (ινών γυαλιού με εποξική

ρητίνη) σωλήνωσης φαίνεται στο σχήμα 1.8. Είναι εμφανές από αυτά τα ποιοτικά στοιχεία ότι το αρχικό κόστος είναι ίδιο για τις δύο σωληνώσεις, με μεγαλύτερο κόστος υλικού και μικρότερο κόστος εγκατάστασης για τις FRP σωληνώσεις. Επίσης φαίνεται ότι στην διάρκεια ζωής του πλοίου και λόγω των πολύ μεγαλύτερων εξόδων συντήρησης και επισκευής των σωληνώσεων χάλυβα, είναι οικονομικά συμφέρουσα η επιλογή σωληνώσεων FRP. Όσον αφορά το μικρότερο κόστος εγκατάστασης των σωληνώσεων FRP, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος ένωσης σωληνώσεων FRP με κόλληση είναι πιο εύκολη, γρήγορη, μαθαίνεται γρήγορα στο προσωπικό και καταργεί την ανάγκη για εξειδικευμένους και ακριβούς συγκολλητές και μεθόδους συγκόλλησης. Επίσης δεν απαιτείται βαρύς και ακριβός μηχανισμός εγκατάστασης λόγω του μικρότερου βάρους της σωλήνωσης FRP. Όπως εκτιμάται (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012) το κόστος εγκατάστασης της σωλήνωσης FRP είναι μικρότερο κατά 30-40% σε σχέση με τις χαλύβδινες.



Σχήμα 1.8: Σύγκριση κόστους στην διάρκεια ζωής του πλοίου μεταξύ μιας χαλύβδινης και μιας FRP σωλήνωσης, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems

1.2.2 Χερσαίες εφαρμογές

Η χρήση FRP σωλήνων μεγάλων διαμέτρων σε χερσαίες βιομηχανικές εφαρμογές και κυρίως στην βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι ελκυστική κυρίως λόγω της μεγάλης αντίστασης σε διάβρωση, του χαμηλού κόστους συντήρησης και του κόστους στη διάρκεια ζωής, των υψηλών ειδικών μηχανικών ιδιοτήτων και των μειωμένων απωλειών πίεσης λόγω των πιο λείων επιφανειών. Εκτιμάται ότι το ετήσιο κόστος λόγω της διάβρωσης των μεταλλικών σωληνώσεων και δεξαμενών στην χημική βιομηχανία είναι 82 δισεκατομμύρια δολάρια και ότι περίπου το 1/3 θα μπορούσε να αποφευχθεί με την χρήση FRP. Αυτό εξηγεί την τωρινή αύξηση της χρήσης του FRP στις χερσαίες εφαρμογές σωληνώσεων αλλά και την δυνατότητα μελλοντικής της επέκτασης. Ωστόσο υπάρχουν ακόμα παράγοντες που περιορίζουν την πλήρη αντικατάσταση των συμβατικών μεταλλικών σωληνώσεων όπως είναι το υψηλό αρχικό κόστος των σωληνώσεων από FRP.

Οι FRP σωληνώσεις με ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στην δεκαετία του 1960 στην βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου για μεταφορά εύφλεκτων υγρών, αλλά και σε δίκτυα μεταφοράς νερού και αποχέτευσης. Στις αρχές του 1970 αυξήθηκε η χρήση σωληνώσεων FRP σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας και σε διάφορες μηχανολογικές εγκαταστάσεις και υπήρχε η πεποίθηση ότι το FRP θα κυριαρχήσει στην βιομηχανία σωληνώσεων λόγω της ανώτερης αντίστασης του στην διάβρωση και λόγω της βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των μητρών (βυνιλεστέρες, πολυεστέρες). Ωστόσο εκείνη την περίοδο αναφέρθηκαν και οι πρώτες συχνές αστοχίες των σωλήνων από FRP που οφείλονταν σύμφωνα με έρευνες κατά 95% σε αξονικά και καμπτικά φορτία και εντοπιζόνταν στα σημεία ένωσης των σωληνώσεων (R. J. Lewandowski and W. F. Britt, Jr. , 2004). Οι μηχανικοί αντιμετώπισαν αυτές τις αστοχίες ως εξής:

- χρησιμοποιώντας αγκυρωμένες στηρίξεις (anchored supports) για να περιορίσουν την αξονική κίνηση και τα αξονικά φορτία
- χρησιμοποιώντας οδηγούς (guides) και μειώνοντας την απόσταση μεταξύ των στηρίξεων (supports) της σωλήνωσης για να μειώσουν τα καμπτικά φορτία.

Το 1977 παράγονταν ετησίως 15240 km σωλήνωσης FRP με ίνες γυαλιού για βιομηχανικές εφαρμογές (National Shipbuilding Research Program 1977). Σήμερα η μεγαλύτερη χρήση FRP σωληνώσεων γίνεται στην βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπου πλέον η χρήση FRP σωληνώσεων έχει επεκταθεί σε εφαρμογές υψηλών πιέσεων (28 MPa) για σωληνώσεις τόσο πάνω από το έδαφος όσο και σε υπόγειες εφαρμογές. Επίσης πλέον υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς και εύφλεκτων υγρών που έχουν απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά μέσω της εφαρμογής προστατευτικών επικαλύψεων. Άλλες εφαρμογές FRP αφορούν σωληνώσεις αποχέτευσης που αντικαθιστούν σταδιακά τις αντίστοιχες από σκυρόδεμα. Έχουν επίσης υπάρξει εφαρμογές σωληνώσεων FRP μεγάλης διαμέτρου που μεταφέρουν νερό σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Άλλη χερσαία εφαρμογή είναι σε ανθρακωρυχεία (σχήμα 1.9) για την μεταφορά νερού, όξινου νερού, ιζημάτων άνθρακα, όπου οι FRP σωληνώσεις εποξικής ρητίνης είναι πιο αποδοτικές από τις σωληνώσεις μαλακού χάλυβα λόγω μεγαλύτερης αντίστασης σε διάβρωση και πολύ πιο φθηνές από τις αντίστοιχες από ανοξείδωτο χάλυβα (Ship Structure Committee 1990). Όμοια σε εργοστάσια χαρτοποιίας που εμφανίζονται μεγάλες συγκεντρώσεις υδροξειδίου του νατρίου (υποπροϊόν της διαδικασίας απομελάνωσης) υπάρχουν περιπτώσεις που σωληνώσεις FRP υψηλής αντίστασης σε διάβρωση αντικαθιστούν τις αντίστοιχες από ανοξείδωτο χάλυβα (Ship Structure Committee 1990).



Σχήμα 1.9: Σωλήνωση FRP σε ορυχείο, AMERON 2011

1.3 Κατασκευή σωληνώσεων FRP με περιέλιξη ινών

Η μέθοδος που επιλέγεται για την κατασκευή μιας σωληνώσης από FRP επηρεάζει και τις μηχανικές ιδιότητες που αυτή θα έχει, όπως φαίνεται και στον πίνακα 1.5. Οι σωληνώσεις FRP φτιάχνονται κυρίως από περιέλιξη ινών (filament winding). Πλαστικές σωληνώσεις για εφαρμογές χαμηλής πίεσης κατασκευάζονται με φυγοκεντρική χύτευση (centrifugal casting) και μορφοποίηση με απλή επαφή (contact molding). Οι πρώτες πλαστικές σωληνώσεις φτιάχτηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1940 με φυγοκεντρική χύτευση και ήταν ικανές για χρήση στην χημική βιομηχανία και την βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Στην συνέχεια αναπτύχθηκε η μέθοδος της περιέλιξης ινών για την κατασκευή σωλήνων με μεγαλύτερη αντοχή στην περιφερειακή τάση που έκανε εφικτή την χρήση σωλήνων FRP σε εφαρμογές υψηλής πίεσης.

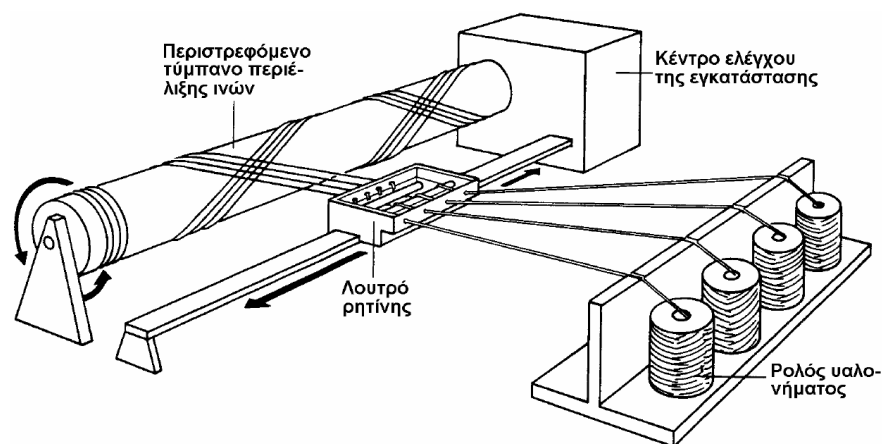
περιέλιξη ινών

Η μέθοδος της περιέλιξης ινών (filament winding) αφορά κυρίως θερμοσκληρυνόμενες μήτρες και μονοδιευθυντικές ενισχυτικές ίνες, είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος κατασκευής σωληνώσεων FRP και οδηγεί στις πιο υψηλές μηχανικές ιδιότητες λόγω του ισχυρού προσανατολισμού των ινών που ελέγχεται με μεγάλη ακρίβεια από τον μηχανικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο (σχήμα 1.10). Η περιέλιξη ινών χρησιμοποιείται για την κατασκευή θαλάμων πίεσης, δεξαμενών, κελύφη πυραυλοκινητήρων, γαστρών για υψηλών

απαιτήσεων υποβρύχια οχήματα και γενικά κατασκευές εκ περιστροφής συμμετρικές (Τσούβαλης 1998).

Πίνακας 1.5: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων σωληνώσεων FRP ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής, Ship Structure Committee 1990

Property	Filament Wound with Epoxy or Polyester Resins	Centrifugally Cast with Epoxy or Polyester Resin	Contact Molded with Polyester Resin
Modulus of Elasticity in Axial Tension @ 77° F, psi	1.0 - 2.7 x 10 ⁶	1.3 - 1.5 x 10 ⁶	0.8 - 1.8 x 10 ⁶
Ultimate Axial Tensile Strength @ 77° F, psi	8,000 - 10,000	25,000	9,000 - 18,000
Ultimate Hoop Tensile Strength @ 77° F, psi	24,000 - 50,000	35,000	9,000 - 10,000
Modulus of Elasticity in Beam Flexure @ 77° F, psi	1 - 2 x 10 ⁶	1.3 - 1.5 x 10 ⁶	1.0 - 1.2 x 10 ⁶
Coefficient of Thermal Expansion, inch/inch/°F	8.5 - 12.7 x 10 ⁶	13 x 10 ⁶	15 x 10 ⁶
Heat Deflection Temperature @ 264 psi, °F	200 - 300	200 - 300	200 - 250
Thermal Conductivity, Btu/ft ² -hr-°F/inch	1.3 - 2.0	0.9	1.5
Specific Gravity	1.8 - 1.9	1.58	1.3 - 1.7
Corrosive Resistance	E	E	NR
E = excellent, will resist most corrosive chemicals NR = not recommended for highly alkaline or solvent applications			



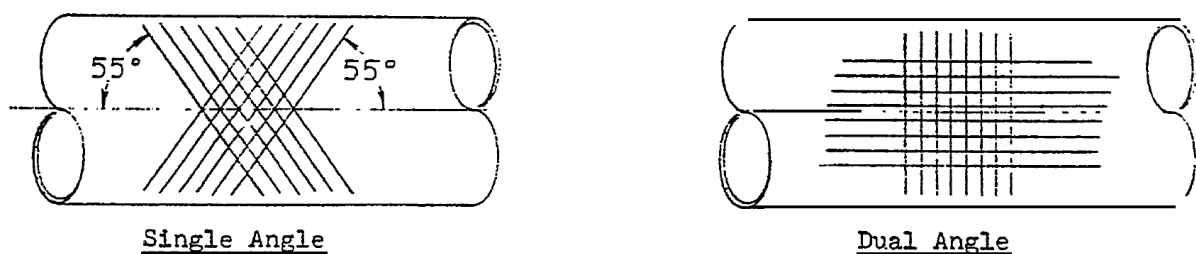
Σχήμα 1.10: Κατασκευή σύνθετου υλικού με την μέθοδο περιέλιξης ινών, Παντελής 2008

Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι οι ενισχυτικές ίνες σε πλεξίδες νήματος (rovings) που είτε είναι προ-εμποτισμένες είτε εμβαπτίζονται την ώρα της κατεργασίας σε ρητίνη, τυλίγονται γύρω από ένα κυλινδρικό καλούπι (mandrel) που έχει την επιδιωκόμενη γεωμετρία μέχρι να επιτευχθεί το απαιτούμενο πάχος σωλήνωσης και στη συνέχεια ακολουθεί σκλήρυνση της ρητίνης σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και χρόνο. Σε περίπτωση διαβρωτικού υγρού μπορεί να υπάρχει και μια ειδική αντιδιαβρωτική στρώση FRP στο εσωτερικό της σωλήνωσης με μεγάλο ποσοστό ρητίνης και ίνες γυαλιού C και συνήθως υπάρχει και μια εξωτερική επίστρωση ρητίνης για προστασία ανάλογα με την εφαρμογή. Ο τροφοδότης ίνας που παρέχει τις πλεξίδες νήματος κινείται κατά μήκος του περιστρεφόμενου κυλίνδρου, η ταχύτητα κίνησης του

τροφοδοτή και περιστροφής του κυλίνδρου καθορίζει τον προσανατολισμό των ινών. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται στην περιέλιξη ινών για σωλήνες είναι συνήθως 2 βαθμών ελευθερίας (περιστροφή και διαμήκης κίνηση). Για σωλήνες χρησιμοποιούμε κυρίως ίνες γυαλιού E και λιγότερο τις πιο δυνατές αλλά και ακριβές S, οι ρητίνες ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή και το κυλινδρικό καλούπι συνήθως είναι από χάλυβα. Άλλα είδη ινών (άνθρακα, aramid) χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις λόγω αυξημένου κόστους.

Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες της σωλήνωσης FRP που κατασκευάζεται με περιέλιξη ινών είναι η τάση που εφαρμόζεται στις ενισχυτικές ίνες και η γωνία περιέλιξης που επιλέγεται ώστε να εξισορροπείται η αξονική και η περιφερειακή τάση. Αυτή η γωνία μετριέται σε σχέση με τον άξονα της σωλήνωσης και κυμαίνεται συνήθως από 53 μέχρι 55 μοίρες, όπου για εφαρμογές που έχουν απαιτήσεις πίεσης συνήθως χρησιμοποιείται γωνία 55 μοιρών (GIBSON 2003)

Με αυτή τη μέθοδο παράγονται FRP σωληνώσεις με υψηλή αντοχή σε περιφερειακή τάση. Αν η διαδικασία περιέλιξης περιλαμβάνει 2 γωνίες περιέλιξης που δημιουργούν 2 στρώσεις ενισχυτικών ινών περιφερειακά και μια στην αξονική διεύθυνση, τότε η αξονική αντοχή είναι το μισό της περιφερειακής αντοχής. Στην περίπτωση που η διαδικασία περιέλιξης περιλαμβάνει μία γωνία περιέλιξης 55 μοιρών τότε η αντοχή της σωλήνωσης FRP στην αξονική διεύθυνση θα είναι το 1/3 της περιφερειακής αντοχής και επίσης η σωλήνωση θα έχει χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας και μεγαλύτερη θερμική διαστολή σε σχέση και την περιέλιξη 2 γωνιών. Η κατασκευή σωληνώσεων με περιέλιξη ινών μίας και δύο γωνιών φαίνεται στο σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Κατασκευή σωληνώσεων με περιέλιξη ινών μίας και δύο γωνιών, National Steel and Shipbuilding Company 1976

Επίσης το γεγονός ότι πλέον η μέθοδος της περιέλιξης ινών μπορεί να είναι πλήρως αυτοματοποιημένη οδηγεί σε μικρότερες κατασκευαστικές ανοχές, χαμηλότερο κόστος και πιο σταθερές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων συγκριτικά με τη μέθοδο μορφοποίησης με απλή επαφή. Το χαμηλότερο κόστος εξηγείται από το γεγονός ότι το εργατικό κόστος είναι μικρότερο και η παραγωγή πιο γρήγορη, παρότι ο μηχανολογικός εξοπλισμός της περιέλιξης ινών είναι πιο ακριβός (Peters 2011). Η μικρότερη αξονική αντοχή που έχουν οι σωλήνες FRP που έχουν κατασκευαστεί με περιέλιξη ινών συγκριτικά με την μορφοποίηση με απλή επαφή οδηγούν και σε μικρότερη απόσταση μεταξύ των στηρίξεων της σωλήνωσης (Lewandowski and Britt, 2004). Οι σωληνώσεις που παράγονται με αυτή τη μέθοδο μπορούν να έχουν διάμετρο από 20

mm μέχρι 2000 mm ή και παραπάνω, ενώ τα συνηθισμένα ελαττώματα που παρουσιάζουν είναι οι μικρές φθορές και η αποκόλληση των ινών και η ύπαρξη κενών (SIMS and BROUGHTON 2000).

1.4 Σκοπός της διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εξοικείωση με τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε σωληνώσεις FRP σε θαλάσσιες εφαρμογές καθώς και με τις συνηθισμένες σχεδιαστικές πρακτικές και απαιτήσεις αυτών των σωληνώσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επίσης επιδιώκεται να εξεταστούν και οι απαιτήσεις και συνηθισμένες πρακτικές που υπάρχουν αναφορικά με τις στηρίξεις και τις ενώσεις γενικά των σωληνώσεων FRP αλλά και πιο ειδικά για ναυπηγικές εφαρμογές. Επίσης επιδιώκεται για την εξοικείωση με τις σωληνώσεις FRP ναυπηγικών εφαρμογών να γίνει μια παρουσίαση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων και των διαστάσεων των εμπορικών σωληνώσεων FRP ναυπηγικής χρήσης και των εξαρτημάτων τους.

Τέλος επιδιώκεται αφού εξεταστούν οι βασικές απαιτήσεις και περιορισμοί των Νηογνομόνων για χρήση FRP σωληνώσεων σε πλοία, να καθοριστούν τα πλοία και το δίκτυο σωλήνωσης όπου στην συνέχεια θα γίνει η σύγκριση του συνολικού κόστους της σωλήνωσης στην διάρκεια ζωής του πλοίου (30 χρόνια) μεταξύ χάλυβα και FRP. Όλη αυτή η διαδικασία φιλοδοξεί να καταλήξει σε ένα συμπέρασμα αναφορικά με την δυνατότητα του FRP να αντικαταστήσει τον χάλυβα για το συγκεκριμένο δίκτυο σωληνώσεων όντας συμφέρουσα οικονομικά και βιώσιμη λειτουργικά εναλλακτική.

Κεφάλαιο 2

Μηχανικές/φυσικές ιδιότητες και κόστος υλικών για ίνες και πλαστικές μήτρες

2.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη των υλικών που χρησιμοποιούνται στα FRP υπήρξε ο πιο σημαντικός λόγος της αύξησης της χρήσης τους γενικά και στην ναυπηγική βιομηχανία ειδικά. Όπως αναφέρεται και από Τσούβαλη (1998), η πιο συνηθισμένη μορφή σύνθετου υλικού είναι τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά (fibre reinforced plastics, FRP). Ίνες (fibres) υψηλής αντοχής, υψηλής δυσκαμψίας και χαμηλής πυκνότητας εμβαπτίζονται σε μια πλαστική μήτρα (matrix) και σταθεροποιούνται μαζί της για τη δημιουργία των υλικών αυτών. Το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής και της δυσκαμψίας προσφέρεται από τις ενισχυτικές ίνες (reinforcing fibres). Η μήτρα διατηρεί τις ίνες ευθυγραμμισμένες και μεταφέρει τα φορτία μεταξύ των σπασμένων ινών.

Όπως είναι φυσικό, οι παράγοντες που επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά του FRP είναι τα χαρακτηριστικά τόσο των ινών (μήκος, διεύθυνση, σχήμα, υλικό) και της μήτρας, όσο και η συνεργασία μεταξύ ινών και μήτρας (διεπιφάνεια, χημικοί δεσμοί, φυσική τραχύτητα, συντελεστής θερμικής διαστολής, δεσμοί χημικής αντίδρασης).

2.2 Ενισχυτικές ίνες, μηχανικές/φυσικές ιδιότητες και κόστος

Όπως αναφέραμε παραπάνω οι ενισχυτικές ίνες προσφέρουν το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής και της δυσκαμψίας του σύνθετου υλικού, καθώς το γεγονός της ευθυγράμμισης της κρυσταλλικής τους δομής με την αξονική τους διεύθυνση τους προσφέρει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό. Οι ενισχυτικές ίνες βελτιώνονται διαρκώς, όπως αναφέρεται σε Τσούβαλης (1998) η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών αυξάνεται συνεχώς την τελευταία εικοσιπενταετία και μπορεί να φτάσει μέχρι 10 και 14 φορές τα αντίστοιχα μεγέθη του αλουμινίου. Οι ιδιότητες των ίδιων των ινών που στη συνέχεια επηρεάζουν την τελική μηχανική συμπεριφορά του FRP εξαρτώνται από χαρακτηριστικά των ινών όπως το υλικό, η γεωμετρία, το ποσοστό τους στο σύνθετο υλικό και ο προσανατολισμός τους. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των ινών είναι τυχόν φθορές που μπορούν να συμβούν στην επιφάνειά τους κατά την παραγωγή και την αποθήκευσή τους (που αντιμετωπίζονται με προστατευτικές επικαλύψεις) καθώς και η έκθεσή τους σε περιβάλλον με υγρασία που υποβαθμίζει τις ιδιότητες τους.

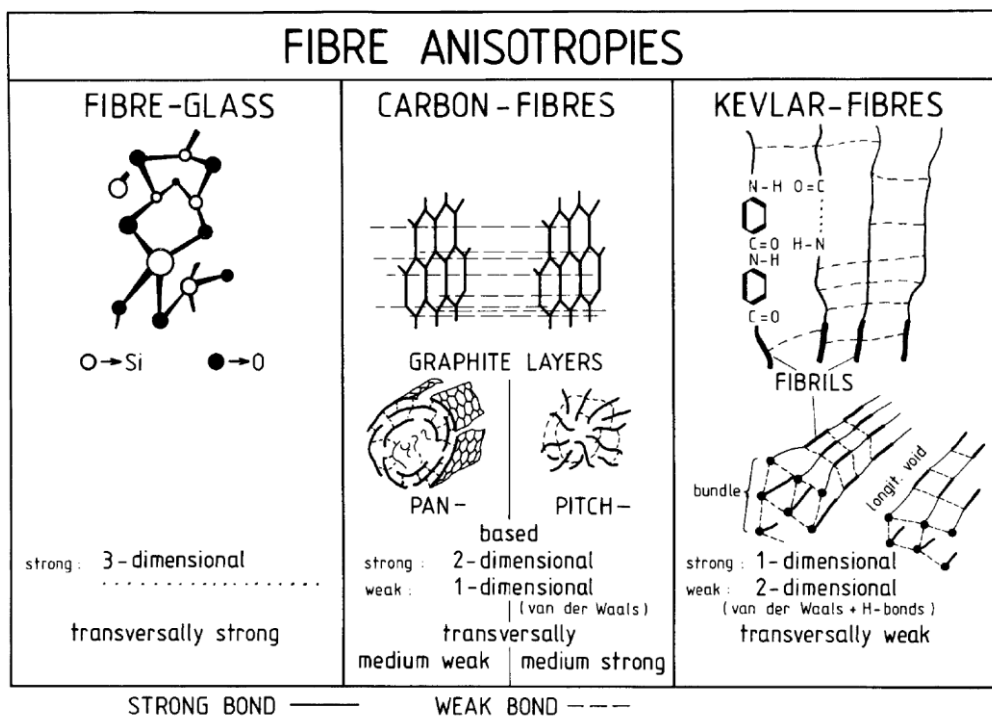
2.1.1 Υλικά ινών

Η επιλογή του υλικού της ίνας εξαρτάται από τις μηχανικές απαιτήσεις και το περιβάλλον της εφαρμογής για την οποία προορίζεται το στοιχείο από FRP αλλά και από τους περιορισμούς

κόστους. Παρότι όλα τα χρησιμοποιούμενα υλικά (γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή) δίνουν ίνες με χαμηλή πυκνότητα και υψηλές τιμές μέτρου ελαστικότητας, αντοχής, δυσθραυστότητας, υπάρχουν ωστόσο σημαντικές αποκλίσεις μηχανικών ιδιοτήτων και κόστους ανάλογα με το υλικό των ινών.

2.2.1.1 Ίνες γυαλιού

Οι ίνες γυαλιού είναι από οι πιο διαδεδομένες ίνες στα FRP υλικά γενικά και στην ναυπηγική ειδικά και είναι πιο ιστροπικές από τις υπόλοιπες ίνες λόγω των ισχυρών ομοιοπολικών δεσμών μεταξύ των ατόμων που οδηγούν σε υψηλή αντοχή και στις 3 διευθύνσεις. Η διαφορά στην δομή της ίνας εξηγεί και την μεγαλύτερη ανισοτροπία των ινών άνθρακα και aramid (σχήμα 2.1). Οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού έχουν υψηλή αντοχή, μονωτικές ιδιότητες και μικρότερο κόστος συγκριτικά με ίνες από άλλα υλικά. Παρότι οι ίνες γυαλιού υστερούν συγκριτικά σε διάφορες μηχανικές ιδιότητες, η παραπάνω αντοχή που δίνουν άλλες ίνες δεν ισοσκελίζει το αρκετά μεγαλύτερο κόστος τους. Πιο συγκεκριμένα οι ίνες άνθρακα είναι τουλάχιστον 5 φορές πιο ακριβές από τις ίνες γυαλιού (Mouritz & Gellert & Burchill & Challis, 2001). Επίσης οι ίνες γυαλιού έχουν μικρή αντοχή στην φθορά από τριβή που οδηγεί στην γρήγορη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων και της πρόσφυσης τους στην πλαστική μήτρα. Άλλο μειονέκτημα των ινών γυαλιού είναι ότι υφίστανται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω μακροχρόνια επιβαλλόμενου φορτίου και υψηλών θερμοκρασιών (ερπυσμός). Οι ίνες γυαλιού δομούνται από οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου.



Σχήμα 2.1: δομή ενισχυτικών ινών, Hartwig and Knaak 1984

Τα βασικά είδη των ινών γυαλιού διακρίνονται βάσει των ιδιοτήτων που προσφέρει η χημική τους σύσταση ως εξής:

Ίνες γυαλιού E

Οι ίνες αυτές έχουν καλές ηλεκτρικές ιδιότητες για αυτό και ονομάζονται E (electrical), επίσης έχουν καλή αντοχή και δυσκαμψία και πολύ καλή συμπεριφορά στην κόπωση, στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών και την υγρασία. Οι ίνες E αποτελούν τις πιο φθηνές και συχνά χρησιμοποιούμενες ίνες γυαλιού στην ναυπηγική λόγω της μηχανικής αντοχής και του κόστους τους. Παρά τα πλεονεκτήματά τους ωστόσο έχουν μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

Ίνες γυαλιού C

Οι ίνες αυτές έχουν υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση για αυτό και ονομάζονται C (corrosion) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με απαιτήσεις αντίστασης σε χημική διάβρωση. Επίσης έχουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες E. Ωστόσο οι ίνες C είναι και πιο ακριβές από τις ίνες E.

Ίνες γυαλιού S

Οι ίνες αυτές έχουν υψηλότερη δυσκαμψία για αυτό και ονομάζονται S (stiffness), επίσης έχουν υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό (περίπου 30% σε σχέση με τις ίνες E) και θερμική αντοχή και καλύτερη συμπεριφορά στην κόπωση. Οι ίνες γυαλιού S χρησιμοποιούνται κυρίως στην αεροναυπηγική βιομηχανία και είναι 3 έως 4 φορές ακριβότερες από τις ίνες E.

Ίνες γυαλιού από καθαρή SiO₂

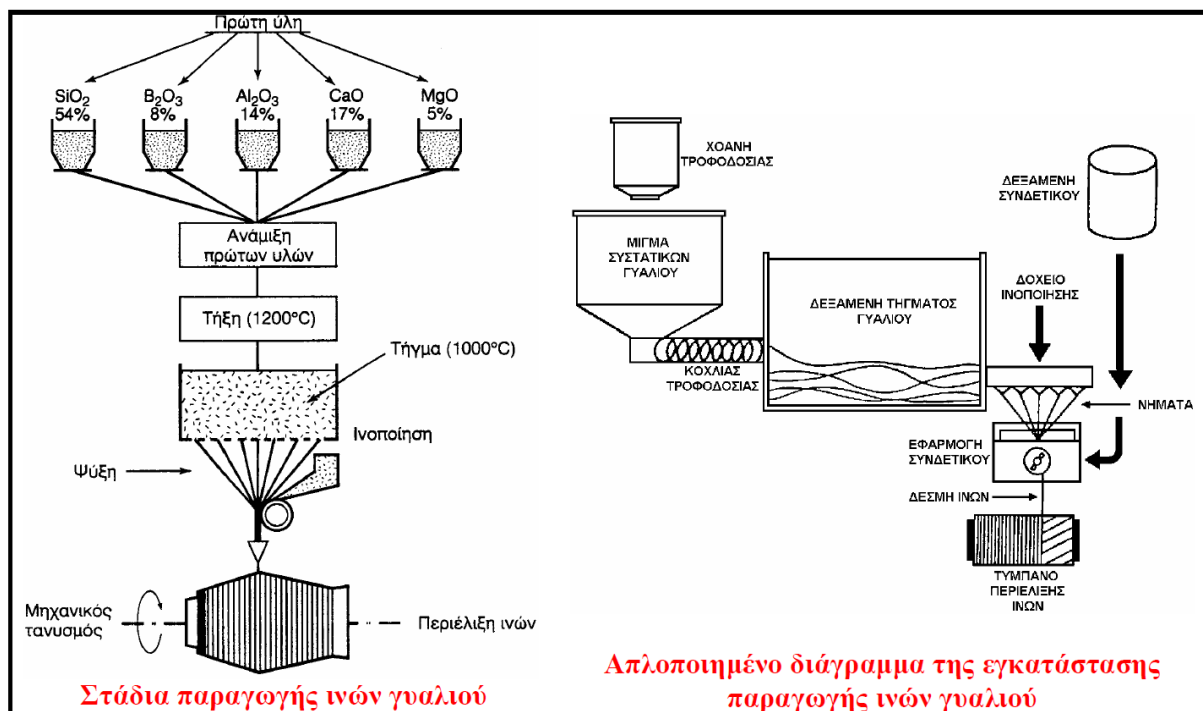
Οι ίνες αυτές έχουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες και θερμοκρασία τήξης συγκριτικά με τους άλλους τύπους ινών γυαλιού, αυτές οι ιδιότητες οφείλονται στην πυριτία.

Οι βασικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες καθώς και η χημική σύσταση των διάφορων ινών γυαλιού αποτυπώνεται στον πίνακα 2.1. Οι ίνες γυαλιού παράγονται χωριστά η καθεμία για να αποφεύγεται η τριβή από απόξεση αναμεταξύ τους που μπορεί να δημιουργήσει μηχανική υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Οι διάμετροι των ινών γυαλιού έχουν ένα εύρος από 4 έως 20μm.

Οι ξεχωριστές ίνες αφού επικαλυφθούν για προστασία από την απόξεση ενώνονται σε ένα νήμα με 102 έως 204 ίνες. Τα βασικά στάδια της παραγωγής αλλά και η εγκατάσταση που απαιτείται φαίνονται στο σχήμα 2.2.

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού, Παντελής 2008

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO ₂ καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

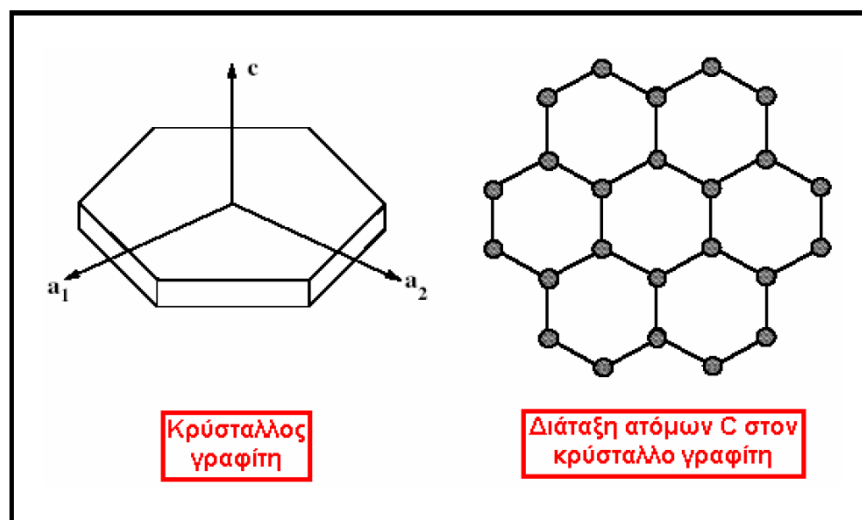


Σχήμα 2.2: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού

2.2.1.2 Ίνες άνθρακα

Παρότι η χρήση ινών άνθρακα είναι περιορισμένη γενικά στην ναυπηγική, χρησιμοποιείται ωστόσο σε ναυπηγικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων (υποβρύχια, ταχύπλοα) και σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν τεχνολογία αιχμής (αεροδιαστημική και αεροναυπηγική βιομηχανία) όπου απαιτούνται οι μέγιστες δυνατές ειδικές ιδιότητες (μηχανική ιδιότητα / πυκνότητα) και πολύ υψηλές τιμές αντοχής και ακαμψίας (οι ίνες άνθρακα έχουν τις μεγαλύτερες τιμές αντοχής και ακαμψίας απ'όλες τις συνηθισμένες ενισχυτικές ίνες). Άλλα πλεονεκτήματα των ινών άνθρακα είναι η χαμηλή θερμική διαστολή που προσφέρουν στο FRP,

η καλή αντοχή σε ερπυσμό και κόπωση και το μεγάλο εύρος του βαθμού ανισοτροπίας. Ωστόσο οι ίνες άνθρακα εμφανίζουν μικρή παραμόρφωση ως την θραύση τους, έχουν μικρή αντοχή σε θλίψη και κυρίως κοστίζουν όπως προαναφέραμε, τουλάχιστον 5 φορές παραπάνω από τις ίνες γυαλιού. Επίσης υπάρχει περιορισμένη εμπειρία της μακροπρόθεσμης απόδοσης των ινών άνθρακα. Οι ιδιότητες των ινών άνθρακα οφείλονται στους δεσμούς που δημιουργεί ο άνθρακας με άλλα άτομα άνθρακα που δημιουργούν και τους πολυκρυσταλλίτες που αποτελούν τον γραφίτη. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3, ο κρύσταλλος του γραφίτη αποτελείται από άτομα άνθρακα σε πολύ πυκνή διάταξη εξαγωνικών επιπέδων. Αυτή η διάταξη προκαλεί ισχυρό ομοιοπολικό δεσμό μεταξύ των ατόμων του άνθρακα σε μικρές κυλινδρικές περιοχές στην διεύθυνση της ίνας και σε αδύναμο δεσμό Wan der Waals μεταξύ αυτών των περιοχών. Αυτοί οι δεσμοί οδηγούν σε ανισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων (με χαμηλή εγκάρσια αντοχή και ακαμψία) και γενικά υψηλό μέτρο διαμήκους ελαστικότητας (ακαμψία) και αντοχής των ινών άνθρακα.

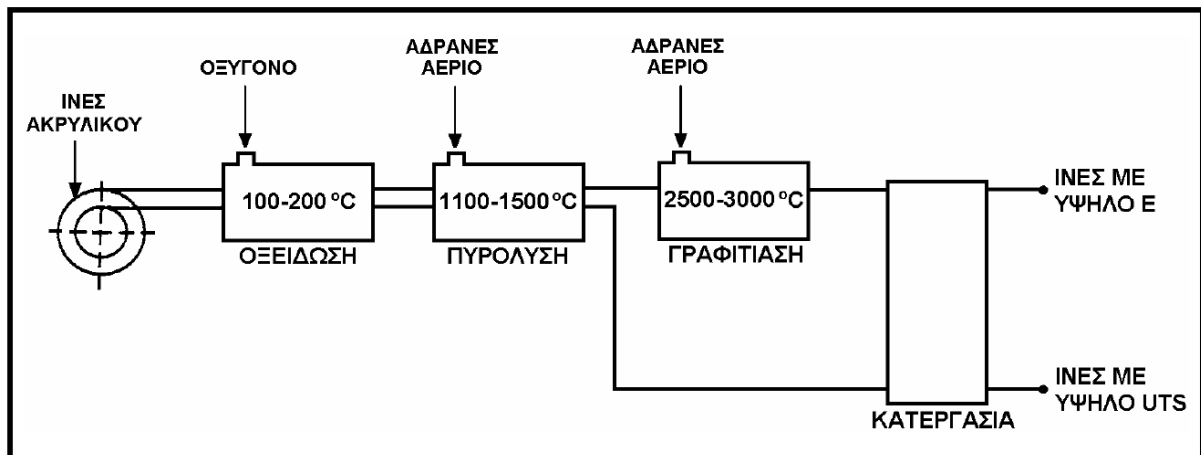


Σχήμα 2.3: Διάταξη ατόμων άνθρακα στον κρύσταλλο γραφίτη

Όλες οι ενισχυτικές ίνες οφείλουν τις υψηλές μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε εφελκυσμό, ακαμψία στην αξονική διεύθυνση) στην ευθυγράμμιση της κρυσταλλικής τους δομής με την αξονική τους διεύθυνση, όμοια ο ισχυρός προσανατολισμός των κρυστάλλων του γραφίτη στην αξονική διεύθυνση οδηγεί στις πιο υψηλές μηχανικές ιδιότητες που έχουν οι ίνες άνθρακα. Η παραγωγή των ινών άνθρακα από πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτριλίου φαίνεται στο σχήμα 2.4.

Άλλες ίνες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ινών άνθρακα είναι ίνες κυτταρίνης (βαμβάκι) και ίνες πίσσας (πετρελαϊκή πίσσα), η δομή των ινών αυτών επηρεάζει τις ιδιότητες και την ανισοτροπία των ινών άνθρακα. Ανάλογα με το αν κατά την κατεργασία των ινών ακολουθεί θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία μετά την οξείδωση και την πυρόλυση, λαμβάνουμε ίνες άνθρακα διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Πιο συγκεκριμένα αν το τελευταίο στάδιο της κατεργασίας είναι η πυρόλυση τότε οι ίνες άνθρακα χαρακτηρίζονται από την υψηλή αντοχή τους, ενώ αν μετά την πυρόλυση ακολουθεί και θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες τότε συμβαίνει γραφίτιωση (αυξάνει το ποσοστό άνθρακα) και ανακρυστάλλωση

που προσανατολίζει ακόμα πιο πολύ τους κρυστάλλους στην αξονική διεύθυνση και οδηγεί σε ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Το ποσοστό γραφίτιας και ανισοτροπίας επομένως επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των ινών άνθρακα.



Σχήμα 2.4: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα, Παντελής 2008

Ο πίνακας 2.2 εμφανίζει τις βασικές ιδιότητες των δύο ειδών ινών άνθρακα, επίσης αναφέρουμε ότι οι ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας είναι ακριβότερες από τις ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα, Παντελής 2008

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

2.2.1.3 Ίνες aramid

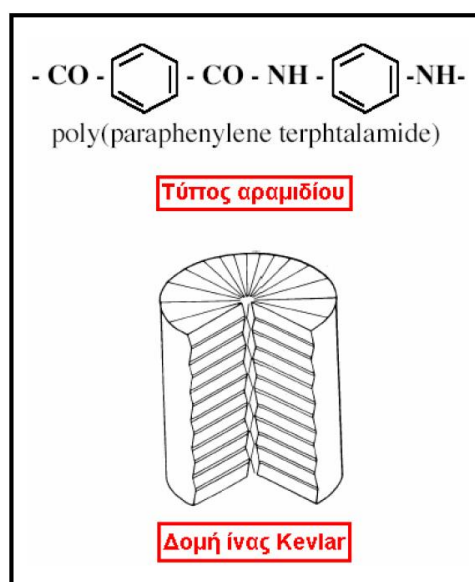
Οι ίνες από aramid έχουν επίσης περιορισμένη εφαρμογή στην ναυπηγική, χρησιμοποιούνται ωστόσο σε ναυπηγικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων και γενικά σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν τεχνολογία αιχμής και σε δυναμικά φορτιζόμενες εφαρμογές. Οι ίνες aramid εμφανίζουν την μεγαλύτερη ανισοτροπία στις μηχανικές ιδιότητες λόγω της δομής τους (σχήμα 2.5) και όταν κατασκευάστηκαν το 1971 ήταν οι πρώτες ίνες από την ευρύτερη οικογένεια των ινών πολυμερούς (Nylon, πολυαιθυλένιο) που έχουν αρκετή ακαμψία ώστε να μπορούν να αποτελέσουν ενισχυτικές ίνες σε εφαρμογές από FRP. Οι διάφορες ίνες aramid έχουν τις μηχανικές ιδιότητες που φαίνονται ενδεικτικά στον πίνακα 2.3, επισημαίνουμε την πολύ υψηλή ειδική αντοχή σε εφελκυσμό που οφείλεται στην υψηλή τιμή αντοχής σε εφελκυσμό και στην χαμηλή πυκνότητά τους (χαμηλότερη των ινών γυαλιού και άνθρακα). Επίσης οι ίνες από aramid εμφανίζουν καλή συμπεριφορά σε φωτιά και υψηλή αντοχή σε κρούση και κόπωση. Η διαφορετική ακαμψία που παρατηρείται στον πίνακα 2.3 για

τις δύο ίνες aramid οφείλεται στην μεγαλύτερη ευθυγράμμιση των μοριακών αλυσίδων (άρα και μεγαλύτερη ανισοτροπία) που αυξάνει την διαμήκη ακαμψία της ίνας.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών aramid, Παντελής 2008

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

Οι ίνες aramid οφείλουν τις υψηλές μηχανικές ιδιότητές τους στις ισχυρές πολυμερικές δομικές αλυσίδες που δημιουργούν ένα σταθερό επίπεδο πλέγμα που συγκρατείται κατά την αξονική διεύθυνση των ινών από τον κυλινδρικό φλοιό τους. Αυτή η δομή των ινών aramid, που φαίνεται στο σχήμα 2.5 τις κάνει ανισοτροπικές, δηλαδή δημιουργεί υψηλές μηχανικές ιδιότητες στην αξονική διεύθυνση και χαμηλές στην εγκάρσια. Επίσης η δομή των ινών aramid προκαλεί και την πολύ καλή συμπεριφορά τους σε κραδασμούς. Μειονεκτήματα των ινών aramid αποτελούν το υψηλό τους κόστος που υπερβαίνει το κόστος των ινών άνθρακα (περίπου διπλάσιο όπως αναφέρεται σε Παντελής 2008) και η χαμηλή αντοχή τους σε θλίψη και κάμψη (όπου μια αξονική πλαστική παραμόρφωση 0.3% δημιουργεί αστοχία πλαστικού τύπου). Επίσης οι ίνες από aramid εμφανίζουν μεγάλη απορρόφηση υγρασίας σε σχέση με τις άλλες ενισχυτικές ίνες.

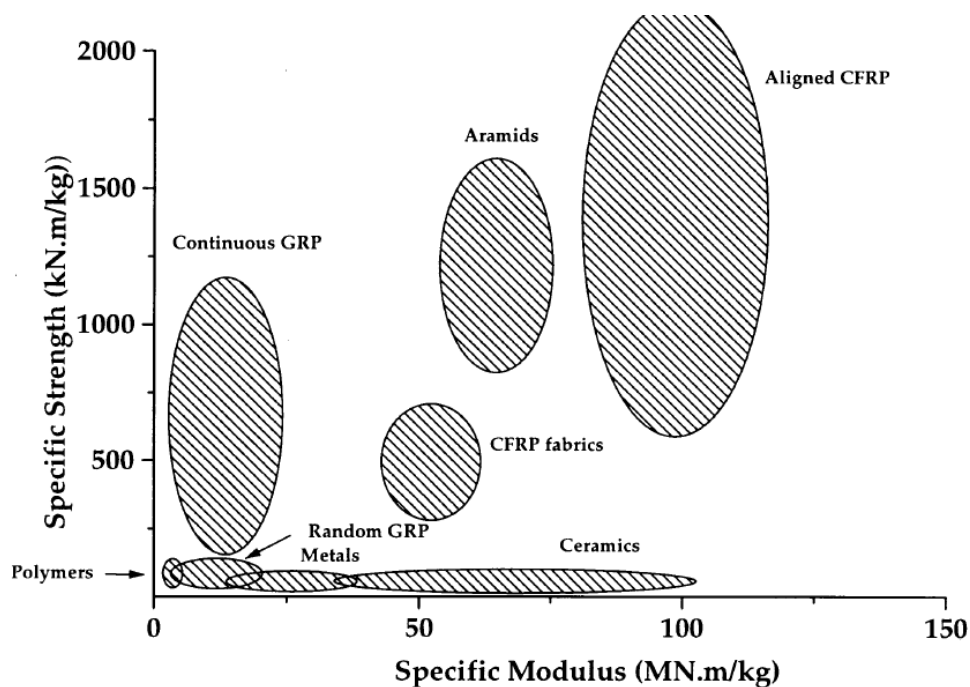


Σχήμα 2.5: Δομή ινών aramid

2.2.1.4 Σύγκριση υλικών ινών

Συνοψίζοντας την παρουσίαση των βασικών κατηγοριών ενισχυτικών ινών που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική, παραθέτουμε συγκεντρωτικούς πίνακες των διάφορων ινών

που συγκρίνουν τις ιδιότητες τους. Συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι το βασικό μειονέκτημα των ινών γυαλιού είναι οι σχετικά μικρότερες ειδικές μηχανικές ιδιότητες τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Ωστόσο οι μικρότερες ειδικές μηχανικές ιδιότητες των ινών γυαλιού οφείλονται κυρίως στην σχετικά μεγάλη πυκνότητά τους, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.4. Επομένως τα υλικά FRP που χρησιμοποιούν ίνες γυαλιού μπορούν να έχουν όμοια υψηλές μηχανικές ιδιότητες με μόνο μειονέκτημα το μεγαλύτερο συγκριτικά βάρος σε σχέση με αυτό των υπολοίπων ενισχυτικών ινών. Ωστόσο το πολύ μικρότερο κόστους τους, ειδικά των ινών E, τις καθιστά την πιο αποδοτική επιλογή και στις ναυπηγικές εφαρμογές και συγκεκριμένα στις σωληνώσεις. Στη συνέχεια παραθέτουμε στοιχεία που αφορούν την θερμική ευστάθεια των διαφόρων ινών (πίνακας 2.5).



Σχήμα 2.6: Ειδική ακαμψία και ειδική αντοχή διαφόρων ινών, SIMS and BROUGHTON 2000

Πίνακας 2.4: Μηχανικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών, Ship Structure Committee 1997

Fiber	Density		Tensile Strength		Tensile Modulus		Ultimate Elongation
	lb/in ³	gms/cm ³	psi x 10 ³	Mpa	psi x 10 ⁶	Gpa	
E-Glass	.094	2.60	500	3450	10.5	72	4.8%
S-Glass	.090	2.49	665	4590	12.6	87	5.7%
Aramid-Kevlar [®] 49	.052	1.44	525	3620	18	124	2.9%
Polyester-COMPET [®]	.049	1.36	150	1030	1.4	10	22.0%
Carbon-PAN	.062-.065	1.72-1.80	350-700	2400-4800	33-57	228-393	0.38-2.0%

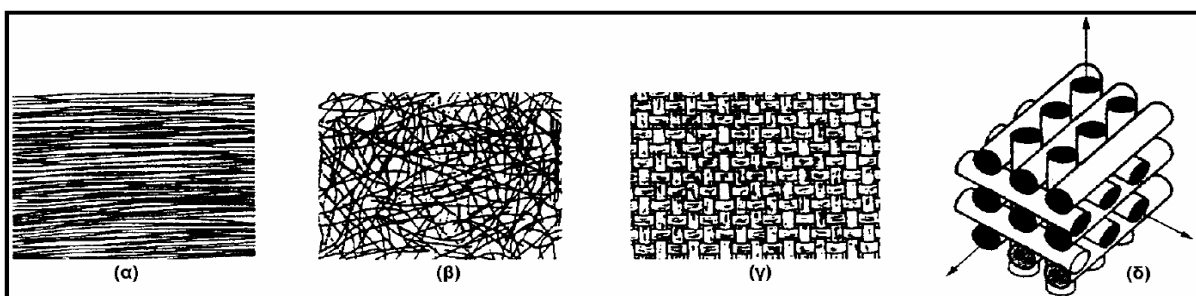
Πίνακας 2.5: Μέγιστη θερμοκρασία διάφορων ινών

Ίνα	T_{\max} (°C)
Spectra	150
Kevlar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000*

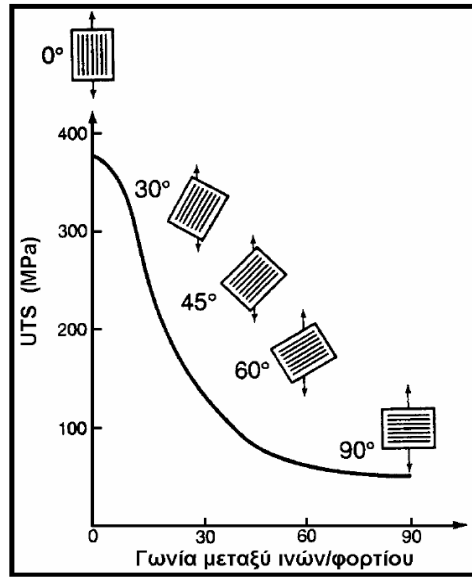
* Παρουσία οξυγόνου: $T_{\max}=500$ °C

2.1.2 Προσανατολισμός ινών

Όμοια και η διεύθυνση των ινών μέσα στην μήτρα και ως προς την επιβαλλόμενη τάση επηρεάζει την τελική αντοχή του σύνθετου υλικού και αποτελεί στοιχείο κατηγοριοποίησης των FRP υλικών όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7, σε μονοδιευθυντικά, όπου οι ίνες έχουν την ίδια διεύθυνση και σε πολυδιευθυντικά, όπου οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Με τη σειρά τους τα πολυδιευθυντικά FRP διακρίνονται: σε ίνες τυχαίας διεύθυνσης, ίνες σε πλέξη ύφανσης, ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση. Ο μονοδιευθυντικός προσανατολισμός των ινών δημιουργεί ισχυρή ανισοτροπία, πιο συγκεκριμένα η μηχανική αντοχή των μονοδιευθυντικών ινών είναι μεγάλη αν η διεύθυνση επιβολής του φορτίου ταυτίζεται με τον προσανατολισμό των ινών και μειώνεται καθώς αυξάνεται η σχετική γωνία. Η επίδραση της διεύθυνσης επιβολής του φορτίου στην αντοχή των μονοδιευθυντικών ινών φαίνεται στο σχήμα 2.8. Στην περίπτωση των πολυδιευθυντικών FRP οι ίνες εμφανίζουν πιο ισοτροπική συμπεριφορά. Ισοτροπική συμπεριφορά εμφανίζουν και τα πολυστρωματικά FRP που αποτελούνται από στρώσεις διαφορετικού προσανατολισμού με μονοδιευθυντικές ίνες.



Σχήμα 2.7: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη, Παντελής 2008



Σχήμα 2.8: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού, Παντελής 2008

2.2.3 Γεωμετρία ινών

Μία άλλη διάκριση των FRP στηρίζεται στην γεωμετρία των ινών και πιο συγκεκριμένα στο λόγο μήκους προς διάμετρο (l/d) των ινών, ως εξής: συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες, όταν $l/d \geq 100$, ασυνεχείς ή κοντές ίνες, όταν $l/d < 100$, νηματίδια ή τριχίτες (λεπτοί μονοκρύσταλλοι κεραμικού υλικού) όταν $d < 1\mu m$ και $l \cong 100\mu m$. Η γεωμετρία των ινών επηρεάζει και τις τελικές ιδιότητες του FRP, πιο συγκεκριμένα οι συνεχείς ίνες προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή από τις ασυνεχείς. Όπως αναφέρεται σε Παντελής (2008), η αντοχή των ινών αυξάνεται με αύξηση του μήκους και μείωση της διαμέτρου τους. Γενικά η επιλογή γεωμετρίας των ινών και η κατανομή τους μέσα στο FRP υλικό σχετίζεται με τις επιδιωκόμενες μηχανικές ιδιότητες αλλά και με την κατεργασία που έχουμε επιλέξει για μία συγκεκριμένη εφαρμογή (πίνακας 2.6).

2.2.4 Ποσοστό ινών στο σύνθετο υλικό

Η κατ' όγκο αναλογία των ινών στο σύνθετο υλικό επηρεάζει την τελική αντοχή του. Πιο συγκεκριμένα όπως αναφέρεται σε Παντελή (2008), η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού αυξάνονται, με αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ενισχυτικών ινών. Ωστόσο για ποσοστά ινών μεγαλύτερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου υλικού, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

Πίνακας 2.6: Μήκος και διάταξη ινών γυαλιού για διάφορα FRP, κατεργασίες και εφαρμογές, SIMS and BROUGHTON 2000

<i>Fiber format</i>	<i>Fiber length (mm)</i>	<i>Composite materials types</i>	<i>Normal process routes</i>	<i>Typical applications</i>
Milled	<0.1	Molding compounds	Injection molded	Electrical Automobile
Discontinuous- short	<1	Molding compounds	Injection molded	Electrical, Automobile
Discontinuous- long	<7.5	Molding compounds	Injection molded	Electrical, Automobile
Chopped strand mat	7.5–50	CSM, Dough molding compounds (DMC), Sheet molding compounds (SMC)	Hand lay-up, Spray lay-up, Compression molded	Marine, Chemical tanks, General trade moldings
Swirled mat	Continuous	Glass mat thermoplastics (GMT), Pultruded profiles,	Thermoformed, Pultrusion	Automobile components, Access engineering, Cable trays, All
Stitched, pinned, needled products	All	Any, where important to improve through-thickness properties (see below)	Most	All
Woven fabrics	Continuous	Lighter weight cloths 200–450 g m ⁻² . Different styles (twill, balanced, satin)	Resin injection, Hand lay-up, Press molded (including autoclave)	General engineering, pressure vessels, Marine
Woven rovings	Continuous	Heavier weight cloths	Hand and machine lay-up, Pultrusion, Resin injection	Heavy marine
Knitted	Continuous	2-D and 3-D fabrics	Resin injection	Construction, randomes, propellers
Noncrimp fabrics, NCF	Continuous	Bi-, Tri- and Quad-axial (stitched)	Resin injection, Hand lay-up, Press molded (including autoclave)	Marine, construction, automobile.
Multidirectional	Continuous	Preimpregnates (automobile and aerospace grades). Rovings	Press molded (including autoclave). Filament winding	High performance aerospace, F1 racing, Pipes, torque tubes, rocket motor cases
Unidirectional	Continuous	Preimpregnates (automobile and aerospace grades),	Press molded (including autoclave), Pultruded strip/bar	Wind turbine blades,

2.2.5 Προστατευτικές επικαλύψεις ινών

Οι προστατευτικές επικαλύψεις ινών χρησιμοποιούνται είτε με σκοπό την προσωρινή προστασία των ινών από την τριβή με άλλες ίνες που προκαλεί μείωση της μηχανικής αντοχής τους, είτε για την βελτίωση της αρχικής πρόσφυσης μεταξύ ινών και μήτρας. Στην περίπτωση που η προστατευτική επικάλυψη μιας ίνας προορίζεται για προσωρινή προστασία (αμυλέλαια συνήθως), τότε μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα με θέρμανση για 15 έως 20 ώρες, σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 340°C. Στην περίπτωση που η προστατευτική επικάλυψη μιας ίνας προορίζεται για βελτίωση της αρχικής πρόσφυσης μεταξύ ινών και μήτρας, τότε η επικάλυψη διαρκεί και συνεισφέρει επίσης στην μείωση των αρνητικών αποτελεσμάτων από την απορρόφηση υγρασίας και από άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι διάφορες επικαλύψεις που συνήθως χρησιμοποιούνται σε ίνες γυαλιού ανάλογα και με την ρητίνη που χρησιμοποιείται στο σύνθετο υλικό, φαίνονται στον πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7: Επικαλύψεις ινών γυαλιού, Ship Structure Committee 1990

Designation	Type of Finish	Resin System
114	Methacrylate chromic chloride	Epoxy
161	Soft, clear with good wet-out	Polyester
Volan [®]	Methacrylate chromic chloride	Polyester or Epoxy
504	Volan [®] finish with .03%-.06% chrome	Polyester or Epoxy
504A	Volan [®] finish with .06%-.07% chrome	Polyester or Epoxy
A-100	Amino silane	Epoxy
538	A-1100 amino silane plus glycerine	Epoxy
550	Modified Volan [®]	Polyester
558	Epoxy-functional silane	Epoxy
627	Silane replacement for Volan [®]	Polyester or Epoxy
SP 550	Proprietary	Polyester or Epoxy
Y-2967	Amino silane	Epoxy
Y-4086/7	Epoxy-modified methoxy silane	Epoxy
Z-6040	Epoxy-modified methoxy silane	Epoxy
Z-6030	Methacrylate Silane	Polyester
Garan	Vinyl silane	Epoxy
NOL-24	Halosilane (in xylene)	Epoxy
S-553	Proprietary	Epoxy
S-920	Proprietary	Epoxy
S-735	Proprietary	Epoxy

2.3 Πλαστικές μήτρες, μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και κόστος

2.3.1 Γενικά για τις μήτρες

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, η μήτρα διατηρεί τις ίνες ευθυγραμμισμένες, μεταφέρει τα φορτία μεταξύ των ινών, εμποδίζει την διάδοση των ρωγμών που δημιουργούνται από την θραύση των ινών και τις προστατεύει από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος. Επίσης η λειτουργία της μήτρας είναι απαραίτητη για την αντοχή του σύνθετου υλικού σε διάφορα είδη τάσεων (διατμητική, θλιπτική, καμπτική) και την αντοχή στην κρούση. Αυτή η λειτουργία της μήτρας συμβάλει στην προστασία των ινών και συνολικά του σύνθετου υλικού FRP και καθορίζει την επεξεργασιμότητα, την διατμητική αντοχή, την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και συνολικά την αντοχή του FRP. Συνηθισμένες απαιτήσεις για τις μήτρες είναι να εμφανίζουν επαρκή επεξεργασιμότητα, αντοχή, σχετική ευκαμψία και σημείο τήξης μεγαλύτερο από την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Συνήθως η μήτρα έχει μικρότερη ακαμψία, αντοχή και πυκνότητα από τις ίνες.

Οι μήτρες διακρίνονται ανάλογα με το υλικό τους σε πλαστικές (πολυμερικές), μεταλλικές και κεραμικές. Τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε τύπο μήτρας που φαίνονται στο σχήμα 2.9, είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της κατάλληλης μήτρας για μια εφαρμογή δεδομένης θερμοκρασίας. Επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της κατάλληλης μήτρας είναι το περιβάλλον που υπάρχει σε μια δεδομένη εφαρμογή (και οι απαιτήσεις του υλικού της μήτρας που αντιστοιχούν σε αυτό το περιβάλλον), το κόστος του

υλικού της μήτρας και της κατεργασίας, οι μηχανικές ιδιότητες και η αντοχή στη φωτιά. Συνοπτικά αναφέρουμε ότι γενικά οι πλαστικές (πολυμερικές) μήτρες έχουν κάποια μειονεκτήματα που επηρεάζουν και την συμπεριφορά των σύνθετων υλικών, όπως η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, οι υψηλοί συντελεστές θερμικής διαστολής, η υψηλή διόγκωση λόγω υγρασίας, η σχετικά χαμηλή ακαμψία. Ωστόσο εμφανίζουν και πλεονεκτήματα όπως το χαμηλότερο βάρος τους, η καλύτερη αντίσταση σε διάβρωση και η σχετικά εύκολη και φθηνή διαδικασία παραγωγής τους.



Σχήμα 2.9: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών

2.3.2 Πλαστικές (πολυμερικές) μήτρες

Καθώς μας ενδιαφέρουν τα FRP υλικά και η αξιοποίησή τους στις σωληνώσεις, θα επικεντρωθούμε στις πλαστικές (πολυμερικές) μήτρες. Οι πλαστικές (πολυμερικές) μήτρες αποτελούνται από δύο μεγάλες οικογένειες, τις θερμοπλαστικές και τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Οι θερμοπλαστικές ρητίνες είναι πολυμερή που αποτελούνται από μοριακές αλυσίδες με ασθενείς δεσμούς μεταξύ τους (δυνάμεις Van der Waals), που καταργούνται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία που είναι αντιστρεπτή οδηγεί τις θερμοπλαστικές ρητίνες μακροσκοπικά να μαλακώσουν. Αυτή η ιδιότητα περιορίζει την εκτεταμένη αξιοποίησή τους στην ναυπηγική όπου σε πολλές εφαρμογές απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και αντοχή σε φωτιά. Ωστόσο χρησιμοποιείται σε ναυπηγικές εφαρμογές που δεν υπάρχουν οι παραπάνω περιορισμοί και γενικά σε εφαρμογές όπου το χαμηλό τους κόστος είναι σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του υλικού της μήτρας. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι πολυμερή που αποτελούνται από ένα τρισδιάστατο πλέγμα μοριακών αλυσίδων με ισχυρούς δεσμούς μεταξύ τους, που αυξάνονται σε αριθμό με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή η διαδικασία δεν είναι αντιστρεπτή και οδηγεί μακροσκοπικά τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες σε σκλήρυνση και μεγαλύτερη ψαθυρότητα. Η διαδικασία της σκλήρυνσης ελέγχεται κυρίως μέσω της θερμοκρασίας και του χρόνου αλλά και μέσω προσθήκης καταλύτη και σκληρυντικών (hardeners).

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ρητίνες σε ναυπηγικές εφαρμογές, κυρίως λόγω των απαιτήσεων μηχανικής αντοχής, θερμοκρασίας και αντοχής σε φωτιά και λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς τους σε περιβάλλον υγρασίας. Ωστόσο επειδή η διαδικασία σκλήρυνσης δεν είναι αντιστρεπτή, οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες δεν μπορούν να λιώσουν και να επαναδιαμορφωθούν, καθιστώντας αδύνατη την ανακύκλωση τους (SIMS and BROUGHTON 2000). Οι βασικές κατηγορίες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών παρουσιάζονται παρακάτω.

2.3.2.1 Εποξικές ρητίνες

Οι εποξικές ρητίνες έχουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και εμφανίζουν την μικρότερη συρρίκνωση κατά την διαδικασία σκλήρυνσης από όλες τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική βιομηχανία (Ship Structure Committee 1997). Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι περίπου 200 °C και οι ιδιότητες τους ποικίλουν ανάλογα με την διαδικασία σκλήρυνσης που ακολουθείται (πίνακας 2.8). Άλλα πλεονεκτήματα των εποξικών ρητινών είναι η καλύτερη αντίσταση τους στην διάβρωση (ειδικά σε αλκάλια και οργανικούς διαλύτες) και την απορρόφηση νερού σε σχέση με τις πολυεστερικές ρητίνες. Ωστόσο έχουν μέτρια αντίσταση σε διάβρωση απέναντι σε ισχυρά οξέα και όπως αναφέρεται από Τσούβαλη (1998), το υψηλό κόστος υλικού και παραγωγής τους περιορίζει την χρήση τους στην ναυπηγική βιομηχανία κυρίως σε εφαρμογές και σκάφη υψηλών απαιτήσεων. Αναφορικά με τις σωληνώσεις από FRP σε θαλάσσιες εφαρμογές γενικά και σε πλοία συγκεκριμένα, οι εποξικές ρητίνες είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες με ενίσχυση από ίνες γυαλιού (Glass Reinforced Epoxy – GRE). Επίσης εποξικές ρητίνες υψηλότερων μηχανικών ιδιοτήτων και κόστους χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική και αεροναυπηγική βιομηχανία.

Πίνακας 2.8: Ιδιότητες εποξικών ρητινών ανάλογα με την διαδικασία σκλήρυνσης, Ship Structure Committee 1997

Cure Schedule	Hardener Used	Flexural Strength		Flexural Modulus		Tensile Strength		Tensile Modulus		Elongation at Break
		ksi	Mpa	ksi	Mpa	ksi	Mpa	ksi	Mpa	
5 hours @ 50° C	Slow	23.4	161	0.46	3.17	11.3	78	0.45	3.10	6.4%
	1:1	23.2	160	0.52	3.59	11.2	77	0.48	3.31	7.2%
	Fast	23.1	159	0.52	3.59	10.7	74	0.48	3.31	7.0%
16 hours @ 45° - 50° C	Slow	23.2	160	0.54	3.72	11.6	80	0.49	3.38	5.6%
	1:1	22.8	157	0.55	3.79	11.6	80	0.49	3.38	5.8%
	Fast	27.1	187	0.54	3.72	12.6	87	0.49	3.38	5.5%
4 weeks @ 18° - 30° C	Slow	14.8	102	0.52	3.59	9.1	63	0.52	3.59	3.3%
	1:1	18.9	130	0.54	3.72	10.0	69	0.52	3.59	3.4%
	Fast	19.6	135	0.54	3.72	11.2	77	0.52	3.59	3.4%

2.3.2.2 Πολυεστερικές ρητίνες

Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι οι πιο συνηθισμένες στην ναυπηγική βιομηχανία και συχνά συνδυάζονται με ενισχύσεις από ίνες γυαλιού στα χρησιμοποιούμενα FRP υλικά. Η εκτεταμένη χρήση τους οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελούν την πιο φθηνή, απλή, εύκολη στη χρήση, λιγότερο τοξική και με καλή χημική αντίσταση ρητίνη (Ship Structure Committee 1997). Η καλή χημική τους αντίσταση αφορά οξέα, αλκάλια και οργανικούς διαλύτες. Επίσης οι πολυεστερικές ρητίνες έχουν καλή συμπεριφορά σε θαλάσσιο περιβάλλον (Τσούβαλης 1998).

Στην ναυπηγική χρησιμοποιούνται ως μήτρες, πολυεστερικές ρητίνες που σκληραίνουν όταν εκτίθενται στον αέρα. Αυτή η διαδικασία σκλήρυνσης είναι εξώθερμη και γίνεται χωρίς παροχή θερμότητας με την παρουσία επιταχυντή και καταλύτη. Οι δύο βασικές κατηγορίες πολυεστερικών ρητινών που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική είναι οι εξής: Οι ορθοφθαλικοί πολυεστέρες, αναπτύχθηκαν πρώτοι και χρησιμοποιούνται ακόμα ευρέως στην κατασκευή μικρών σκαφών (Τσούβαλης 1998). Παρότι είναι πιο φθηνοί, έχουν περιορισμένη θερμική ευστάθεια, χημική αντίσταση και χαρακτηριστικά κατεργασίας (Ship Structure Committee 1997). Οι ισοφθαλικοί πολυεστέρες, έχουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες και χημική αντίσταση και εμφανίζουν αυξημένη αντίσταση στην διείσδυση του νερού ώστε να χρησιμοποιούνται και σαν προστατευτική επικάλυψη σε εφαρμογές σε θαλάσσιο περιβάλλον (Ship Structure Committee 1997).

2.3.2.3 Βυνιλεστερικές ρητίνες

Οι βυνιλεστερικές ρητίνες παρουσιάζουν ανώτερη αντοχή σε διάβρωση (κετόνες, εστέρες) και μειωμένη απορρόφηση νερού από τις πολυεστερικές ρητίνες, συγκεκριμένα θεωρείται ότι μια στρώση βυνιλεστερικής ρητίνης πάχους 20-50 mm αποτελεί ένα εξαιρετικό φράγμα που αποτρέπει την απορρόφηση νερού από το σύνθετο υλικό (Ship Structure Committee 1997). Άλλα πλεονεκτήματα των βυνιλεστερικών ρητινών σε σχέση με τις πολυεστερικές ρητίνες είναι η μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση και κόπωση, η καλύτερη συμπεριφορά σε ερπυσμό. Ωστόσο η χρήση βυνιλεστερικών ρητινών στην ναυπηγική βιομηχανία είναι περιορισμένη κυρίως σε μικρά σκάφη υψηλών απαιτήσεων, λόγω του υψηλού τους κόστους (Τσούβαλης 1998). Αναφορικά με την χρήση τους σε σωληνώσεις FRP γενικά, οι βυνιλεστερικές ρητίνες με ενίσχυση από ίνες γυαλιού αποτελούν συνηθισμένη επιλογή όταν υπάρχουν απαιτήσεις αντοχής και αντίστασης σε διάβρωση και απορρόφηση υγρασίας.

2.3.2.4 Φαινολικές ρητίνες

Οι φαινολικές ρητίνες έχουν την μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας (400°C) και αντοχή σε φωτιά από τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Άλλα πλεονεκτήματα των φαινολικών ρητινών είναι τα χαρακτηριστικά μειωμένης διάδοσης της φωτιάς και ο αυξημένος χρόνος ανάφλεξης, η χαμηλή εκπομπή καπνού λόγω φωτιάς και η χαμηλή τοξικότητα του καπνού. Ωστόσο έχουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις εποξικές ρητίνες και απορροφούν τριπλάσια ποσότητα νερού από τις πολυεστερικές ρητίνες λόγω της σκλήρυνσης τους που δημιουργεί πολλά κενά (Τσούβαλης 1998). Αυτή η συμπεριφορά των φαινολικών ρητινών στο θαλάσσιο περιβάλλον μειώνει μακροπρόθεσμα την αντοχή τους και περιορίζει την χρήση τους σε ναυπηγικές εφαρμογές όπου υπάρχει άμεση επαφή με νερό. Οι εξαιρετικές τους ωστόσο ιδιότητες απέναντι στη φωτιά και το κόστος τους (παρόμοιο με τις πολυεστερικές ρητίνες) τις καθιστούν μια ελκυστική λύση στις προστατευτικές επιστρώσεις σωληνώσεων FRP.

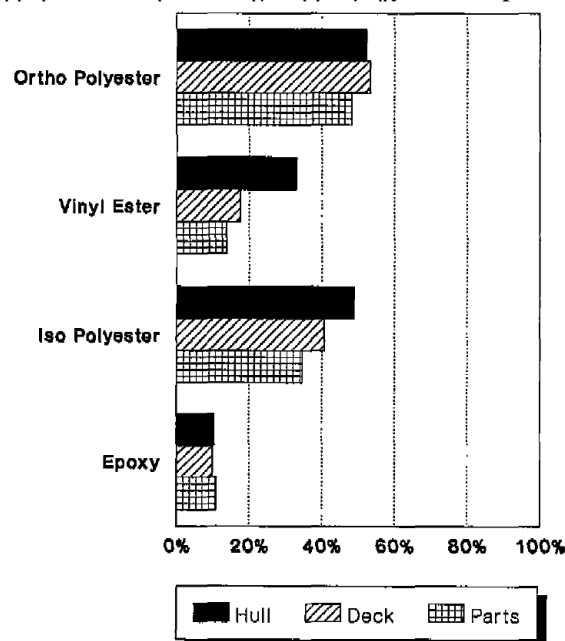
2.3.2.5 Σύγκριση ρητινών

Στους παρακάτω πίνακες συγκρίνονται ποιοτικά τα βασικά χαρακτηριστικά τους (πίνακας 2.9) και το ποσοστό που καταλαμβάνουν στην ναυπηγική βιομηχανία (πίνακας 2.10). Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι οι εποξικές ρητίνες έχουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και αντίσταση σε διάβρωση και το υψηλότερο κόστος, οι φαινολικές ρητίνες έχουν την μεγαλύτερη αντοχή στην φωτιά και την χαμηλότερη τοξικότητα και εκπομπή καπνού και οι πολυεστερικές ρητίνες είναι οι πιο φθηνές και διαδεδομένες στην ναυπηγική βιομηχανία

Πίνακας 2.9: Σύγκριση ρητινών που χρησιμοποιούνται σε θαλάσσιες εφαρμογές, GIBSON 2003

Resin	Mechanical integrity	Low smoke and toxicity in fire	Cost
Polyester	*****	*	***
Vinyl ester	*****	*	*****
Epoxy	*****	*	*****
Phenolic	*****	*****	*****
Mod. Acrylic	*****	*****	*****

Πίνακας 2.10: Χρήση ρητινών στην ναυπηγική βιομηχανία, Ship Structure Committee 1990



2.4 Χημικά πρόσθετα σε FRP υλικά

Τα πρόσθετα είναι υλικά προστίθενται στο υλικό της μήτρας για να βελτιώσουν κάποιες από τις ιδιότητες του ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Όσον αφορά τις θερμοσκληρυνόμενες μήτρες που χρησιμοποιούνται στις FRP σωληνώσεις η χρήση πρόσθετων είναι συνήθως πρακτική για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση κατά την

σκληρυνση (μείωση συρρίκνωσης της ρητίνης) και κατά την διάρκεια ζωής (αντίσταση σε φωτιά). Τα πιο συνηθισμένα πρόσθετα φαίνονται στον πίνακα 2.11.

Πίνακας 2.11: Κατηγορίες προσθέτων στις σωληνώσεις FRP, Chasis 1988

Type of Additive	Purpose	Benefit	Additive Material
Antioxidants	Inhibit or retard reactions promoted by oxygen or peroxides	Extends the polymer's useful temperature range and service life	Phenols Amines Phosphites Thioesters
Antistatic agents	Inhibit and remove static electrical charges of synthetic polymers	Allows plastic to be ungrounded and carry flammable materials easily ignited by a spark or electrical charge	Ammonium compounds Amines Esters Alcohols
Colorants	Pigments and dyes in encapsulated liquid or concentrated form are used to impart color to plastic resins	Color plastics any desired hue	Titanium dioxide Carbon black Inorganic oxides Chromates Cadmium Iron Molybdate
Coupling agents	Improves bonding of organic and inorganic materials	Upgrades mechanical and electrical properties of compounds; these properties are retained even after severe environmental aging; used in glass-fiber-reinforced piping products	Silane agents Titanates
Fibrous reinforcements	Added to a resin mixture to improve the properties of the resin	Fibers improve strength-to-weight ratio of resins and a host of other physical, chemical, and electrical properties. "E" and "C" glass are the most commonly used fibers for RTRP systems	Aramid Carbon Glass Hybrids
Nonfibrous property enhancers	Used for same purpose as fibrous additives but for different endproducts and manufacturing processes	Same benefits as fibrous additives; it improves mechanical, thermal, and electrical properties of base resins	Short fibers Flakes Spheres Irregular shapes of glass Carbon Oxides Epoxies Polyesters
Fillers and extenders	Added to resins to improved physical and electrical properties, as well as reducing the cost of higher-priced resins	Allow products to be more economically produced in the marketplace with no loss of quality	Talc Calcium carbonate Kaolinite Feldspar Silica Alumina trihydrate
Flame retardants	Added to resins to affect the burning rate of the resin in one or more of the following areas: (1) interface with combustion reaction; (2) make products of pyrolysis less flammable; (3) reduce combustion heat transfer; (4) reduce defusion rate of pyrolysis products	Used specifically for those plastics that support combustion, such as the polyolefins, ABS, and RTRP resins. In fact, one manufacturer advertises its product as "flame retardant polypropylene" (FRPP)	Aluminum Paraffins Antimony oxides Zinc Borates Miscellaneous Oxides Glycols
Foaming agents	Added to a polymer to form minute gas cells throughout the product	Foamed plastics are lighter in weight, have improved electrical and thermal insulative properties, increased strength-to-weight ratios, and minimal shrinkage compared to nonfoamed plastics	Aliphatics Alcohols Ketones Aldehydes ABFA
Heat stabilizers	Added to prevent the degradation of resins due to heat and light	Allows plastics, in particular, PVC compounds, to be stable and retain physical properties in excessive heat and light	Calcium Zinc Cadmium Lead Phosphites Organotins
Lubricants	Improve the processing of resins by lubricating the resin internally and externally	Improves processing time, allowing for quality products at reduced costs	Esters Fatty Acids Glycerols Polyesters

και υψηλή αντίσταση σε διάβρωση η ρητίνη στην οποία προσανατολιζόμαστε θα είναι όντως από την κατηγορία των εποξικών ενώ οι ενισχυτικές ίνες θα είναι λόγω μικρότερου κόστους από γυαλί.

Πίνακας 2.12: Αξιολόγηση διαφόρων ινών και ρητινών, Ship Structure Committee 1997

	Fiber			Resin					Core					
	E-Glass	Kevlar	Carbon	Polyester	Vinyl Ester	Epoxy	Phenolic	Thermoplastic	Balsa	Cross Link PVC	Linear PVC	Nomex/Alum Honeycomb	Thermoplastic Honeycomb	Syntactic Foam
Static Tensile Strength	☐	■	☐	☐	☐	■	☐	☐	■	■	■	☐	☐	☐
Static Tensile Stiffness	☐	■	■	☐	☐	☐	☐	☐	■	☐	☐	■	☐	☐
Static Compressive Strength	■	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	■	☐	■	■	☐	☐
Static Compressive Stiffness	☐	☐	■	☐	☐	☐	☐	☐	■	☐	☐	■	☐	☐
Fatigue Performance	☐	■	☐	☐	■	■	☐	■	☐	☐	■	☐	■	☐
Impact Performance	■	■	☐	☐	■	■	☐	■	☐	■	■	☐	☐	☐
Water Resistance	■	☐	☐	☐	■	■	☐	■	☐	■	■	☐	☐	☐
Fire Resistance	■	☐	☐	☐	☐	☐	■	☐	■	☐	☐	■	☐	■
Workability	■	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	■	☐	☐	☐	☐	☐
Cost	■	☐	☐	■	☐	☐	☐	■	■	☐	☐	☐	■	■
	■ Good Performance ☐ Poor Performance													

Κεφάλαιο 3

Σχεδίαση σωληνώσεων FRP

3.1 Εισαγωγή

Η σχεδίαση δικτύου σωληνώσεων περιλαμβάνει την επιλογή του υλικού και της διαδικασίας κατασκευής, τον υπολογισμό των αναμενόμενων και των επιτρεπτών τάσεων, τον προσδιορισμό της εκτιμώμενης διαστολής και του απαιτούμενου συστήματος στηρίξεων, αγκυρωμένων στηρίξεων και οδηγών. Η κατανόηση της ιδιαιτερότητας του FRP που δεν είναι ιστροπικό σαν υλικό και εμφανίζει σύνθετους μηχανισμούς μακροπρόθεσμης υποβάθμισης και αστοχίας, είναι πολύ σημαντική για την ασφαλή σχεδίαση σωληνώσεων από αυτό το υλικό. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αναγκαία η διεξαγωγή πειραμάτων για τον προσδιορισμό της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς και των ορίων λειτουργίας σωληνώσεων FRP.

Η αδυναμία τυποποίησης στα προϊόντα FRP και ακριβής αντιστοίχισής τους με τα συμβατικά υλικά αποτελεί ένα μειονέκτημα για την επιλογή τους, ωστόσο αυτό εξισορροπείται από την ευελιξία που προσφέρει το FRP στην διάρκεια της σχεδίασης και την δυνατότητα ρύθμισης των δεκάδων μεταβλητών της διαδικασίας κατεργασίας ώστε να παραχθεί ένα προϊόν προσαρμοσμένο σε ειδικές εφαρμογές και απαιτήσεις. Για παράδειγμα όπως αναφέρεται από Schmit (1998), σε μια εγκατάσταση παραγωγής σωληνώσεων FRP μπορεί να είναι διαθέσιμες 3 μέθοδοι κατεργασίας, 11 συστήματα ρητίνης από 3 οικογένειες ρητινών, 3 συστήματα καταλύτη, 3 τύποι ινών γυαλιού και δεκάδες πρόσθετα. Λόγω όλων αυτών των μεταβλητών είναι πολύ δύσκολο να υπάρξουν όπως αναφέραμε κοινές τυποποιήσεις μεταξύ των επιμέρους κατασκευαστών. Ωστόσο αυτό που φαίνεται αρχικά σαν μειονέκτημα τυποποίησης μπορεί να γίνει με την απόκτηση πείρας ένα πλεονέκτημα για μεγάλη προσαρμοστικότητα, ευελιξία και βελτιστοποίηση στη σχεδίαση λόγω των πολλών μεταβλητών. Όπως αναφέρεται από Τσούβαλη (1998), προσαρμόζοντας ένα σύνθετο υλικό, καταλήγουμε να έχουμε μόνο την δυσκαμψία και την αντοχή που χρειαζόμαστε σε μια δεδομένη διεύθυνση, χωρίς περαιτέρω σπατάλες. Σε αντίθεση, ένα ιστροπικό υλικό είναι εκ φύσεως περιορισμένο να έχει μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία από όση χρειάζεται, σε οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση εκτός εκείνης με την μεγαλύτερη απαίτηση.

Το FRP λόγω της δομής του δεν είναι ιστροπικό σαν υλικό, δηλαδή οι ιδιότητες του δεν είναι ίδιες σε κάθε διεύθυνση. Αυτό οδηγεί όπως θα δούμε και στη συνέχεια σε αξιοσημείωτες αποκλίσεις σε σημαντικές μηχανικές ιδιότητες ανάλογα με την διεύθυνση, όπως για παράδειγμα στο διάμηκες και το περιφερειακό μέτρο ελαστικότητας που μετράει την ακαμψία του υλικού. Αυτή η ιδιότητα του FRP, σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στη σχεδίαση και για να τηρούνται οι προδιαγραφές ασφαλείας σε κάθε εφαρμογή αλλά και για να αξιοποιείται κατάλληλα η μέγιστη μηχανική ιδιότητα του FRP στην πιο κρίσιμη διεύθυνση καταπόνησης τοποθετώντας κατάλληλα τις ενισχυτικές ίνες. Η βέλτιστη χρήση του FRP σημαίνει για τις σωληνώσεις την επίτευξη μεγάλης αντοχής σε περιφερειακή τάση και παράλληλα την ικανοποίηση των απαιτήσεων αντοχής σε εφέλκυστικά, θλιπτικά και

καμπτικά φορτία. Επίσης το FRP είναι ετερογενές, δηλαδή δεν έχει ομοιόμορφες ιδιότητες σε κάθε σημείο. Ωστόσο μπορούμε να θεωρήσουμε μακροσκοπικά κατά την σχεδίαση μια ισοδύναμη μέση τιμή των ιδιοτήτων του και να το εξετάζουμε ως ένα ομογενές υλικό.

Άλλοι παράγοντες που καθιστούν πιο περίπλοκη την σχεδίαση δικτύου σωληνώσεων από FRP συγκριτικά με την αντίστοιχη σχεδίαση μεταλλικής σωλήνωσης είναι η μικρότερη ακαμψία του, οι μεγαλύτερες απαιτήσεις σε στηρίξεις για να διατηρηθούν σε αποδεκτά όρια οι τάσεις καθώς και οι διαφορές στην διαδικασία εγκατάστασης των σωληνώσεων.

Επίσης οι μέθοδοι πειραματικών δοκιμών για την μέτρηση των διάφορων ιδιοτήτων των FRP υλικών συνήθως αναφέρονται σε επίπεδα ελάσματα που δεν είναι επαρκώς αντιπροσωπευτικά για τις σωληνώσεις. Χαρακτηριστική είναι η εκτίμηση του DNV ότι για σωληνώσεις θα πρέπει να υπολογίζουμε 40% μείωση σε αντοχή και 20% σε μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τα επίπεδα ελάσματα (Perillo & Vedvik & Echtermeyer 2014).

Σημαντική διαφορά κατά την σχεδίαση FRP σωληνώσεων σε σχέση με τις χαλύβδινες είναι ότι η συνήθης πρακτική σχεδίασης ενός δικτύου FRP σωλήνωσης ξεκινάει από ένα πλήρως στηριγμένο δίκτυο (σύστημα στηρίξεων με αγκυρωμένη στήριξη στην αρχή και το τέλος κάθε ευθείας διαδρομής της σωλήνωσης) και τελειώνει με την επιλογή των στηρίξεων (στηρίξεις, αγκυρωμένες στηρίξεις, οδηγοί) όταν επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή τάση (Lewandowski and Britt, 2004). Αντίθετα η σχεδίαση μιας χαλύβδινης σωλήνωσης ξεκινάει με την μέγιστη δυνατή ευελιξία της σωλήνωσης και τελειώνει με την επιλογή των στηρίξεων όταν τηρούνται οι επιτρεπτές τάσεις και επίσης δεν χρησιμοποιούνται αγκυρώσεις στο σύστημα στήριξης των σωληνώσεων χάλυβα λόγω του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα. Επίσης τα φορτία από τις αγκυρωμένες στηρίξεις στην FRP σωλήνωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά την σχεδίαση (ιδίως για μεγάλης διαμέτρου σωληνώσεις) παρά το γεγονός ότι είναι σχετικά μικρά λόγω χαμηλού βάρους του FRP.

Η σχεδίαση μιας σωλήνωσης από FRP αναγκαστικά θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν της την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων που επιφέρει η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από ένα όριο και να διασφαλίζει την ασφάλεια της κατασκευής στα πιο δυσμενή αναμενόμενα θερμοκρασιακά όρια λειτουργίας.

Αναφέρουμε κάποιες γενικές συμβουλές για την σχεδίαση FRP σωληνώσεων όπως αυτές αναφέρονται σε Lewandowski and Britt (2004):

- η διαδρομή της σωλήνωσης θα πρέπει να αποφεύγει χώρους συχνής διέλευσης για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος ζημιάς από κρούση
- ο αριθμός των φλαντζών θα πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός, οι φλάντζες είναι ακριβά εξαρτήματα και πηγές διαρροών
- διασφάλιση ότι το σύστημα της σωλήνωσης θα είναι πλήρως στηριγμένο πριν την διενέργεια υδροστατικού τεστ, σε διαφορετική περίπτωση η σωλήνωση μπορεί να υποστεί σημαντική φθορά
- Όλες οι βαλβίδες πρέπει να έχουν ξεχωριστή στήριξη

- Οι κατακόρυφες διαδρομές της σωλήνωσης θα πρέπει να είναι επαρκώς στηριγμένες για να μειωθούν οι κραδασμοί

Μηχανική συμπεριφορά και μηχανισμός αστοχίας FRP υλικών

Η συμπεριφορά σε εφελκυσμό μέχρι την αστοχία των FRP υλικών με ίνες γυαλιού είναι συνήθως ελαστική αν και ανάλογα με την μορφή των ινών και την διεύθυνση και το μέγεθος του φορτίου μπορεί να υπάρχει και σε ένα βαθμό ιξωδοελαστική συμπεριφορά στις ιδιότητες που εξαρτώνται κυρίως από την ρητίνη (διατμητικές ιδιότητες). Γενικά η αντοχή και η δυσκαμψία ενός σύνθετου υλικού είναι διαφορετικές όταν αυτό φορτίζεται σε εφελκυσμό, θλίψη ή κάμψη (Τσούβαλης 1998). Για παράδειγμα όπως αναφέρεται σε Παντελής (2008), τα FRP υλικά έχουν μειωμένη αντοχή σε θλίψη σε σχέση με την αντοχή τους σε εφελκυσμό λόγω των φαινομένων κύρτωσης, αναδίπλωσης και συστροφής των ινών (buckling effect), που προκαλούνται με την εφαρμογή θλιπτικών φορτίων. Συνήθως ο μηχανισμός της αστοχίας ξεκινάει με αρχικές μικροφθορές στις ίνες γυαλιού (μικρορωγμές, αποκόλληση) και μικρές ρωγμές στην μήτρα που οδηγούν και στην μείωση της ακαμψίας του υλικού και αυξάνουν την δυσθραυστότητα του υλικού. Η αύξηση της δυσθραυστότητας στα FRP υλικά (της ενέργειας δηλαδή που απορροφά το υλικό μέχρι την θραύση του) οφείλεται στην ανάσχεση της διάδοσης και στην αλλαγή της διεύθυνσης των ρωγμών που προκαλούν οι ενισχυτικές ίνες στα FRP. Επίσης η αποκόλληση των ινών από την μήτρα (λόγω της σταδιακής διάδοσης των ρωγμών) δημιουργεί νέες διεπιφάνειες ινών και μήτρας και αυξάνει την δυσθραυστότητα (Παντελής 2008). Αυτός ο τύπος αστοχίας που οδηγεί σε σταδιακή υποβάθμιση του FRP είναι πολύ σημαντικός γιατί οδηγεί στις σωληνώσεις FRP να εμφανίσουν μικρή διαρροή υγρού (weepage) πριν την θραύση που είναι πιο ασφαλές από την ξαφνική καταστροφική αστοχία των χαλύβδινων σωληνώσεων

3.2 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες σωληνώσεων FRP

Στα επόμενα εδάφια θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τις βασικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες καθώς και την συμπεριφορά των σωληνώσεων FRP σε διάφορα φαινόμενα και με έμφαση σε FRP σωληνώσεις εποξικής ρητίνης και ινών γυαλιού. Στο σχήμα 3.1 φαίνονται ενδεικτικές πιέσεις, θερμοκρασίες και διάμετροι για σωληνώσεις FRP διάφορων εφαρμογών.

Bondstrand® Industrial, Military and Environmental Systems							
Series	Rated Pressure		Rated Temperature		Nominal Diameter Range		Specific Applications
	(psig)	(bar)	(°F)	(°C)	(in.)	(mm)	
2000	to 450	to 30	250	120	1-16	25-400	Chemicals, foodstuffs, jet fuel (MIL-P-29206A)
2000MP	125	8.5	250	120	2-10	50-250	Condensate return, district heating (MIL-P-28584B)
3000A	to 450	to 30	210	99	2-16	50-400	Chilled water, drainage, hot water (AWWA C950)
3200	200	14	150	66	2-16	50-400	Class 200 fire protection (FM, UL)
3300	300	20	150	66	8-12	200-300	High-pressure general industrial service
4000	to 450	to 30	250	120	2-16	50-400	Nonoxidizing acids, slurries, solvents
5000	to 450	to 30	200	93	2-16	50-400	Highly corrosive chemicals, oxidizing acids
7000	150	10	210	99	2-16	50-400	Antistatic piping for refined hydrocarbons
Bondstrand II	150	10	200	93	2-12	50-300	Contained lines: pipe within a pipe
Bondstrand•CX	(Physical properties based on piping series used)						Integral coaxial containment system
Bondstrand LD	to 150	to 10	to 250	to 120	18-144	450-3600	Large-diameter general industrial service
Bondstrand II and Bondstrand•CX systems are designed to meet the requirements of governing regulations, such as CERCLA, 40 CFR 264/5 and 40 CFR 280 RCRA.							
Dualoy® Fuel Handling Systems							
Dualoy 3000/L	to 300	20	150	66	2-6	50-150	Single wall or contained primary pipe Petroleum, alcohol or blends (UL, ULC)
Dualoy 3000/L secondary containment	to 100	to 7	150	66	3-4	80-100	Containment system for Dualoy 3000/L - all fuels (UL, ULC)
Dualoy 3000/LCX	to 300	to 20	150	66	2-4	50-100	Coaxial design - integral containment (UL, ULC)
Dualoy 3000/MCX	to 300	to 20	150	66	2-4	50-100	Fuel piping at marina docks or above ground
StationWare™ 3000							Layout and costed materials software
Bondstrand Marine/Offshore Systems							
2000M	150/225	10/15	200	93	1-40	25-1000	Ballast, potable, general marine service
2000M-FP	150/225	10/15	250	120	1-16	25-400	Intumescent coated for enhanced fire resistance
7000M	150/225	10/15	210	99	1-40	25-1000	Electrically conductive for hazardous locations
Bondstrand PSX•L3 (C)	to 225	15	250	120	1-16	25-400	Polysiloxane-phenolic piping for wet service
Bondstrand PSX•JF (C)	to 225	15	250	120	1-16	25-400	Polysiloxane-phenolic piping for normally dry (deluge) service. (C) - conductive available
Oilfield Line Pipe, Tubulars and Well Screens							
IJ line pipe	to 800	55	to 200	93	2-4	50-100	Low-to-medium-pressure line pipe service
SP	to 3500	241	to 200	93	1½-6	40-150	High-pressure line pipe applications
Tubing	to 4000	276	to 200	93	1½-4½	40-114	Injection, production, disposal wells
Casing	to 2500	172	to 200	93	4½-9⅝	114-246	Corrosion-resistant casing applications
Well screen	-	-	-	-	1½-6	40-150	Oil, gas, water wells, cased or open hole
150/200/300	to 300	20	to 210	99	8-16	200-400	Salt water transfer, gas gathering, trunk lines
2400	to 1100	to 75	200	93	2-40	50-1000	Potable water, crude oil, salt water service
3400	to 1100	to 75	200	93	2-40	50-1000	Fire protection, crude oil, salt water, pipelines
SSL (Steel Strip Laminate)*	to 5769	397.9	to 200	93	8-40	200-1000	All of the above applications
* Available for onshore and/or subsea applications							

Σχήμα 3.1: Σωληνώσεις FRP ανά κατηγορία εφαρμογών, AMERON CORROSION-RESISTANT FIBERGLASS PIPING SYSTEMS

3.2.1 Θερμοκρασία σχεδίασης και θερμική αγωγιμότητα

Το θερμοκρασιακό εύρος των συνηθισμένων εφαρμογών FRP σε σωληνώσεις είναι μικρότερο από αυτό των μεταλλικών υλικών όπως φαίνεται στο πίνακα 3.1. Το FRP χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές με θερμοκρασίες λειτουργίας από 66 °C μέχρι και 149 °C, ενώ τα μεταλλικά υλικά φτάνουν σε θερμοκρασίες 205 °C (και ο ανοξείδωτος χάλυβας ως 593 °C) χωρίς αξιόλογη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Ωστόσο υπάρχουν και FRP υλικά εποξικής ή φαινολικής μήτρας που εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με αυτά που έχουν βινυλεστερική ή πολυεστερική ρητίνη, έχοντας μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας έως και 200°C (SIMS and BROUGHTON 2000).

Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των FRP υλικών και κυρίως εκείνων των ιδιοτήτων που εξαρτώνται πιο πολύ από την συμπεριφορά της μήτρας όπως είναι η αντοχή σε θλίψη, η κάμψη και η διάτμηση.

Πίνακας 3.1: Τυπικό θερμοκρασιακό εύρος υλικών για σωληνώσεις, Schmit 1998

Material	Typical Temperature Limits
FRP	Most common applications are 150•F and below. Some applications up to 250•F with a few special cases up to 300•F. Most resins will begin to degrade above 150•F at a rate of anywhere from 5% to less than 1% per 10•F rise. Some high temperature application resins will maintain 90% of their ambient temperature properties up to 250•F
ASTM A106 Grade B Seamless	No reduction in properties: 400•F 10% reduction in properties: 500•F 20% reduction in properties: 700•F
ASTM A312 TP316L	No reduction in properties: 300•F 10% reduction in properties: 400•F 20% reduction in properties: 600•F
Gr 2 Titanium	No reduction in properties: 200•F 10% reduction in properties: 200•F 20% reduction in properties: Up to 200•F
ASTM B466 90/10 Cu-Ni	No reduction in properties: 100•F 10% reduction in properties: 300•F 20% reduction in properties: Up to 550•F
ASTM B467 70/30 Cu-Ni	No reduction in properties: Up to 100•F 10% reduction in properties: Up to 300•F 20% reduction in properties: Up to 600•F

Source: FRP data is from numerous fiberglass manufacturers. All other data is from ASME B31.3

Η θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα δεν είναι κρίσιμη για την ακεραιότητα της σωλήνωσης σε σχέση με την πίεση ή την μηχανική αντοχή, ωστόσο η χαμηλή τιμή της στις σωληνώσεις FRP μπορεί να προσφέρει πλεονεκτήματα στην διαδικασία της σχεδίασης όπως η μείωση του πάχους της απαιτούμενης μόνωσης. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.2, η θερμική αγωγιμότητα των σωληνώσεων από FRP είναι 100-300 φορές μικρότερη από του ανθρακούχου χάλυβα και 35-90 φορές μικρότερη από του ανοξείδωτου χάλυβα. Ωστόσο η θερμική αγωγιμότητα του FRP δεν είναι τόσο μικρή ώστε να μην χρειάζεται μόνωση. Τα FRP υλικά που έχουν ίνες γυαλιού έχουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που δεν επηρεάζεται από αλλαγές στην θερμοκρασία.

Σύμφωνα με Schmit (1998) η εξίσωση που υπολογίζει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας σωλήνωσης χωρίς μόνωση αποτυπώνεται στην σχέση (3.1), και αποτελεί την βάση για να προσθέσουμε σταδιακά πάχος μόνωσης μέχρις ότου να επιτύχουμε τον απαιτούμενο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.

$$q/L=(T_{\text{Fluid}}-T_{\text{Ambient}})*\ln(r_0/r_i)/(2*\pi*k)+1/(h_0*A_0)=(T_{\text{pipeOD}} - T_{\text{ambient}})/(1/(h_0 *A_0)) \quad (3.1)$$

Όπου $A_0=2*\pi*r_0$ η επιφάνεια της σωλήνωσης ανά μονάδα μήκους σε in, T_{fluid} και T_{ambient} η θερμοκρασία του υγρού και του περιβάλλοντος αντίστοιχα σε F, r_0 και r_i η εξωτερική και η

εσωτερική ακτίνα της σωλήνωσης αντίστοιχα σε in, k η θερμική αγωγιμότητα, h_o ο συντελεστής διάδοσης. T_{PipeOD} είναι η θερμοκρασία στην εξωτερική ακτίνα της σωλήνωσης.

Πίνακας 3.2: Τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας υλικών για σωληνώσεις, Schmit 1998

Material	Thermal Conductivity
FRP	0.1 - 0.24 Btu-ft/hr-ft ² -•F
Carbon Steels	25 - 30 Btu-ft/hr-ft ² -•F
Stainless Steels	9 Btu-ft/hr-ft ² -•F
Gr 2 Titanium	9 - 11.5 Btu-ft/hr-ft ² -•F
90/10 Cu-Ni	29 Btu-ft/hr-ft ² -•F
70/30 Cu-Ni	17 Btu-ft/hr-ft ² -•F
Fiberglass / Mineral wool	0.024 - 0.033 Btu-ft/hr-ft ² -•F
Polystyrene foam	0.019 Btu-ft/hr-ft ² -•F

Source: FRP data is from numerous fiberglass manufacturers. 90/10 Cu-Ni source is unknown. All other data is from Nayyar, *Piping Handbook*, 6th Edition

3.2.2 Βάρος

Οι σωληνώσεις από FRP με ίνες γυαλιού έχουν αρκετά μικρότερο βάρος από τις αντίστοιχες μεταλλικές παρά το γεγονός ότι απαιτείται περισσότερο υλικό FRP (μεγαλύτερο πάχος σωλήνωσης) για να επιτευχθούν οι απαιτήσεις σχεδίασης. Αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή τους πυκνότητα, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.3, που οδηγεί και στις υψηλές τιμές ειδικών μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η σχέση για τον υπολογισμό του βάρους της σωλήνωσης (Schmit 1998) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (3.2):

$$\text{Pipe Weight per foot} = \pi/4 * (\text{OD}^2 - \text{ID}^2) * \rho * 12\text{in}/1\text{ft} \quad (3.2)$$

Όπου OD η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε in, ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε in, ρ η πυκνότητα του υλικού σε lb/cu.in.

Όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012), μια σωλήνωση FRP ζυγίζει περίπου το 16% του βάρους μιας χαλύβδινης. Το μικρότερο βάρος είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο τα έξοδα εγκατάστασης σωληνώσεων FRP είναι σημαντικά μικρότερα (κατά 30-40 % σύμφωνα με National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012) από των χαλύβδινων σωληνώσεων.

Πίνακας 3.3: Τυπικές πυκνότητες υλικών για σωληνώσεις, Schmit 1998

Material	Density
FRP	0.06 - 0.065 lb/cu in.
Carbon Steels	0.28 - 0.29 lb/cu in.
Stainless Steels	0.29 lb/cu in.
Gr 2 Titanium	0.163 lb/cu in.
90/10 Cu-Ni	0.32 lb/cu in.
70/30 Cu-Ni	0.32 lb/cu in.

Source: FRP data is from numerous fiberglass manufacturers. All other data is from Nayyar, *Piping Handbook*, 6th Edition

3.2.3 Τραχύτητα και απώλειες πίεσεων

Όπως αναφέρεται σε Παπαϊωάννου (1996), η επιφάνεια κάθε στερεού σώματος, όσο λεία και αν φαίνεται, παρουσιάζει ανωμαλίες, έστω και μοριακής τάξης μεγέθους. Το μέγεθος των ανωμαλιών αυτών εκφράζεται ποσοτικά με ένα χαρακτηριστικό μήκος (ϵ ή r_a) που ονομάζεται τραχύτητα της επιφάνειας και είναι ίσο με τη μέση στατιστική τιμή των υψών των εσοχών και των προεξοχών σε μια μεγάλη έκταση. Στον παρακάτω πίνακα 3.4 δίνονται οι μέσες τιμές τραχύτητας (r_a) για καινούργιους σωλήνες του εμπορίου

Πίνακας 3.4: Μέση τραχύτητα σωληνώσεων του εμπορίου, Παπαϊωάννου, 1996

ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ (mm)
Χάλυβας εμπορίου	0.046
Χυτοσίδηρος	0.26
Γαλβανισμένος σίδηρος	0.15
Ασφαλτωμένος σίδηρος	0.12
Χαλκός, ελαφρά μέταλλα	0.013 – 0.015
Σκυρόδεμα	0.3 - 3
Κεραμικό	0.07
Πλαστικό	0.0016

Το μέγεθος της τραχύτητας είναι βασική παράμετρος της ροής σε σωληνώσεις καθώς η τραχύτητα προκαλεί μια κίνηση των σωματιδίων του υγρού στο οριακό στρώμα που εφάπτεται στο τοίχωμα της σωλήνωσης που εμποδίζει την ροή του υγρού και δημιουργεί τριβές και συνακόλουθα απώλεια πίεσης. Γενικά κατά την ιξώδη ροή σε αγωγούς, ένα μέρος της μηχανικής ενέργειας του ρευστού καταναλώνεται για την υπερνίκηση των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του. Η ενέργεια που χάνεται λόγω τριβών μετριέται σε μονάδες μήκους και ονομάζεται ύψος τριβών (head loss). Η ενέργεια που χάνεται λόγω τριβών στην σωλήνωση είναι μια συνάρτηση χαρακτηριστικών της ροής του υγρού (ταχύτητα, πυκνότητα, ιξώδες) και της σωλήνωσης (τραχύτητα, μήκος, διάμετρος). Η απώλεια πίεσης που

δημιουργεί το ύψος τριβών δίνεται για οριζόντια σωλήνωση (Παπαϊωάννου 1996) από την σχέση (3.3):

$$\Delta P = H_L * \gamma \quad (3.3)$$

Όπου ΔP η απώλεια πίεσης λόγω τριβών σε kg/m^2 , H_L το ύψος τριβών σε m , γ το ειδικό βάρος του ρευστού σε kg/m^3 .

Συνεπώς η μείωση της απώλειας πίεσης σε ένα σύστημα σωλήνωσης σχετίζεται άμεσα με την μείωση του ύψους τριβών και άρα την μείωση της τραχύτητας στο εσωτερικό της σωλήνωσης. Η σωλήνωση από FRP έχει εξαρχής πιο λεία εσωτερική επιφάνεια από την αντίστοιχη χαλύβδινη σωλήνωση. Επιπρόσθετα με την πάροδο των χρόνων η τραχύτητα αυξάνεται περαιτέρω στις χαλύβδινες σωληνώσεις ενώ μένει σταθερή στις FRP. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αντίθεση με τις χαλύβδινες σωληνώσεις, οι σωληνώσεις FRP δεν σκουριάζουν, δεν διαβρώνονται, αποτρέπουν την ανάπτυξη βακτηρίων και μυκήτων που μπορεί να λειτουργήσουν σαν επικαθήσεις που εμποδίζουν την ροή, και έχουν υψηλή χημική αντίσταση. Άρα οι σωληνώσεις από FRP εμφανίζουν εξαρχής το πλεονέκτημα της μικρότερης τραχύτητας που οδηγεί και σε μικρότερη απώλεια πίεσης, πλεονέκτημα που μεγεθύνεται στην διάρκεια ζωής της σωλήνωσης γιατί η τραχύτητα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου στις χαλύβδινες σωληνώσεις. Ο υπολογισμός του ύψους τριβών μπορεί να γίνει με διάφορες σχέσεις. Για πλήρη ροή νερού σε σωλήνωση χρησιμοποιείται η σχέση Hazen-Williams (3.4) όπως δίνεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012), που είναι ένας εμπειρικός τύπος που δίνει αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας για τις συνήθεις συνθήκες ροής νερού (ταχύτητες μέχρι 3 m/sec) σε ένα δίκτυο ύδρευσης:

$$H_L = 1046 * (Q / (C * ID^{2.63}))^{1.852} \quad (3.4)$$

ή σε μονάδες SI:

$$H_L = 1068 * (Q / (C * ID^{2.63}))^{1.852} \quad (3.5)$$

Όπου H_L το ύψος τριβών σε m ανά 100 m σωλήνωσης ή σε ft ανά 100 ft σωλήνωσης, Q η παροχή σε m^3/s ή σε $\text{gallons}/\text{min}$, C ο συντελεστής Hazen-Williams με τιμή 150 για σωληνώσεις FRP ενώ η τιμή του για άλλα υλικά φαίνεται στον πίνακα 3.5, ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε m ή σε in .

Πίνακας 3.5: Συντελεστές C Hazen – Williams για διάφορα υλικά

Χυτοσίδηρος καινούργιος	130
Χυτοσίδηρος 30 χρονών	75-90
Σκυρόδεμα	120
Αμιαντοτσιμέντο	140
Πλαστικό (PVC – HDPE)	150

Για τον υπολογισμό της απώλειας πίεσης στη σωλήνωση άλλων ρευστών, χρησιμοποιείται η σχέση (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012) Darcy-Weisbach (3.6):

$$H_L = f * ((L * V^2) / (ID * 2 * g)) \quad (3.6)$$

Όπου H_L το ύψος τριβών σε m, f ο συντελεστής τριβής Darcy, L το μήκος της διαδρομής της σωλήνωσης σε m, ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε m, V η μέση ταχύτητα του υγρού σε m/s, g η σταθερά της βαρύτητας που ισούται με $9,806 \text{ m/s}^2$.

Η λύση της σχέσης Darcy-Weisbach είναι πιο περίπλοκη, καθώς ο συντελεστής τριβής Darcy (f) είναι μια μεταβλητή που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής (στρωτή ή τυρβώδης) και την τραχύτητα του σωλήνα. Ο συντελεστής τριβής Darcy (f) μπορεί να υπολογιστεί για κάθε υγρό σε τυρβώδη ροή με την χρήση της εξίσωσης (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012) Moody (3.7):

$$f = 0.0055 * (1 + (20000 * e / ID + 10^6/R)^{1/3}) \quad (3.7)$$

Για στρωτή ροή, δηλαδή όταν ο αριθμός Reynolds είναι κάτω από 2000, ο συντελεστής τριβής Darcy (f) μπορεί να υπολογιστεί για κάθε υγρό με την εξίσωση (3.8) σύμφωνα με Ιωαννίδη (1984):

$$f = 64 / R \quad (3.8)$$

Όπου e η τραχύτητα της σωλήνωσης σε m, R ο αριθμός Reynolds που ισούται με $R = v * ID / \nu$, ν η μέση ταχύτητα m/s, ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε m, ν το κινηματικό ιξώδες του υγρού σε m^2/s . Το κινηματικό ιξώδες του υγρού που μεταβάλλεται με την θερμοκρασία, σχετίζεται με τις απώλειες πίεσης, καθώς μια αύξηση του οδηγεί σε αύξηση των απωλειών πίεσης όπως φαίνεται και στις παραπάνω σχέσεις. Ενδεικτικές τιμές της απώλειας πίεσης για διάφορα ρευστά και κινηματικά ιξώδη σε σωλήνωση FRP δίνονται στον πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6: Απώλεια πίεσης για διάφορα ρευστά και κινηματικά ιξώδη σε σωλήνωση FRP 6 in, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012

	Line Temperature F°	Specific Gravity	Kinematic Viscosity ft ² /sec	Head Loss/100 Ft of Pipe	
				Ft of Fluid	Pounds/sq. in.
Aviation Gasoline, 70° API	60	0.70	.0000072	1.17	0.36
Gasoline, 60° API	60	0.74	.0000086	1.21	0.39
JP-4 Fuel, 45° API	60	0.80	.000013	1.30	0.45
JP-7 Fuel, 45° API	60	0.80	.000028	1.51	0.52
Kerosene, 42° Baumé	60	0.81	.000027	1.49	0.53
Water	60	1.0	.000012	1.28	0.55
Water	140	0.98	.0000051	1.11	0.47
Brine, 20% NaCl	60	1.14	.000016	1.35	0.67
Hydrochloric Acid, 31.5%	86	1.15	.000016	1.35	0.67
Sulfuric Acid, 60%	60	1.50	.000050	1.70	1.10
Fuel Oil, No. 5, 30° Baumé	140	0.875	.000051	3.0	1.15
Crude Oil, 24.4° Baumé	140	0.91	.000012	2.07	0.81
Crude Oil, 15.2° Baumé	140	0.96	.000113	3.84	1.60

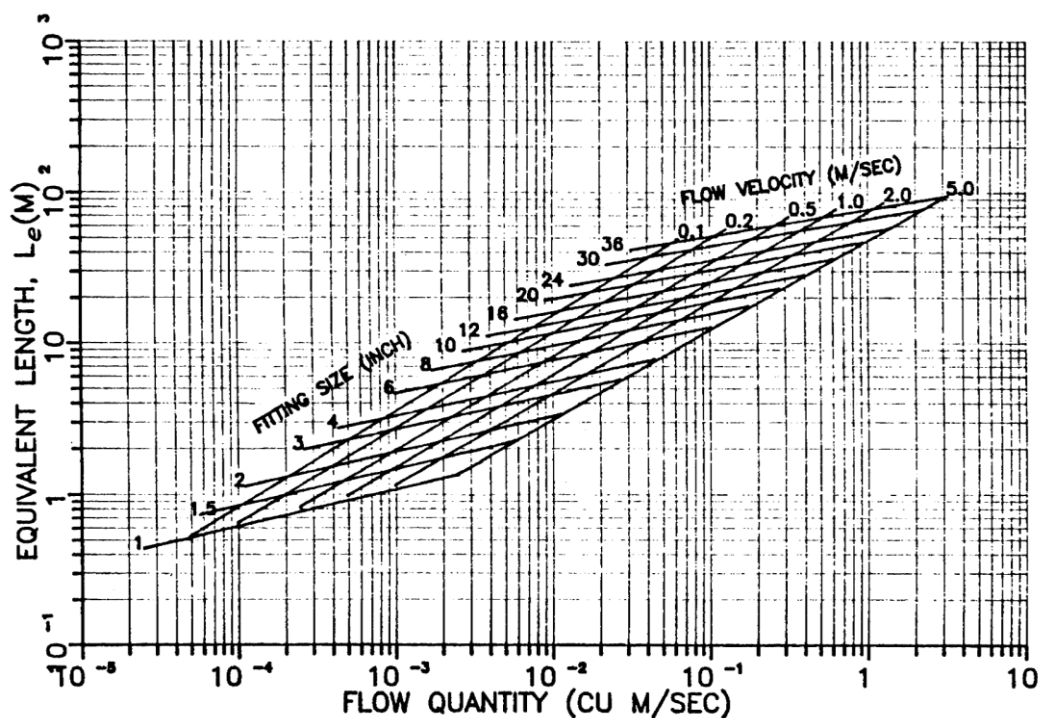
Η απώλεια πίεσης σε εξαρτήματα της σωλήνωσης

Στις θαλάσσιες εφαρμογές όπου οι διαδρομές των σωληνώσεων είναι συνήθως μικρού μήκους, το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής απώλειας πίεσης οφείλεται στις βαλβίδες και τα εξαρτήματα των σωληνώσεων. Στους υπολογισμούς για την συνολική απώλεια πίεσης

συστήματος σωλήνωσης, τα εξαρτήματα αντικαθίστανται από το ισοδύναμο σε απώλειες πίεσης, μήκος σωλήνα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 μπορούμε να διαβάσουμε ένα κατά προσέγγιση ισοδύναμο μήκος που στη συνέχεια για να το μετατρέψουμε στο τελικό ισοδύναμο μήκος, πρέπει να το πολλαπλασιάσουμε με έναν συντελεστή αντίστασης που να αντιστοιχεί στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου κάθε φορά εξαρτήματος (πίνακας 3.7). Αλλιώς αν είναι γνωστός ο συντελεστής τριβής Darcy (f) τότε το ισοδύναμο μήκος σωλήνωσης για οποιοδήποτε εξάρτημα δίνεται σύμφωνα με National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012) από την σχέση:

$$L_e = K \cdot ID / f \quad (3.8)$$

Όπου L_e το ισοδύναμο μήκος του εξαρτήματος, K ο συντελεστής αντίστασης εξαρτήματος.



Σχήμα 3.2: Ισοδύναμο μήκος σωλήνωσης εξαρτημάτων, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012

Η εξοικονόμηση ενέργειας από την χρήση σωληνώσεων FRP

Όπως προαναφέρθηκε τα συστήματα σωλήνωσης από FRP λόγω της πιο λείας εσωτερικής επιφάνειας της σωλήνωσης έχουν μικρότερες απώλειες πίεσης συγκριτικά με τα διάφορα μεταλλικά υλικά. Η χαμηλότερη απώλεια πίεσης σημαίνει ότι θα απαιτηθεί τελικά μικρότερη πίεση αντλίας σε μια σωλήνωση FRP για την επίτευξη της ίδιας παροχής με μια χαλύβδινη σωλήνωση. Συνεπώς εξοικονομείται η ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία της αντλίας και δημιουργείται σημαντική εξοικονόμηση κατά την συνολική λειτουργία της σωλήνωσης στην διάρκεια ζωής του πλοίου. Αντίστροφα αν θέλουμε να διατηρήσουμε τις απώλειες πίεσης ίδιες στις δύο σωληνώσεις τότε αυξάνεται η παροχή στην FRP σωλήνωση και μειώνεται

σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για παράδειγμα στην εκκένωση μιας δεξαμενής φορτίου. Επίσης επειδή όπως έχει αναφερθεί παραπάνω η τραχύτητα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου σε χαλύβδινα συστήματα σωληνώσεων αυτό συντελεί σε μια ακόμη μεγαλύτερη συγκριτική εξοικονόμηση των σωληνώσεων από FRP.

Όπως αναφέρεται και σε Composites & Metal Products, ο σχεδιαστής του συστήματος της σωλήνωσης από FRP μπορεί να επιλέξει μεταξύ της διατήρησης της ίδιας διαμέτρου (με αυτήν της χαλύβδινης σωλήνωσης για την ίδια εφαρμογή) ώστε να αξιοποιήσει το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και της μείωσης της εσωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης ώστε να μειώσει το αρχικό κόστος των σωληνώσεων. Συγκεκριμένα αναφέρεται σε Ιωαννίδη (1984), ότι λόγω της μικρότερης τραχύτητας των σωληνώσεων από σύνθετα υλικά, η διάμετρος τους μπορεί να είναι 20% μικρότερη από ότι σε μεταλλικούς σωλήνες για την ίδια απώλεια πίεσης.

Πίνακας 3.7: Συντελεστές αντίστασης εξαρτημάτων και βαλβίδων, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012

Description	K
45° Elbow Standard	0.3
45° Elbow Single Miter	0.5
90° Elbow Standard	0.5
90° Elbow Single Miter	1.4
90° Elbow Double Miter	0.8
90° Elbow Triple Miter	0.6
180° Return Bend	1.3
Tees >T	0.4
>T	1.4
>T	1.7
Gate Valve Open	0.17
3/4 Open	0.9
1/2 Open	4.5
1/4 Open	24.0
Diaphragm Valve Open	2.3
3/4 Open	2.6
1/2 Open	4.3
1/4 Open	21.0
Globe Valve Bevelseal, Open	6.0
1/2 Open	9.5
Check Valve Swing	2.0
Disk	10.0
Ball	70.0

3.2.4 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας είναι σημαντικό στην σχεδίαση σωληνώσεων FRP καθώς καθορίζει τις αξονικές και περιφερειακές παραμορφώσεις όπως και το βέλος κάμψης της σωλήνωσης σε ένα δεδομένο πλαίσιο φορτίσεων και στηρίξεων της σωλήνωσης.

Το μέτρο ελαστικότητας προϊόντων από FRP θα είναι 10-30 φορές μικρότερο από τα αντίστοιχα προϊόντα από μεταλλικά υλικά. Αυτό ισχύει για προϊόντα FRP από ίνες γυαλιού E, αντίθετα για ίνες γραφίτη ή άνθρακα (που έχουν 3-10 φορές μεγαλύτερη ακαμψία από ίνες γυαλιού E) θα έχουμε προϊόν με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας δηλαδή μεγαλύτερη ακαμψία από FRP με ίνες γυαλιού E. Πρέπει να αναφέρουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας σωλήνωσης

από FRP διαφέρει στην διαμήκη και την περιφερειακή διεύθυνση. Στον πίνακα 3.8 δίνονται ενδεικτικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας για διάφορα υλικά σωληνώσεων. Επίσης στον πίνακα 3.9 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας ενώ στον πίνακα 3.10 δίνονται ενδεικτικές τιμές του περιφερειακού μέτρου ελαστικότητας. Αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012), ότι μια σωλήνωση FRP έχει 14 φορές μικρότερο μέτρο αξονικής ελαστικότητας από μια χαλύβδινη σωλήνωση. Το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας επηρεάζει την σχεδίαση της σωλήνωσης καθώς:

Πρέπει να υπολογίζουμε τα φορτία που προκαλούνται από τις αγκυρωμένες στηρίξεις στα σημεία επαφής με την σωλήνωση για να αποφύγουμε φθορές και γιατί λόγω μικρότερου μέτρου ελαστικότητας από τις χαλύβδινες σωληνώσεις ή ίδια φόρτιση δημιουργεί πιο μεγάλη διαστολή στις σωληνώσεις FRP. Η σχέση (Schmit 1998) που χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε αυτές τις φορτίσεις είναι η (3.9):

$$P = A * E * \Delta \quad (3.9)$$

Όπου P το φορτίο από τα σημεία στήριξης σε lbs, E μέτρο αξονικής ελαστικότητας, A η εγκάρσια διατομή της σωλήνωσης σε in, Δ η διαστολή μετρημένη σε in, που υπολογίζονται (Schmit 1998) ως εξής:

$$A = \pi/4 * (OD^2 - ID^2) \quad (3.10)$$

$$\Delta = Ct * \Delta T \quad (3.11)$$

Όπου OD η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε in, ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε in, Ct συντελεστής θερμικής διαστολής σε in/in/F και ΔT θερμοκρασιακή διαφορά σε F. Πρέπει να υπολογίζουμε επίσης το μήκος μεταξύ των στηρίξεων της σωλήνωσης που είναι μικρότερο στις σωληνώσεις FRP λόγω του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε αυτό το μήκος δίνονται σε επόμενο εδάφιο όταν αναλύονται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις για τις στηρίξεις των σωληνώσεων.

Πίνακας 3.8: Τυπικές τιμές μέτρων ελαστικότητας υλικών για σωληνώσεις, Schmit 1998

Material	Modulus Value (In Tension)
FRP	1 - 3 x 10 ⁶ psi, 70 - 250• F
Carbon Steels	27 - 30 x 10 ⁶ psi, 70 - 200• F
Stainless Steels	26 - 29 x 10 ⁶ psi, 70 - 200• F
Gr 2 Titanium	15 - 16 x 10 ⁶ psi, 70 - 200• F
90/10 Cu-Ni	17 - 18 x 10 ⁶ psi, 70 - 200• F
70/30 Cu-Ni	20 - 22 x 10 ⁶ psi, 70 - 200• F

Source: FRP data is from numerous fiberglass manufacturers. All other data is from ASME B31 3

Πίνακας 3.9: Τυπικές τιμές μέτρου ελαστικότητας σωληνώσεων FRP ανάλογα με την αλλαγή της θερμοκρασίας - National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

Temperature	E_1
100°F (38°C)	1,500,000 psi (105,500 kg/cm ²)
150°F (66°C)	1,200,000 psi (84,400 kg/cm ²)
200°F (93°C)	900,000 psi (63,300 kg/cm ²)

Πίνακας 3.10: Τιμές περιφερειακού μέτρου ελαστικότητας σωληνώσεων FRP για θαλάσσιες εφαρμογές, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

Temperature		E_c		μ_c	μ_1
°F	°C	psi	kg/cm ²		
70	21	3.15 x 10 ⁶	2.21 x 10 ⁵	0.56	0.37
100	38	3.06 x 10 ⁶	2.15 x 10 ⁵	0.57	0.38
150	66	2.90 x 10 ⁶	2.04 x 10 ⁵	0.60	0.39
200	93	2.20 x 10 ⁶	1.55 x 10 ⁵	0.70	0.41

3.2.5 Τάσεις και πιέσεις

Τάσεις

Το γεγονός ότι το FRP είναι ένα μη ισοτροπικό υλικό δημιουργεί γενικά την ανάγκη για τον υπολογισμό παραπάνω επιτρεπτών τάσεων και κατ'ελάχιστο συνηθίζεται να καθορίζονται 3 επιτρεπτές τάσεις για μακροπρόθεσμη αντοχή: η περιφερειακή, η αξονική και η καμπτική. Ωστόσο στην σχεδίαση σωληνώσεων FRP όπου θεωρούμε πλήρως στηριγμένο σύστημα, οι αξονικές τάσεις απαλείφονται από τις αγκυρωμένες στηρίξεις και οι στηρίξεις αποτρέπουν την εμφάνιση μη αποδεκτής καμπτικής τάσης. Συνεπώς βασικό μας μέλημα είναι αφενός να προσδιορίσουμε την επιτρεπτή περιφερειακή τάση και να επιλέξουμε το κατάλληλο σύστημα στηρίξεων για τις υπόλοιπες τάσεις όπως θα δούμε σε επόμενο εδάφιο.

Όπως αναφέρεται σε National Steel and Shipbuilding Company (1976), η αξονική τάση αστοχίας μιας σωλήνωσης FRP εποξικής ρητίνης με ίνες γυαλιού είναι από 69 MPa για μια γωνία περιέλιξης έως 207 MPa για δύο γωνίες περιέλιξης ενώ η περιφερειακή τάση αστοχίας (περιφερειακή αντοχή) είναι 276 MPa για μια γωνία περιέλιξης έως 483 MPa για δύο γωνίες περιέλιξης. Ενώ η αξονική τάση αστοχίας μιας σωλήνωσης χάλυβα (grade A) είναι 331 MPa και η περιφερειακή τάση αστοχίας (περιφερειακή αντοχή) είναι 414 MPa.

Όμοια και οι επιτρεπόμενες τάσεις που χρησιμοποιούμε στην σχεδίαση FRP θα διαφέρουν ανάλογα με το είδος της τάσης, για παράδειγμα όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012), οι σειρές σωληνώσεων FRP 2000M και 7000M έχουν στους 21

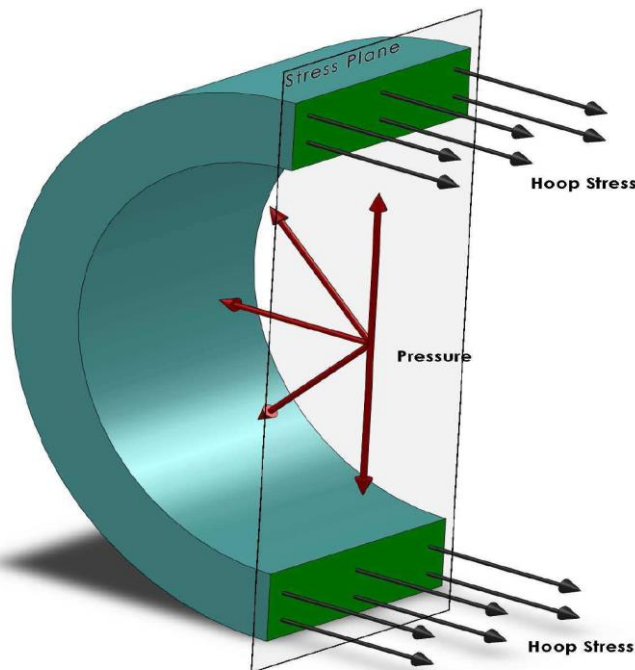
°C : επιτρεπόμενη περιφερειακή τάση 41.37 MPa, επιτρεπόμενη αξονική τάση 19.51 MPa και επιτρεπόμενη διατμητική τάση στις ενώσεις της σωλήνωσης από 1.46 ή 1.72 MPa ανάλογα με το κολλητικό μέσο που επιλέγεται.

Περιφερειακή τάση

Η περιφερειακή τάση που φαίνεται στο σχήμα 3.3, είναι η μεγαλύτερη τάση σε κάθε FRP σωλήνωση που έχει εσωτερική πίεση, συνεπώς αποτελεί και τον καθοριστικό παράγοντα προσδιορισμού της πίεσης. Όπως αναφέρεται σε Chasis (1988) η επιτρεπτή περιφερειακή πίεση S εκφράζεται από την σχέση (3.12):

$$S = P_i * (OD-t) / (2 * t) \quad (3.12)$$

Όπου P_i είναι η εσωτερική πίεση σχεδίασης (psi ή kg/cm²), S η επιτρεπτή περιφερειακή τάση (psi ή kg/cm²), OD η ελάχιστη εξωτερική διάμετρος της σωλήνας (in ή cm), t το ελάχιστο ενισχυμένο πάχος τοιχώματος που ισούται με το πάχος τοιχώματος μείον το πάχος τυχόν προστατευτικής επένδυσης (in ή cm).



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση περιφερειακής τάσης (hoop tensile stress) από εσωτερική πίεση

Ωστόσο ο υπολογισμός της επιτρεπτής περιφερειακής τάσης γίνεται από την πειραματική μέθοδο που ορίζει ο ASTM D 2992. Συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

Αρχικά προσδιορίζεται πειραματικά η υδροστατική βάση σχεδίασης (Hydrostatic Design Basis - HDB) που είναι μια περιφερειακή τάση που προκύπτει με μια από τις δύο διαδικασίες: στην πρώτη τα δοκίμια υποβάλλονται σε εναλλασσόμενο φορτίο και η HDB προκύπτει με στατιστικές μεθόδους από την τάση θραύσης (Long-term hydrostatic strength, LTHS) και τον αριθμό των κύκλων μέχρι την θραύση, ενώ στην δεύτερη τα δοκίμια υποβάλλονται σε σταθερό

φορτίο και η HDB προκύπτει με στατιστικές μεθόδους από την τάση θραύσης και τον χρόνο (σε ώρες) μέχρι την θραύση. Και οι δύο διαδικασίες διεξάγονται σε 18 δοκίμια και για διάφορες εσωτερικές πιέσεις και θερμοκρασίες.

Ο συντελεστής λειτουργίας σχεδίασης (service design factor) με τον οποίο πολλαπλασιάζω την HDB και βρίσκω την HDS (που είναι η επιτρεπτή περιφερειακή τάση S) καθορίζεται από δύο γενικές κατηγορίες παραγόντων. Η πρώτη περιλαμβάνει μεταβλητές που αφορούν την κατασκευή και την δοκιμή και πιο συγκεκριμένα συνηθισμένες διακυμάνσεις στις ιδιότητες του υλικού, την κατασκευή και τις διαστάσεις των δοκιμών, την καλή διεξαγωγή της δοκιμής και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η δεύτερη κατηγορία παραγόντων που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή λειτουργίας σχεδίασης αφορούν την συγκεκριμένη εφαρμογή που εξετάζουμε και πιο συγκεκριμένα την εγκατάσταση, τον περιβάλλον, η θερμοκρασία, επιδιωκόμενη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.11 ο συντελεστής λειτουργίας σχεδίασης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 1 όταν οι δοκιμές για το HDB έχουν γίνει με εναλλασσόμενο φορτίο, ενώ για στατικό φορτίο δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 0.5.

Πίνακας 3.11: HDB για FRP σωλήνωση, American Society of Mechanical Engineers 2007

ASTM Spec. No. and Type	Grade	Class	Material Designation ASTM D 2310	HDB Stress [Note (1)] at 73°F [Notes (2), (3)]	
				Cyclic, ksi [Note (4)]	Static, ksi [Note (5)]
D 2517 filament wound	Glass fiber reinforced epoxy resin	No liner	RTRP-11AD	5.0	...
			RTRP-11AW	...	16.0
D 2996 filament wound	Glass fiber reinforced epoxy resin	No liner	RTRP-11AD	5.0	...
			RTRP-11AW	...	16.0
	Glass fiber reinforced epoxy resin	Epoxy resin liner, reinforced	RTRP-11FE	6.3	...
			RTRP-11FD	5.0	...
D 2997 centrifugally cast	Glass fiber reinforced polyester resin	Polyester resin liner, reinforced	RTRP-12EC	4.0	...
			RTRP-12ED	5.0	...
	Glass fiber reinforced polyester resin	No liner	RTRP-12EU	...	12.5
			RTRP-12AD	5.0	...
D 2997 centrifugally cast	Glass fiber reinforced polyester resin	Polyester resin liner, nonreinforced	RTRP-12AU	...	12.5
			RTRP-22BT	...	10.0
	Glass fiber reinforced polyester resin	Epoxy resin liner, nonreinforced	RTRP-22BU	...	12.5
			RTRP-21CT	...	10.0
			RTRP-21CU	...	12.5

NOTES:

- (1) A service (design) factor must be applied to these HDB values to obtain the HDS.
- (2) These HDB values apply only at 73°F.
- (3) Recommended temperature limits for these materials are shown in Table III-4.2.2.
- (4) When using the cyclic design basis, the service factor shall not exceed 1.0.
- (5) When using the static design basis, the service factor shall not exceed 0.5.

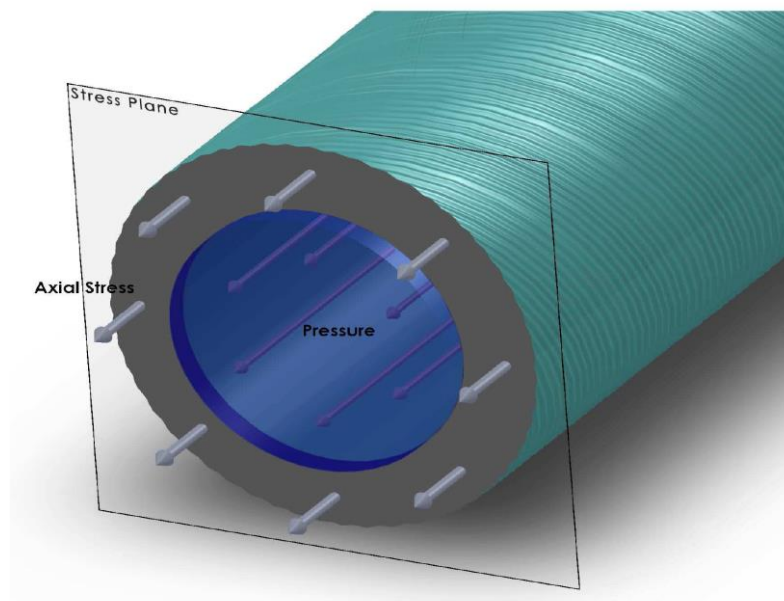
Αξονική τάση

Όπως αναφέρεται σε American Bureau of Shipping (2006), το άθροισμα των αξονικών τάσεων λόγω της πίεσης, του βάρους, της θερμικής διαστολής ή συστολής, τυχόν εξωτερικών φορτίσεων και των άλλων δυναμικών και σταθερών φορτίσεων δεν πρέπει να υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση στην αξονική διεύθυνση. Η αξονική τάση σωλήνωσης εξ ' ορισμού δίνεται από την σχέση (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012) 3.13:

$$f = P / A \quad (3.13)$$

Όπου f είναι η αξονική τάση (psi η kg/cm^2), P η αξονική δύναμη (lb ή kg), A η μέση επιφάνεια διατομής του πάχους τοιχώματος της σωλήνωσης (in^2 η cm^2).

Η επιτρεπτή αξονική τάση των FRP σωληνώσεων για θαλάσσιες εφαρμογές της σειράς Bondstrand είναι το 1/3 της αξονικής τάσης αστοχίας όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012). Η αξονική τάση αστοχίας μπορεί να προσδιοριστεί είτε πειραματικά είτε με ένα συνδυασμό πειραμάτων και υπολογιστικών μεθόδων. Αν μετρήσουμε πειραματικά αξονική τάση χωρίς να υπάρχει ταυτόχρονα περιφερειακή τάση τότε ακολουθούμε το πρότυπο ASTM D2105, ενώ αν ο λόγος περιφερειακής προς αξονική τάση είναι 2:1 τότε ακολουθούμε το πρότυπο ASTM 1599. Η κατανομή της αξονικής τάσης στην σωλήνωση φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση αξονικής τάσης (longitudinal axial stress) από εσωτερική πίεση

Καμπτική τάση

Ο υπολογισμός της επιτρεπτής καμπτικής τάσης δεν είναι τόσο εύκολος όσο της περιφερειακής και αξονικής τάσης γιατί δεν υπάρχουν αξιόπιστες πειραματικές μέθοδοι που να

μπορούν να εκτιμήσουν την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά σε κάμψη των FRP σωληνώσεων. Όπως αναφέρεται σε American Bureau of Shipping (2006), η επιτρεπτή καμπτική τάση προσεγγίζεται με ένα συνδυασμό πειραμάτων και υπολογιστικών μεθόδων που αποτυπώνονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_b = 0.5 * r_b * \sigma_{qs} / n \quad (3.14)$$

$$r_b = 2 * \sigma_{sb} / \sigma_{sh} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{qs} = f1 * P_{LTHP} * D / (2 * t_r) \quad (3.16)$$

Όπου σ_b η επιτρεπτή καμπτική τάση, r_b είναι ο διαξονικός λόγος καμπτικής τάσης προς περιφερειακή καμπτική τάση αστοχίας, σ_{sb} είναι η βραχυπρόθεσμη καμπτική τάση αστοχίας που προκύπτει από πείραμα ASTM D2925, σ_{sh} είναι η βραχυπρόθεσμη περιφερειακή καμπτική τάση αστοχίας που προκύπτει από πείραμα ASTM D1599, n ο συντελεστής ασφαλείας που είναι συνήθως 1.5 για σταθερά φορτία, P_{LTHP} είναι η μακροπρόθεσμη υδροστατική πίεση αστοχίας από ASTM D 2992, $f1$ είναι ο συντελεστής που αντιπροσωπεύει το 97.5% του Lower Confidence Limit του P_{LTHP} για προβλεπόμενη διάρκεια ζωής 20 χρόνια.

Όπως αναφέρεται σε Composites & Metal Products, στις FRP σωληνώσεις μια καμπτική τάση θεωρείται αποδεκτή όταν η το βέλος κάμψης που δημιουργεί μεταξύ δύο στηρίξεων είναι μικρότερο από 12.7 mm.

Διατμητική τάση στις ενώσεις της σωλήνωσης

Η διατμητική τάση στην κολλημένη ένωση (adhesive bonded joint) FRP σωλήνωσης δίνεται από την σχέση 3.17 όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012).

$$\sigma = P / (\pi * D_j * L_b) \quad (3.17)$$

Όπου σ είναι η διατμητική τάση στην ένωση της σωλήνωσης (psi ή kg/cm²), P η αξονική δύναμη (lb ή kg), D_j η διάμετρος της ένωσης (in ή cm), L_b το μήκος της ένωσης.

Πιέσεις

Η πίεση στη σωλήνωση είναι η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας. Η πίεση λειτουργίας για τυπικές διαστάσεις 2-12 in (50.8mm – 304.8) σωληνώσεων FRP είναι περίπου 1.38 MPa όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.12, ωστόσο μπορούμε να σχεδιάσουμε σωλήνωση που να αντέχει πίεση πολλαπλάσια αυτής που αναφέραμε για ειδικές εφαρμογές και με ειδικά εξαρτήματα ένωσης των τεμαχίων της σωλήνωσης.

Όπως αναφέρεται ωστόσο και σε American Society of Mechanical Engineers 2007 που είναι ένας κανονισμός με αρκετά πιο συντηρητικές εκτιμήσεις λόγω της έμφασης στην μεγάλη διάρκεια ζωής και την μέγιστη δυνατή αξιοπιστία της σωλήνωσης, η πίεση λειτουργίας για σωληνώσεις μεταφοράς νερού και μη εύφλεκτων υγρών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1.03 MPa.

Όπως αναφέρεται σε Schmit (1998), πρέπει να προσέχουμε οι φλάντζες που χρησιμοποιούμε να είναι σχεδιασμένες για ίδια πίεση και θερμοκρασία με την σωλήνωση, γιατί τυχαίνει συχνά να ταιριάζουν οι διαστάσεις σωληνώσεων-φλαντζών αλλά όχι η αντοχή (αυτό είναι ένα πρόβλημα που δεν υπάρχει στις μεταλλικές σωληνώσεις). Η πίεση σχεδίασης εξαρτάται από το πάχος του τοιχώματος της σωλήνας, το όριο διαρροής του υλικού, τους συντελεστές ασφαλείας, το περιβάλλον, τις φορτίσεις, την θερμοκρασία, τον τρόπο κατασκευής της σωλήνας.

Πίνακας 3.12: Τυπικές πιέσεις λειτουργίας σωληνώσεων διαφόρων υλικών, Schmit 1998

Material	Typical Design Pressures
FRP	Up to 12in. diameter, most chemical plant applications are 150psig or lower. Applications at higher pressures, however, are not uncommon.
ASTM A106 Grade B Seamless	2" SCH 40 (0.154" wall): Up to 1,400 psig 12" SCH 40 (0.406" wall): Up to 900 psig 2" SCH 160 (0.344" wall): Up to 4,600 psig
ASTM A312 TP316L	2" SCH 10S (0.109" wall): Up to 1,600 psig 6" SCH 10S (0.134" wall): Up to 700 psig 2" SCH 40S (0.154" wall): Up to 2,500 psig 6" SCH 40S (0.280" wall): Up to 1,500 psig
Gr 2 Titanium	2" SCH 10 (0.109" wall): Up to 1,500 psig 14" SCH 10 (0.25" wall): Up to 600 psig
ASTM B466 90/10 Cu-Ni	2" Wgt Class 200 (0.083" wall): Up to 600 psig 12" Wgt Class 200 (0.25" wall): Up to 300 psig
ASTM B467 70/30 Cu-Ni	2" Wgt Class 200 (0.083" wall): Up to 500 psig 12" Wgt Class 200 (0.25" wall): Up to 300 psig

Source: Data is from various users of these products.

Based on ASME B31.3, $P = 2SE(t-A)/(D-2y(t-A))$, $y = 0.4$, $E = 1.0$, $A = 0.0$, and $S = 20,000$ psi at ambient for carbon steel, 16,700psi at ambient for stainless, 16,700psi at ambient for titanium, 8,700psi at ambient for 90/10 Cu-Ni, and 10,000psi at ambient for 70/30 Cu-Ni.

Στην συνέχεια διακρίνουμε την εσωτερική και την εξωτερική πίεση σχεδίασης σωλήνα FRP και αναφέρουμε τις αντίστοιχες σχέσεις 3.18 και 3.19 από National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012):

Εσωτερική πίεση:

$$P_i = 2 \cdot s \cdot t / (OD - t) \quad (3.18)$$

Όπου P_i είναι η εσωτερική πίεση σχεδίασης (psi ή kg/cm²), s η επιτρεπτή περιφερειακή τάση (psi ή kg/cm²), OD η ελάχιστη εξωτερική διάμετρος της σωλήνας (in ή cm), t το ελάχιστο ενισχυμένο πάχος τοιχώματος που ισούται με το ελάχιστο πάχος τοιχώματος μείον το πάχος τυχόν προστατευτικής επένδυσης (in ή cm).

Στην σχέση 3.18 έχουμε θεωρήσει το πάχος της σωλήνωσης με βάση τον συνηθισμένο συντελεστή ασφαλείας 10 που χρησιμοποιείται στην περιφερειακή διεύθυνση (Lewandowski

and Britt 2004) ώστε η εσωτερική πίεση (σχεδίασης) την οποία βρίσκουμε να είναι 10πλάσια από την πίεση λειτουργίας για λόγους ασφάλειας.

Εξωτερική πίεση κατάρρευσης:

$$P_c = 2 * E_c * t_a^3 / ((1 - \nu_c * \nu_l) * ID^3) \quad (3.19)$$

Όπου P_c είναι η εξωτερική πίεση κατάρρευσης (psi ή kg/cm^2), E_c το περιφερειακό μέτρο ελαστικότητας (psi ή kg/cm^2), t_a το μέσο πάχος του τοιχώματος σωλήνωσης όπου συνυπολογίζεται και το πάχος της όποιας ενίσχυσης (in ή cm), ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνας (in ή cm), ν_c ο λόγος του poisson για συστολή κατά την αξονική διεύθυνση λόγω εφελκυστικής τάσης στην περιφερειακή διεύθυνση, ν_l ο λόγος του poisson για περιφερειακή συστολή λόγω εφελκυστικής τάσης στην αξονική διεύθυνση.

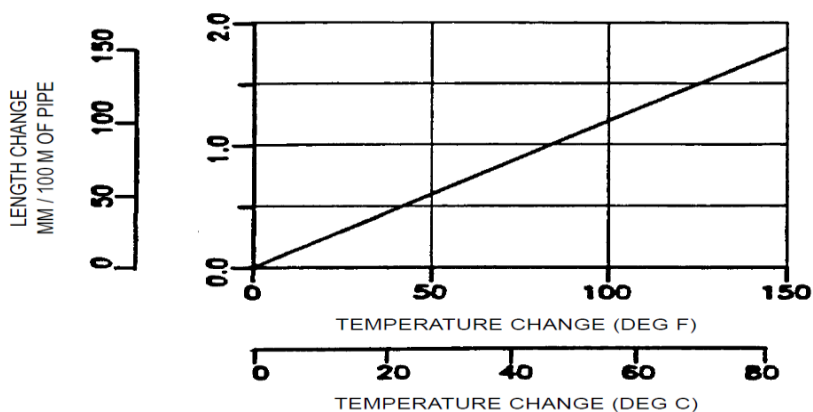
Η εξωτερική πίεσης κατάρρευσης μας ενδιαφέρει στην σχεδίαση μιας FRP σωλήνωσης γιατί η ξαφνική διακοπή λειτουργίας μιας αντλίας ή η γρήγορη αποστράγγισή της μπορεί να δημιουργήσει εξωτερική πίεση ή κενό που θα πρέπει να αντέξουν τα τοιχώματα της σωλήνωσης χωρίς να εμφανίσουν λυγισμό. Επισημαίνεται από AMIANTIT ότι για βιομηχανικές εφαρμογές FRP σωληνώσεων θεωρούμε ως επιτρεπτή εξωτερική πίεση κατάρρευσης το 70% της τιμής που υπολογίζει η σχέση (3.19), ενώ για θαλάσσιες εφαρμογές το 30%.

3.2.6 Αλλαγή μήκους

Οι αλλαγές στο μήκος σωληνώσεων FRP που δεν είναι πλήρως στηριγμένες (με αγκυρωμένες στηρίξεις) ώστε να εμποδίζονται αυτές οι μεταβολές, οφείλονται στην θερμοκρασία και την πίεση στη σωλήνωση. Ο τρόπος αντιμετώπισης αυτών των αλλαγών στο μήκος που χρησιμοποιείται κυρίως στα μη στηριγμένα συστήματα είναι οι ενώσεις που επιτρέπουν την απορρόφηση αυτών των αλλαγών μήκους (αρμοί διαστολής, βρόγχοι διαστολής).

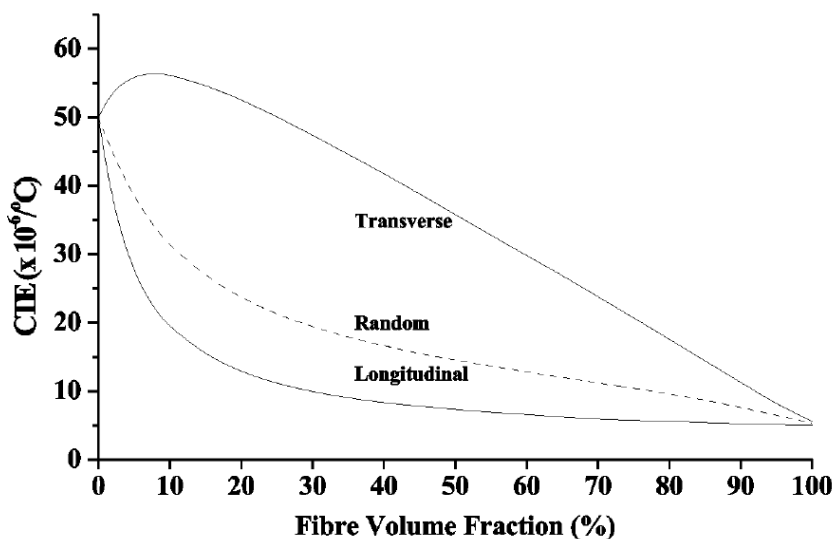
Αλλαγή μήκους λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής

Αν θεωρήσουμε μη στηριγμένο σύστημα, δηλαδή αν επιτρέπεται η αλλαγή μήκους, τότε το μήκος των σωληνώσεων μεταβάλλεται γραμμικά (όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5) με την μεταβολή της θερμοκρασίας και ανάλογα με το υλικό της σωλήνωσης και συνεπώς ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι σταθερός (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012). Ωστόσο σε υψηλές θερμοκρασίες και λόγω της αύξησης της απορροφημένης υγρασίας γενικά υπάρχει η τάση να αυξάνει και ο συντελεστής θερμικής διαστολής ενός FRP υλικού. Η αλλαγή μήκους λόγω θερμικής διαστολής σωλήνωσης από FRP είναι 2.5 φορές μεγαλύτερη από του ανθρακούχου χάλυβα (carbon steel) και 1.67 φορές μεγαλύτερη από του ανοξείδωτου χάλυβα (Schmit 1998). Για ορισμένες μάλιστα σωληνώσεις από FRP που έχουν παρασκευασθεί με περιέλιξη ινών, η διαφορά μεταξύ FRP και χάλυβα στην αλλαγή μήκους λόγω θερμικής διαστολής είναι ακόμα μικρότερη. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμική διαστολή στην περιφερειακή διεύθυνση είναι παρόμοια μεταξύ FRP και ανθρακούχου χάλυβα (Chasis 1988).



Σχήμα 3.5: η γραμμική σχέση μεταξύ αλλαγής μήκους και μεταβολής θερμοκρασίας για συνηθισμένο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

Ο ρυθμός της θερμικής διαστολής στα προϊόντα FRP εξαρτάται πολύ από την ποσότητα και τον προσανατολισμό του γυαλιού, επειδή οι ίνες γυαλιού έχουν αρκετά μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής ($0.28 \cdot 10^{-5}$ in/in/F) σε σχέση με την ρητίνη ($2-3.5 \cdot 10^{-5}$ in/in/F) και άρα η ποσότητα του γυαλιού επιδρά σημαντικά στον συνολικό συντελεστή θερμικής διαστολής του FRP υλικού (σχήμα 3.6). Αυτή η διαφορά στον συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ ενισχυτικών ινών και μήτρας δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων στο εσωτερικό του FRP καθώς η ρητίνη που έχει την τάση να διασταλεί με την αύξηση της θερμοκρασίας «συγκρατείται» από τις ίνες γυαλιού. Αυτή η διαδικασία στο βαθμό που επαναλαμβάνεται τακτικά επιδρά αρνητικά και στην συμπεριφορά του FRP σε κόπωση.



Σχήμα 3.6: Εκτιμώμενοι συντελεστές διαστολής FRP υλικού (ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη) ανάλογα με το ποσοστό του όγκου των ινών στον συνολικό όγκο του υλικού

Στον πίνακα 3.13 παρατίθενται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή θερμικής διαστολής για διάφορα υλικά σωληνώσεων από Schmit (1998) και συμπληρωματικά αναφέρουμε ότι η ενδεικτική τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής των σωληνώσεων Bondstrand FRP είναι $1 \cdot 10^{-5}$ in/in/F = $1.8 \cdot 10^{-5}$ mm/mm/C και εκτιμάται ο θερμικός συντελεστής διαστολής μιας

σωλήνωσης Bondstrand να είναι 50% μεγαλύτερος του αντίστοιχου συντελεστή μιας χαλύβδινης σωλήνωσης (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012).

Πίνακας 3.13: Τυπικοί συντελεστές θερμικής διαστολής υλικών για σωληνώσεις για θερμοκρασίες μέχρι 300 F (149 C), Schmit 1998

Material	Thermal Expansion Coefficient
FRP	$0.9 - 1.5 \times 10^{-5}$ in./in./°F
Carbon Steels	$0.6 - 0.65 \times 10^{-5}$ in./in./°F
Austenitic Stainless Steels	$0.9 - 0.95 \times 10^{-5}$ in./in./°F
Gr 2 Titanium	0.48×10^{-5} in./in./°F
90/10 Cu-Ni	$0.9 - 0.95 \times 10^{-5}$ in./in./°F
70/30 Cu-Ni	$0.8 - 0.85 \times 10^{-5}$ in./in./°F

Source: Gr 2 Titanium data is from Nayyar, *Piping Handbook*, 6th Edition. 90/10 Cu-Ni source is unknown. All other data is from ASME B31.3.

Η σχέση για τον υπολογισμό της θερμικής διαστολής σωλήνωσης FRP (Schmit 1998) δίνεται από την εξίσωση 3.20:

$$\Delta L_{\text{Thermal}} = C_t * L * \Delta T \quad (3.20)$$

Όπου $\Delta L_{\text{Thermal}}$ η αλλαγή μήκους (in ή mm), C_t ο συντελεστής θερμικής διαστολής (in/in/F ή mm/mm/C), L το μήκος της σωλήνωσης (in ή mm) για την οποία εξετάζουμε την αλλαγή μήκους και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας (F ή C).

Αλλαγή μήκους λόγω εσωτερικής πίεσης

Η αλλαγή μήκους σωληνώσεων λόγω πίεσης εξαρτάται από το πάχος της σωλήνωσης, την διάμετρο, το λόγο του Poisson και το μέτρο ελαστικότητας (στην αξονική και περιμετρική διεύθυνση) ενώ η επίδραση της θερμοκρασίας θεωρείται αμελητέα. Η αλλαγή μήκους σωληνώσεων λόγω πίεσης, πρέπει να υπολογίζεται κατά τη σχεδίαση σωληνώσεων από FRP σε αντίθεση με τα περισσότερα μεταλλικά συστήματα σωληνώσεων, αφού για το FRP είναι πολλές φορές εξίσου μεγάλη με τη θερμική διαστολή και περίπου 25 φορές μεγαλύτερη από την διαστολή λόγω πίεσης των ανθρακούχων και ανοξείδωτων χαλύβων και 16 φορές μεγαλύτερη από την διαστολή λόγω πίεσης των σωληνώσεων χαλκού-νικελίου (Schmit 1998). Η παραπάνω μεγάλη απόκλιση μεταξύ FRP και μεταλλικών σωληνώσεων οφείλεται κυρίως στο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας στα προϊόντα από FRP. Όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012) η σχέση για τον υπολογισμό της διαστολής λόγω πίεσης σε μη στηριγμένη σωλήνωση FRP δίνεται από την εξίσωση 3.21, ενώ για στηριγμένο σύστημα σωλήνωσης όπου μέσω των στηρίξεων εξουδετερώνει την διαμήκη δύναμη, έχουμε την εξίσωση 3.22:

$$\Delta L_{\text{Pressure}} = L * \frac{P * ID^2}{4 * t * Dm * El} * \left(1 - \frac{2 * \nu * Ec * El}{Ec}\right) \quad (3.21)$$

$$\Delta L_{\text{Pressure}} = L * \left(\frac{-\nu * P * ID^2}{2 * t * Dm * Ec}\right) \quad (3.22)$$

Όπου L το μήκος της εξεταζόμενης σωλήνωσης (in ή cm), P η εσωτερική πίεση της σωλήνωσης (psi ή kg/cm²), El είναι το μέτρο αξονικής ελαστικότητας (psi ή kg/cm²), Ec είναι το μέτρο περιμετρικής ελαστικότητας (psi ή kg/cm²), ν ο λόγος του Poisson για την συστολή κατά την διαμήκη διεύθυνση λόγω της τάσης στην περιμετρική διεύθυνση, Dm η μέση διάμετρος της σωλήνας που ισούται με το άθροισμα της εσωτερικής διαμέτρου και του πάχους (in ή cm), ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης (in ή cm), t το πάχος της σωλήνωσης (in ή cm).

Όπως φαίνεται και από την εξίσωση 3.22, ισχύει ότι για συγκρατούμενο σύστημα σωληνώσεων FRP με στηρίξεις, δημιουργείται διαμήκης βράχυνση της σωλήνωσης που αξιοποιείται κατά την σχεδίαση για να αντισταθμίσει την αύξηση του μήκους της σωλήνωσης από την θερμοκρασιακή μεταβολή.

Στον πίνακα 3.14 δίνονται ενδεικτικοί συντελεστές διαστολής λόγω πίεσης για διάφορα υλικά σωληνώσεων. Ο υπολογισμός της πραγματικής διαστολής για 100 ft σωλήνωσης γίνεται με τον πολλαπλασιασμό αυτού του συντελεστή με (P*r/t), όπου r η εξωτερική ακτίνα της σωλήνωσης (in ή cm). Στο σχήμα 3.7 παρατίθενται ενδεικτικοί υπολογισμοί της αύξησης μήκους λόγω εσωτερικής πίεσης 100 psi για σωλήνωση Bondstrand 2000M μήκους 100 ft.

Πίνακας 3.14: Τυπικοί συντελεστές διαστολής λόγω πίεσης υλικών για σωληνώσεις, Schmit 1998

Material	Magnitude of Pressure Expansion	Comparison to Carbon Steel
FRP (1.4 x 10 ⁶ , 2.3 x 10 ⁶ , 0.5)	2.0 x 10 ⁻⁴	25x greater
Carbon / Stainless Steels (30 x 10 ⁶ , 0.3)	0.08 x 10 ⁻⁴	-----
Gr 2 Titanium (15.5 x 10 ⁶ , 0.3)	0.15 x 10 ⁻⁴	2x greater
90/10 Cu-Ni (18 x 10 ⁶ , 0.3)	0.13 x 10 ⁻⁴	1.6x greater
70/30 Cu-Ni (20 x 10 ⁶ , 0.3)	0.12 x 10 ⁻⁴	1.5x greater

Values in parenthesis are axial tensile modulus, hoop tensile modulus (if different from axial), and minor poisson's ratio.

Αλλαγή μήκους λόγω δυναμικής φόρτισης

Η δυναμική φόρτιση που δημιουργείται σε μια σωλήνωση πλοίου από την απότομη αλλαγή της σχετικής θέσης των στηρίξεων της σωλήνωσης ως προς την σωλήνωση, λόγω των δυναμικών φαινομένων που προκαλούν οι κυματισμοί, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην

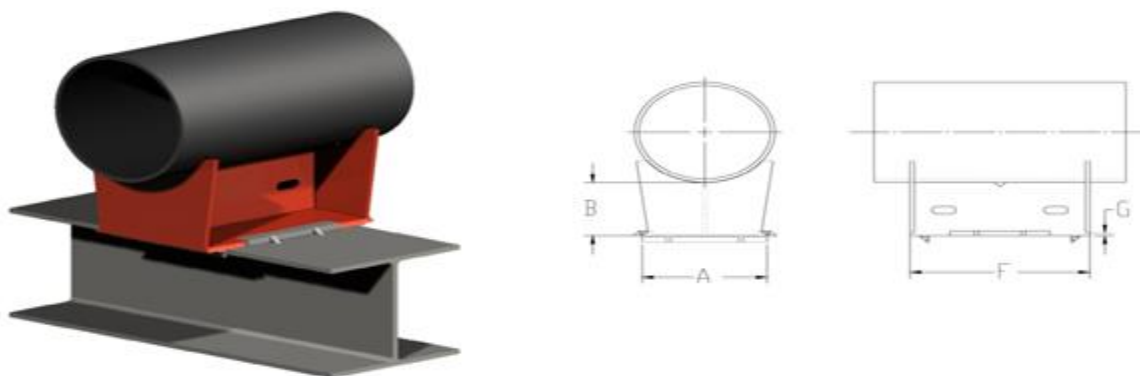
διαδικασία της σχεδίασης της σωλήνωσης. Το μέγεθος της αλλαγής μήκους μεταξύ δύο σημείων στήριξης μιας σωλήνωσης λόγω δυναμικής φόρτισης εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του, το μέγεθος του δυναμικού φορτίου (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012).

Size		Length Increase	
(in.)	(mm.)	(in.)	(mm)
2	50	0.2	5.0
3	80	0.3	7.8
4	100	0.3	7.6
6	150	0.4	10.2
36	900	0.4	10.2

Σχήμα 3.7: Ενδεικτικές τιμές αύξησης μήκους σωλήνωσης λόγω εσωτερικής πίεσης, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

3.2.7 Αξονική δύναμη από τις αγκυρωμένες στηρίξεις

Συνήθως κατά την σχεδίαση ενός δικτύου σωλήνωσης υπάρχει πρόβλεψη για πλήρη στήριξη του, δηλαδή η σωλήνωση έχει αγκυρωμένες στηρίξεις (anchor supports) χωρίς να επιτρέπεται η κίνηση στο διάμηκες. Συνεπώς οι όποιες αλλαγές μήκους εμποδίζονται στις αγκυρωμένες στηρίξεις και μετατρέπονται σε αξονική δύναμη (thrust), η οποία αποκτά μεγαλύτερη σημασία για την σχεδίαση σωληνώσεων FRP (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012).



Σχήμα 3.8: Αγκυρωμένη στήριξη σωλήνωσης

Στις σωληνώσεις η εσωτερική πίεση και η θερμοκρασία παράγουν αξονική δύναμη, όμως υπάρχουν και ειδικά εξαρτήματα στη σωλήνωση που παράγεται παραπάνω αξονική δύναμη όπως βαλβίδες, γωνίες, διακλαδώσεις, μειωτήρες. Αυτά τα εξαρτήματα απαιτούν ειδικές προβλέψεις στηρίξεων για να αποφευχθούν φθορές. Το μέγεθος της αξονικής δύναμης επηρεάζει τις αγκυρωμένες στηρίξεις που επιλέγουμε κατά την σχεδίαση ώστε να διατηρήσουμε σε επιτρεπτά επίπεδα την αξονική τάση στη σωλήνωση και την διατμητική τάση στα σημεία ένωσης των σωλήνων. Η αξονική δύναμη που δημιουργείται από την πίεση και την θερμοκρασία είναι συνήθως ανεξάρτητη από την απόσταση μεταξύ των αγκυρωμένων

στηρίξεων. Οι στηρίξεις που επιτρέπουν αξονική κίνηση της σωλήνωσης θα πρέπει να τοποθετούνται στις ευθείες διαδρομές της σωλήνωσης, όπου η αξονική κίνηση δεν περιορίζεται από εξαρτήματα της σωλήνωσης.

Το μέγεθος της αξονικής δύναμης που δημιουργείται από την παρεμπόδιση της αλλαγής μήκους (που τείνει να προκαλέσει η αλλαγή της θερμοκρασίας) στις στηρίξεις της σωλήνωσης, εξαρτάται: από τον συντελεστή θερμικής διαστολής, το εμβαδόν διατομής του πάχους τοιχώματος της σωλήνωσης και το μέτρο ελαστικότητας. Η αξονική δύναμη που προκαλείται από την αλλαγή θερμοκρασίας σε μια σωλήνωση με αγκυρωμένες στηρίξεις υπολογίζεται από την σχέση 3.23 (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012), ενώ ενδεικτικές τιμές της δίνονται στον πίνακα 3.15.

$$P = Ct * \Delta T * A * E_L \quad (3.23)$$

Όπου P η αξονική δύναμη (lb ή kg), Ct ο συντελεστής θερμικής διαστολής (in/in/F ή mm/mm/C), ΔT η διαφορά θερμοκρασίας (F ή C), A η μέση επιφάνεια διατομής του πάχους τοιχώματος της σωλήνωσης (in² ή cm²), E_L το αξονικό μέτρο ελαστικότητας στην αρχική θερμοκρασία (psi ή kg/cm²).

Πίνακας 3.15: Αξονική δύναμη λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής σε σωλήνωση με αγκυρωμένες στηρίξεις, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012

Nominal Pipe Size (in) (mm)		For $\Delta T = 100^\circ F$ (lbf)	For $\Delta T = 100^\circ C$ (kg)
2	50	1,810	1,490
3	75	2,720	2,250
4	100	4,370	3,600
6	150	6,770	5,580
8	200	11,220	9,230
10	250	17,280	14,260
12	300	24,160	19,900
14	350	27,840	22,900
16	400	36,000	29,600
18	450	44,960	37,200
20	500	55,200	45,600
24	600	78,560	64,800
28	700	113,900	94,000
30	750	130,200	107,200
36	900	184,000	152,000

Η αξονική δύναμη που δημιουργείται από την παρεμπόδιση της αλλαγής μήκους που προκαλεί η εσωτερική πίεση λόγω της ύπαρξης των αγκυρωμένων στηρίξεων της σωλήνωσης, είναι πιο περίπλοκη στον υπολογισμό, καθώς το φαινόμενο του Poisson δημιουργεί σημαντική τάση στο τοίχωμα της σωλήνωσης. Συγκεκριμένα η εσωτερική πίεση δημιουργεί ταυτόχρονα στην σωλήνωση μια περιμετρική διαστολή και μια διαμήκη συστολή η οποία περιορίζει την συνολική διαμήκη διαστολή και άρα μειώνει την αξονική δύναμη που ασκείται στις αγκυρωμένες στηρίξεις. Ενδεικτικές τιμές αξονικής δύναμης λόγω εσωτερικής πίεσης σε

σωλήνωση με αγκυρωμένες στηρίξεις φαίνονται στον πίνακα 3.16. Η αξονική δύναμη λόγω εσωτερικής πίεσης σε ένα πλήρως στηριγμένο σύστημα δίνεται από την σχέση 3.24 (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012).

$$P = \frac{\pi * p * D_m * ID}{2} * \frac{E_l}{E_c} * (-\nu_{ic}) \quad (3.24)$$

Όπου p η εσωτερική πίεση της σωλήνωσης (psi ή kg/cm²), E_l είναι το μέτρο αξονικής ελαστικότητας (psi ή kg/cm²), E_c είναι το μέτρο περιμετρικής ελαστικότητας (psi ή kg/cm²), ν_{ic} ο λόγος του Poisson για την συστολή κατά την διαμήκη διεύθυνση λόγω της τάσης στην περιμετρική διεύθυνση, D_m η μέση διάμετρος της σωλήνας που ισούται με το άθροισμα της εσωτερικής διαμέτρου και του πάχους (in ή cm), ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης (in ή cm).

Πίνακας 3.16: Αξονική δύναμη λόγω εσωτερικής πίεσης σε σωλήνωση με αγκυρωμένες στηρίξεις, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

Nominal Pipe Size (in) (mm)		For Internal Pressure = 100 psi (lbf)	For Internal Pressure = 10kg/cm ² (kg)
2	50	182	118
3	75	423	273
4	100	700	451
6	150	1,580	1,020
8	200	2,710	1,750
10	250	4,300	2,780
12	300	6,120	3,950
14	350	7,090	4,570
16	400	9,260	5,980
18	450	11,700	7,560
20	500	14,500	9,330
24	600	20,800	13,400
28	700	30,500	19,700
30	750	35,000	22,600
36	900	50,000	32,300

Στα σημεία όπου οι σωληνώσεις έχουν γωνίες, βαλβίδες, μειωτήρες και κλειστά άκρα, η αξονική δύναμη λόγω εσωτερικής πίεσης είναι περίπου διπλάσια από την δύναμη που ασκείται στο τοίχωμα της σωλήνωσης. Ενδεικτικές τιμές αξονικής δύναμης λόγω εσωτερικής πίεσης σε κλειστό άκρο σωλήνωσης με αγκυρωμένες στηρίξεις φαίνονται στον πίνακα 3.17. Η αξονική δύναμη λόγω εσωτερικής πίεσης σε κλειστό άκρο της σωλήνωσης υπολογίζεται από την σχέση 3.25 (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012) ως εξής:

$$P = \frac{\pi * ID^2}{4} * p \quad (3.25)$$

Η συνολική αξονική δύναμη που δημιουργείται από την εσωτερική πίεση και την θερμοκρασία σε όλη την σωλήνωση και τα εξαρτήματά της, πρέπει να αντιμετωπίζεται σαν σύνολο για την σχεδίαση των αγκυρωμένων στηρίξεων της σωλήνωσης FRP.

Πίνακας 3.17: Αξονική δύναμη λόγω πίεσης σε κλειστό άκρο σωλήνωσης με αγκυρωμένες στηρίξεις - National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

Nominal Pipe Size (in) (mm)		For Internal Pressure = 100 psi (lbf)	For Internal Pressure = 10kg/cm ² (kg)
2	50	343	221
3	75	814	525
4	100	1,350	869
6	150	3,080	1,900
8	200	5,310	3,420
10	250	8,410	5,430
12	300	12,000	7,730
14	350	13,900	8,950
16	400	18,100	11,700
18	450	22,900	14,800
20	500	28,300	18,300
24	600	40,800	26,300
28	700	59,700	38,500
30	750	68,400	44,200
36	900	97,900	63,200

3.2.8 Απόδοση σε φωτιά

Η απόδοση σε φωτιά προϊόντων FRP αποτελεί και το πιο αδύναμο σημείο τους και τον βασικό ανασταλτικό παράγοντα για την γενικευμένη χρήση τους σε σωληνώσεις πλοίων όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο, καθώς το γεγονός ότι αποτελούν γενικά εύφλεκτα υλικά οδηγεί σε υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων μετά από φωτιά. Μπορούμε να επισημάνουμε ότι παρότι οι σωλήνες FRP με ίνες γυαλιού τηρούν πια τις απαιτήσεις του επίπεδου 3 (L3) για αντοχή σε φωτιά των Νηογνομένων (λεπτομέρειες υπάρχουν στο κεφάλαιο 4), ωστόσο για το επίπεδο 2 υπάρχει αρκετά περιορισμένος αριθμός προμηθευτών σωληνώσεων FRP, ενώ η παραγωγή σωληνώσεων FRP επιπέδου 1 δεν θεωρείται αποδοτική οικονομικά. (American Bureau of Shipping 2006).

Ωστόσο για την καταλληλότητα χρήσης μιας σωλήνωσης από FRP δεν αρκεί η διασφάλιση της διατήρησης των μηχανικών ιδιοτήτων της, πρέπει επίσης να εξεταστεί η ποσότητα και η τοξικότητα του καπνού που δημιουργείται στην περίπτωση φωτιάς, τα χαρακτηριστικά διάδοσης της φωτιάς, ο χρόνος μέχρι την ανάφλεξη. Οι ιδιότητες που σχετίζονται με την συμπεριφορά σε φωτιά μπορούν να υποδιαιρεθούν σε αυτές που σχετίζονται με την εξέλιξη της φωτιάς και αυτές που αφορούν την ανθρώπινη επιβιωσιμότητα και αναφέρονται μαζί με τις συνήθεις δοκιμές στον πίνακα 3.18.

Σε σχέση με την επιβιωσιμότητα οι κύριοι βραχυ-μεσοπρόθεσμοι παράγοντες είναι η παραγωγή καπνού που δεν διαφεύγει στο περιβάλλον καθώς και η τοξικότητα που συνήθως αφορά το μονοξείδιο του άνθρακα που είναι το πιο τοξικό βραχυπρόθεσμα. Βασικός παράγοντας επιλογής συστήματος ρητίνης στις θαλάσσιες εφαρμογές είναι η πιθανότητα παρουσίας ανθρώπων στο συγκεκριμένο μέρος και η ύπαρξη διαδρομών εκκένωσης και ασφαλών καταφυγίων. Για παράδειγμα σε περιπτώσεις αεριζόμενων εξωτερικών χώρων και σε μη επανδρωμένες πλατφόρμες μπορεί να μην μας ενδιαφέρει η χρήση ρητίνων με μεγάλη παραγωγή καπνού και τοξικών προϊόντων, ενώ σε άλλες περιπτώσεις που περιλαμβάνουν κλειστούς χώρους και χώρους διαμονής να είναι κρίσιμο οι χρησιμοποιούμενες ρητίνες να πληρούν τις απαιτήσεις επιβιωσιμότητας.

Πίνακας 3.18: Ιδιότητες και δοκιμές που σχετίζονται με την απόδοση σε φωτιά FRP υλικών, GIBSON 2003

FIRE REACTION	
Start-up and progress of fire	
	Oxygen index Combustibility Time-to-ignition Surface spread of flame Peak heat release Average heat release
Human survivability	
	Smoke generation Toxicity index
FIRE RESISTANCE	
	Pool fire tests Burner tests Furnace tests Jet-fire tests

Τυπικά δεδομένα που σχετίζονται με την παραγωγή καπνού και τοξικών προϊόντων φαίνονται στον πίνακα 3.19, όπου φαίνεται ότι οι φαινολικές και Modar ρητίνες (modified acrylic) έχουν χαμηλή παραγωγή καπνού και είναι τα μόνα που είναι ίσως επιτρεπτά σε χώρους με παρουσία προσωπικού και περιορισμένα μέσα διαφυγής. Η φαινολική ρητίνη παρά την εξαιρετική επίδοσή της στην παραγωγή καπνού δεν είναι εξίσου καλή με την Modar στα επίπεδα τοξικότητας λόγω της παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα.

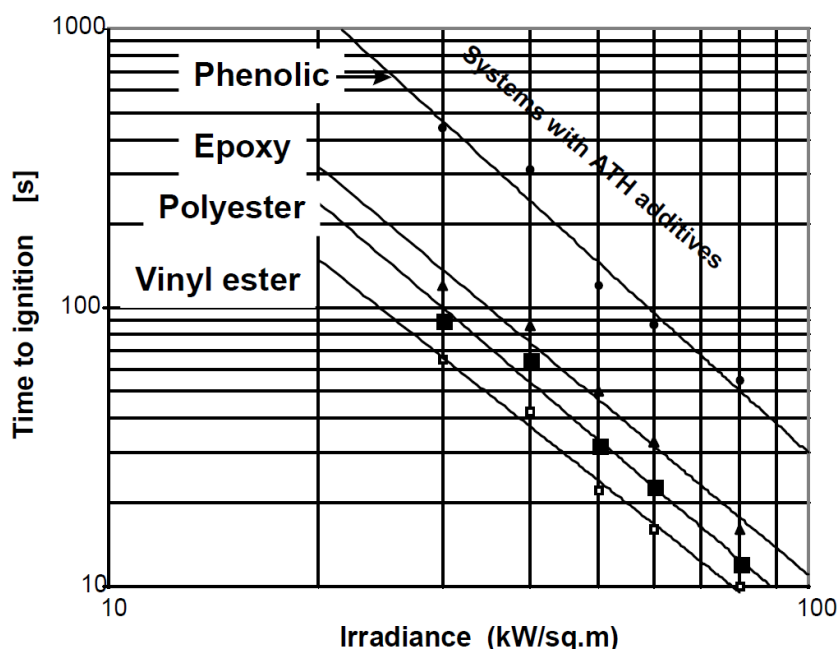
Πίνακας 3.19: Σύγκριση παραγωγής καπνού και τοξικότητας FRP υλικών με 50% όγκο γυαλιού και διάφορες ρητίνες, GIBSON 2003

	Smoke - 3m Cube [BS 6853]		Smoke Cone Calorimeter [ISO 5660] Average at 50kW/m ² [m/s]	CO Cone Calorimeter [ISO 5660] Av. at 50kW/m ² [kg/s/m ²]	Toxicity index [NES 713]
	Ao (on)	Ao (off)			
Polyester	24.3	18.9	8.3	0.6	1.5
Vinyl ester	27	17.6	10.3	0.7	1.2
Epoxy	14.1	11.3	11.2	0.8	1.2
Modar	2.26	2.5	-	-	1.2
Phenolic	0.36	0.41	0.8	1.0	1.0

Όσον αφορά τις ιδιότητες που σχετίζονται με την αντοχή του FRP και την εξέλιξη της φωτιάς μπορούμε να συγκρίνουμε ανάλογα και τις ρητίνες:

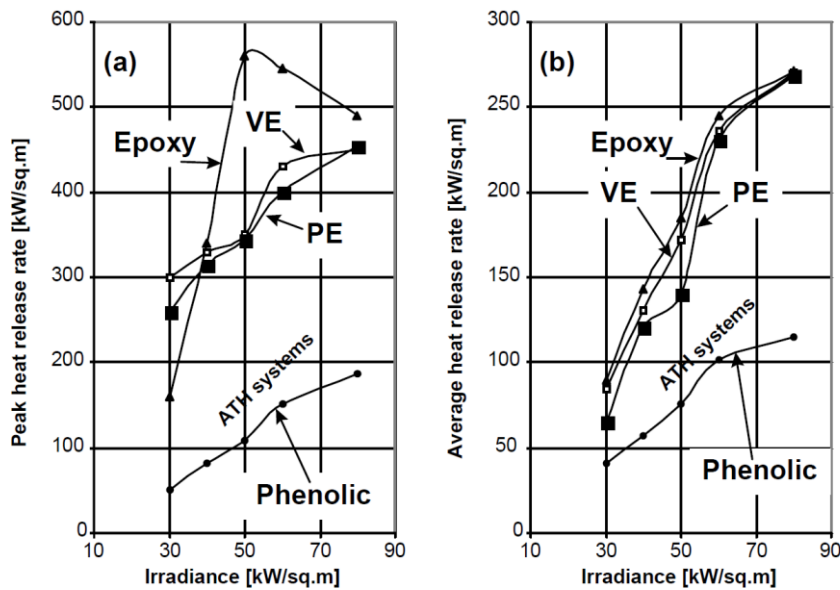
- αναφορικά με τον χρόνο μέχρι την ανάφλεξη, την καλύτερη συμπεριφορά έχουν οι φαινολικές ρητίνες και ακολουθούνται από τις εποξικές, τις πολυεστερικές και τέλος τις βυνιλεστερικές ρητίνες (σχήμα 3.9)

- αναφορικά με την έκλυση θερμότητας, την καλύτερη συμπεριφορά έχουν οι φαινολικές ρητίνες και ακολουθούνται από τις πολυεστερικές, τις βυνιλεστερικές και τέλος τις εποξικές, ρητίνες (σχήμα 3.10)
- αναφορικά με την αντίσταση σε φωτιά, που μετριέται από τον χρόνο που χρειάζεται το FRP για να φτάσει σε θερμοκρασία 140 °C (σχήμα 3.11)

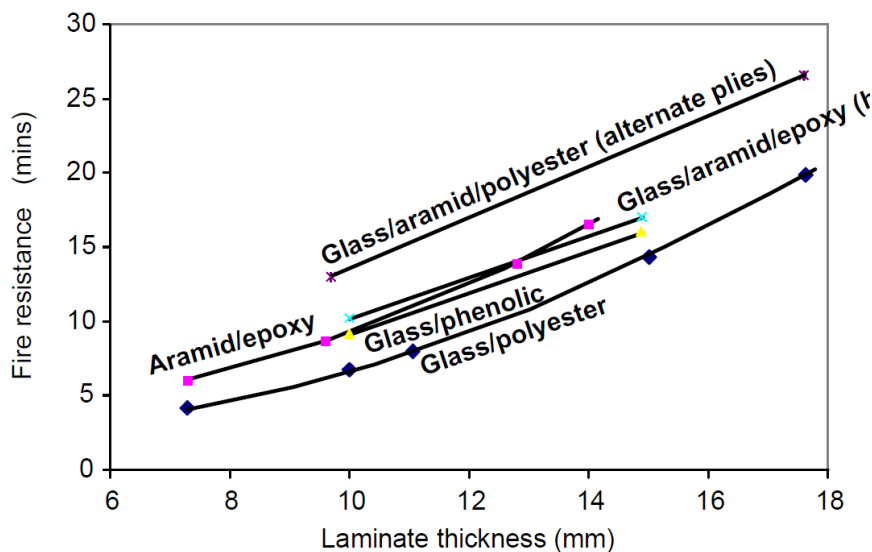


Σχήμα 3.9: Σύγκριση χρόνου μέχρι την ανάφλεξη ανάλογα με την ακτινοβολία, FRP υλικών με 50% όγκο γυαλιού και διάφορες ρητίνες, GIBSON 2003

Πολλές από τις ιδιότητες συμπεριφοράς σε φωτιά (χρόνος μέχρι την ανάφλεξη, επιφανειακή διάδοση φωτιάς) μιας σωλήνωσης FRP επηρεάζονται από την φύση του υλικού που είναι στην εξωτερική επιφάνεια της σωλήνωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι σωληνώσεις FRP από εποξική ρητίνη χωρίς προστατευτική επικάλυψη, όπου σε περίπτωση φωτιάς με την σωλήνα να διαρρέεται από νερό (υγρή κατάσταση) θα υπάρχει υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων μέχρι ένα δοσμένο σημείο και διατήρησή τους στην συνέχεια.



Σχήμα 3.10: Σύγκριση ρυθμού έκλυσης θερμότητας ανάλογα με την ακτινοβολία, FRP υλικών με 50% όγκο γυαλιού και διάφορες ρητίνες, GIBSON 2003



Σχήμα 3.11: Αντίσταση σε φωτιά ανάλογα με το πάχος FRP υλικών με 50% όγκο γυαλιού και διάφορες ρητίνες, GIBSON 2003

Ωστόσο FRP υλικά που είτε βασίζονται σε ρητίνες που έχουν επιβραδυντικές ως προς τη φωτιά ιδιότητες (φαινολικές) είτε έχουν προστατευτικές επικαλύψεις, μπορεί να έχουν αρκετά βελτιωμένη συμπεριφορά σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτιάς (πίνακας 3.20). Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα 3.20 έχουν προκύψει από πειράματα και έχουν προσαρμοστεί σε σχέση με τιμές αναφοράς τσιμέντου ενισχυμένου με ίνες γυαλιού (0) και κόκκινης βελανιδιάς (100).

Ο πιο σημαντικός παράγοντας ωστόσο που αφορά την ακεραιότητα μετά από φωτιά ενός FRP υλικού δεν σχετίζεται με τις επιφανειακές του ιδιότητες αλλά με την ικανότητα της ρητίνης να «καθυστερεί» την μετάδοση της θερμότητας μέσα στο υλικό καθώς η ίδια αποσυντίθεται.

Πίνακας 3.20: Βελτίωση συμπεριφοράς σε φωτιά σωλήνωσης FRP με χρήση προστατευτικής επικάλυψης, Curran 2013

Test Specimen	Flame Spread	Fuel Contribution	Smoke Developed
FRP Pipe	40	0	755
Coated FRP Pipe	5	0	30
<i>Index Improvement</i>	35	0	725

Στην αντίσταση σε φωτιά συνεισφέρει το γεγονός ότι το FRP με ίνες γυαλιού έχει υψηλό σημείο τήξης λόγω του υψηλού σημείου τήξης των ινών γυαλιού που διατηρούν σημαντικά την αντοχή τους κατά την φωτιά και όταν καίγονται δημιουργούν μια απανθρακωμένη επιφάνεια που αποτρέπει την περαιτέρω καύση. Για αυτούς τους λόγους το υψηλό ποσοστό ινών γυαλιού βελτιώνει την συμπεριφορά του FRP στη φωτιά. Επίσης οι ίνες γυαλιού μονώνουν το εσωτερικό της σωλήνωσης από ακραίες θερμοκρασίες (λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που προαναφέραμε γενικά για τα FRP). Συγκριτικά τα όρια τήξης διάφορων υλικών που χρησιμοποιούνται για σωληνώσεις φαίνονται στον πίνακα 3.21.

Πίνακας 3.21: Τυπικές τιμές θερμοκρασίας τήξης υλικών για σωληνώσεις, Schmit 1998

Material	Melting Point
FRP Glass Resin	Above 2900•F Not Applicable
Carbon Steels	2600 - 2800•F
Stainless Steels	2500 - 2600•F
Titanium	3002 - 3038•F
90/10 Cu-Ni	Not Available
70/30 Cu-Ni	2140 - 2260•F

Source: Nayyar, *Piping Handbook*, 6th Edition except for FRP - Glass which is based on SiO₂ from *Handbook of Chemistry and Physics*

Μια συνοπτική παρουσίαση των βασικών ποιοτικών χαρακτηριστικών συμπεριφοράς σε φωτιά διάφορων ρητινών εμφανίζεται στον πίνακα 3.22.

Πίνακας 3.22: Χαρακτηριστικά συμπεριφοράς σε φωτιά και κόστος διάφορων ρητινών, Ship Structure Committee 1997

Resin System		Properties	Price Range \$/lb	Room Temp Strength	High Temp Strength	Rate of Heat Release	Smoke & Toxicity
Thermosets	Polyester	Polyester resins are the most common resins used in the marine industry because of their low cost and ease of manufacture. Isophthalic polyesters have better mechanical properties and show better chemical and moisture resistance than ortho polyester	.66 - .95	1	1	1	2
	Epoxy	Excellent mechanical properties, dimensional stability and chemical resistance (especially to alkalis); low water absorption; self-extinguishing (when halogenated); low shrinkage; good abrasion resistance; very good adhesion properties	2.00 - 10.00	3	1	1	1
	Vinyl Ester	Good mechanical, electrical and chemical resistance properties; excellent moisture resistance; intermediate shrinkage	1.30 - 1.75	2	1	1	1
	Phenolic	Good acid resistance; good electrical properties (except arc resistance); high heat resistance	.60 - 5.00	1	3	2	2
	Bismaleimides	Intermediate in temperature capability between epoxy and polyimide; possible void-free parts (no reaction by-product); brittle	10.00 - 25.00	1	3	2	2
	Polyimides	Resistant to elevated temperatures; brittle; high glass transition temperature; difficult to process	22.00	3	3	2	2
Thermoplastics	Polyether Ether Ketone (PEEK)	Good hot/wet resistance, impact resistant; rapid, automated processing possible	21.50 - 28.00	2	2	2	2
	Poly Phenylene Sulfide (PPS)	Good flame resistance and dimensional stability; rapid, automated processing possible	2.00 - 6.00	1	2	3	3
	Poly Ether Sulfone (PES)	Easy processability; good chemical resistance; good hydrolytic properties	4.40 - 7.00	2	1	3	3
	Poly Aryl Sulfone (PAS)	High mechanical properties; good heat resistance; long term thermal stability; good ductility and toughness	3.55 - 4.25	2	2	3	2
Legend							
1 poor							
2 moderate							
3 good							

3.2.9 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Οι σωληνώσεις FRP σε χώρους πλοίων που υπάρχει κίνδυνος έκρηξης από το στατικό φορτίο ηλεκτρισμού που δημιουργεί η ροή του ρευστού στην σωλήνα πρέπει να

προστατεύονται όντας ηλεκτρικά μονωμένες. Όταν απαιτείται ηλεκτρικά μονωμένη σωλήνωση, τότε η ηλεκτρική αντίσταση ανά μονάδα μήκους της σωλήνωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει το $1 \times 10^5 \Omega/m$ και ταυτόχρονα θα πρέπει να υπάρχει γείωση της σωλήνωσης και της προστατευτικής της επικάλυψής με το δάπεδο. Ο πίνακας 3.23 παρέχει οδηγίες για την σχεδίαση για ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας σωλήνωσης FRP.

Πίνακας 3.23: Οδηγίες για την επίτευξη της απαιτούμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, American Bureau of Shipping 2006

	<i>Service Conditions</i>	<i>Guidelines</i>
Internal charge generating mechanisms	Piping that contains fluids with conductivities greater than 1000 pS/m	No internal conductivity requirement.
	Piping that may contain fluids with conductivities less than 1000 pS/m	Piping is to have a resistance from inside to outside the pipes of 10^5 ohms per meter or less. Conductive piping and all isolated metal objects of significant size are to be earthed with a maximum resistance to earth of 10^6 ohms.
External charge generating mechanisms	Piping not located in hazardous areas.	No external conductivity requirement.
	Piping located in hazardous areas that may be exposed to weak external charge-generating mechanisms during normal operations	No external conductivity requirement except all isolated metal objects of significant size are to be earthed with a maximum resistance to earth of 10^8 ohms.
	Piping located in hazardous areas that may be exposed to moderate external charge-generating mechanisms	Piping is to have a resistance of 10^5 ohms per meter or less. Conductive piping and all isolated metal objects of significant size are to be earthed with a maximum resistance to earth of 10^8 ohms.
	Piping located in hazardous areas that may be exposed to strong external charge-generating mechanisms	Piping is to have a resistance of 10^5 ohms per meter or less. Piping and all isolated metal objects of significant size are to be earthed with a maximum resistance to earth of 10^6 ohms.

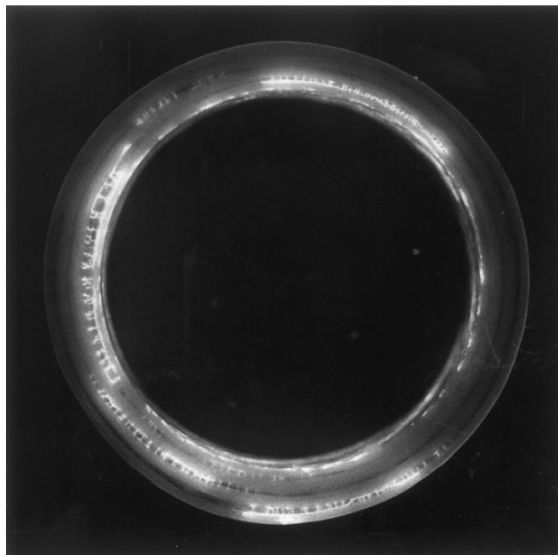
3.2.10 Συμπεριφορά σε κόπωση

Όπως είδαμε στο εδάφιο των τάσεων, η πειραματική μελέτη της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς της FRP σωλήνωσης σε εναλλασσόμενες φορτίσεις (δηλαδή σε κόπωση) είναι μια από τις δύο πειραματικές διαδικασίες που χρησιμοποιείται κατά το πρότυπο ASTM D 2992 για τον προσδιορισμό της επιτρεπτής περιφερειακής τάσης.

Η συμπεριφορά σε κόπωση αφορά τις θαλάσσιες εφαρμογές σωληνώσεων από FRP καθώς οι κυματισμοί αλλά και οι κραδασμοί που προκαλεί η αντλία μπορεί να προκαλέσουν ζημιές όταν η συχνότητά τους πλησιάζει την φυσική συχνότητα συντονισμού της σωλήνωσης (που εξαρτάται από το σύστημα στήριξης και την γεωμετρία της σωλήνωσης, τη θερμοκρασία, τη μάζα και την ακαμψία της σωλήνωσης). Συνήθως αν η σωλήνωση από FRP είναι προστατευμένη από την τριβή στα σημεία στήριξης της, τότε απορροφά με ασφάλεια τους κραδασμούς (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012). Ωστόσο αν είναι αναγκαίο να περιοριστούν οι τάσεις που δημιουργούνται από τους κραδασμούς τότε, είτε αυξάνουμε τον

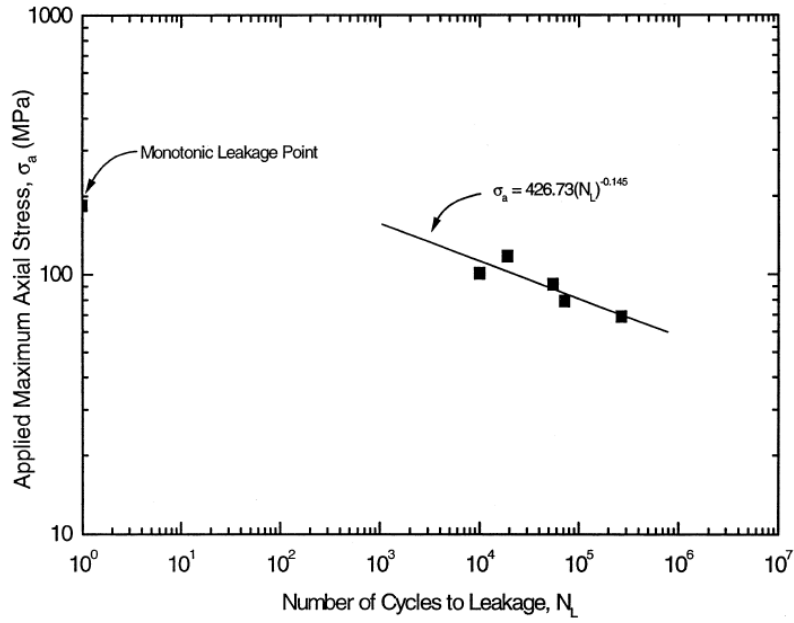
αριθμό των στηρίξεων της σωλήνωσης, είτε ενσωματώνουμε στη σωλήνωση κάποιο μέσο απορρόφησης κραδασμών (αρμοί διαστολής).

Ένα βασικό ζήτημα που έχουν οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν FRP είναι η δυσκολία προσδιορισμού της συμπεριφοράς τους σε κόπωση, δηλαδή ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς τους όταν υποβάλλονται σε εναλλασσόμενα φορτία. Αυτή η δυσκολία οφείλεται στους σύνθετους μηχανισμούς αστοχίας λόγω των ανισοτροπικών χαρακτηριστικών αντοχής και ακαμψίας (Ship Structure Committee 1997). Αντίθετα από την μορφή που παίρνει η αστοχία λόγω κόπωσης στα ισοτροπικά μεταλλικά υλικά (κεντρική ρωγμή που επεκτείνεται), στα FRP υλικά η κόπωση προκαλεί συνολική υποβάθμιση του υλικού και των μηχανικών ιδιοτήτων του που συνδυάζει ρωγμές στην μήτρα, θραύση ινών, αποκόλληση (delamination). Η αστοχία λόγω κόπωσης σε μια FRP σωλήνα είναι λιγότερο καταστροφική από μια χαλύβδινη, γιατί οδηγεί αρχικά σε μικρή διαρροή υγρού από τη σωλήνα (weeping). Στο σχήμα 3.12 φαίνονται οι ρωγμές που παρατηρούνται με υπεριώδης φωτισμό στην μήτρα σωλήνωσης GRE που έχει υποβληθεί σε κόπωση.

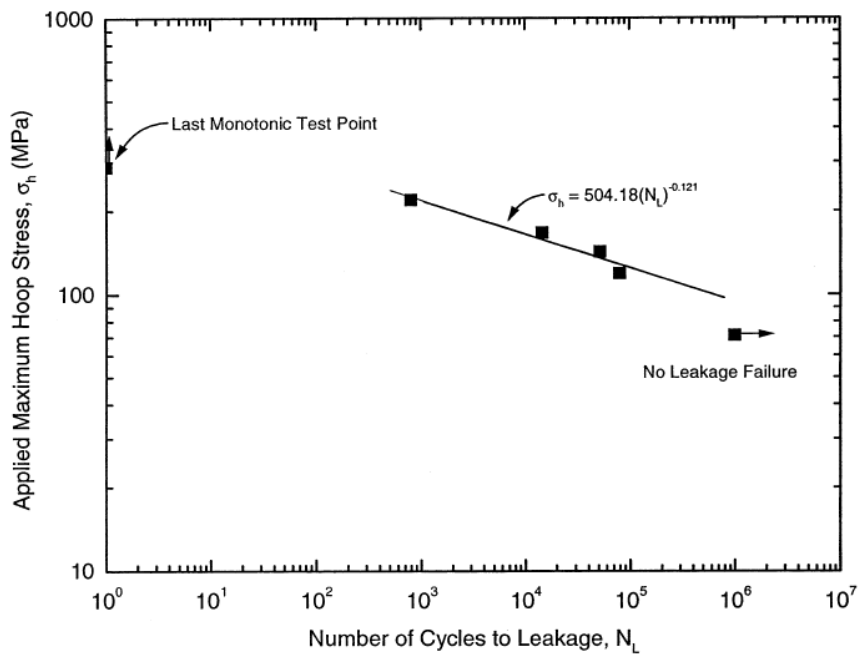


Σχήμα 3.12: Ρωγμές στην μήτρα σωλήνωσης GRE που έχει υποβληθεί σε κόπωση, Ellyin and Martens 2000

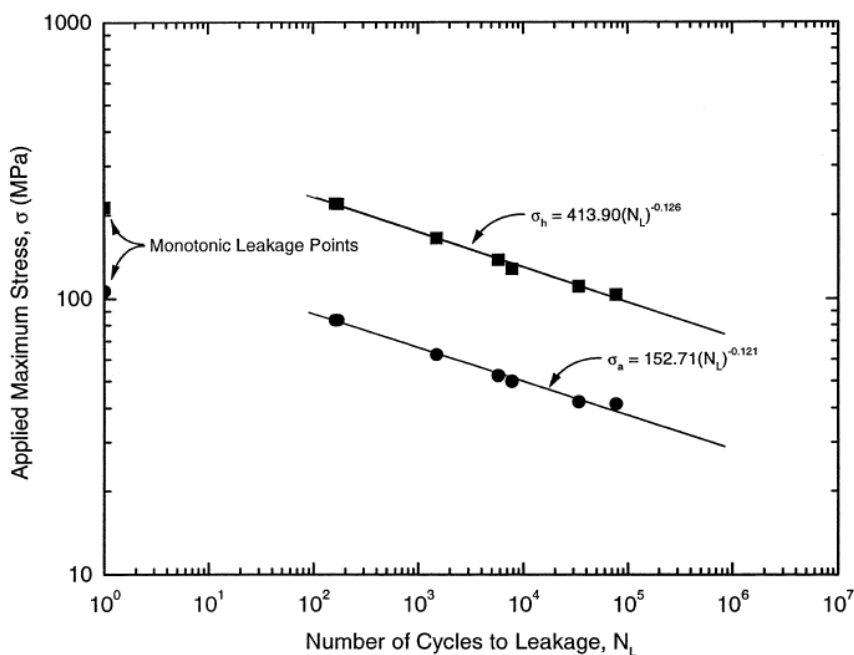
Αν και θεωρείται ότι στην περίπτωση που υπάρχουν υψηλά διαξονικά φορτία στην σωλήνωση τότε οι FRP σωληνώσεις πολυδιευθυντικών στρώσεων (περιφερειακές και αξονικές) έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε κόπωση, εντούτοις είναι ακόμα πιο σύνθετος ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς τους σε κόπωση. Αυτή η δυσκολία οδηγεί και στην διστακτικότητα χρήσης FRP σε σωληνώσεις υψηλών πιέσεων καθώς δεν είναι εξακριβωμένη η μακροπρόθεσμη αξιοπιστία τους (Ellyin and Martens 2000). Οι πειραματικά μετρημένες τάσεις που απαιτούνται ανάλογα με τον αριθμό των κύκλων της φόρτισης μέχρι την εμφάνιση διαρροής (leakage) για σωλήνωση GRE πολυδιευθυντικών στρώσεων από περιέλιξη ινών και για διάφορους συνδυασμούς φορτίσεων φαίνονται στα σχήματα 3.13, 3.14, 3.15.



Σχήμα 3.13: Σχέση μέγιστης αξονικής τάσης και αριθμού κύκλων μέχρι την διαρροή σωλήνωσης GRE, Ellyin and Martens 2000



Σχήμα 3.14: Σχέση μέγιστης περιφερειακής τάσης και αριθμού κύκλων μέχρι την διαρροή σωλήνωσης GRE, Ellyin and Martens 2000

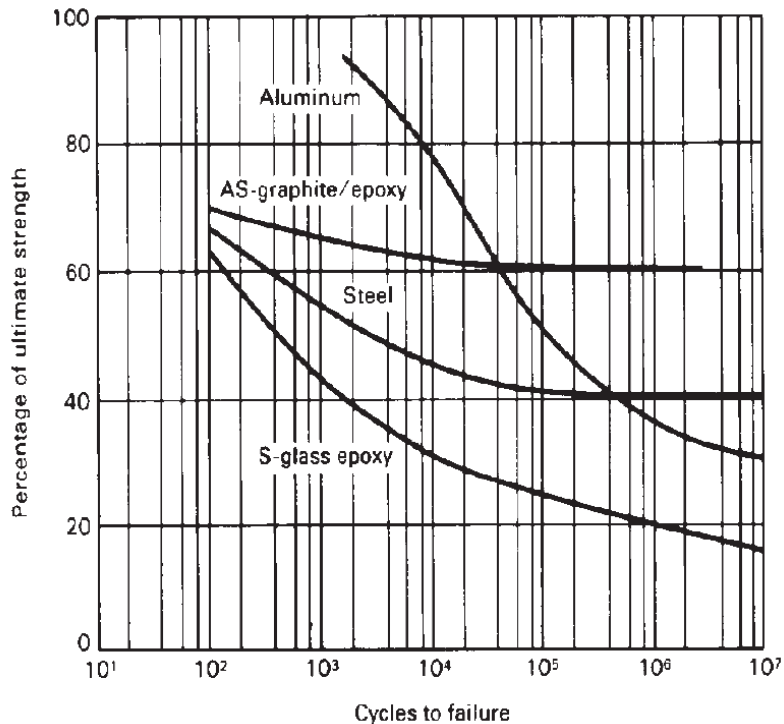


Σχήμα 3.15: Σχέση διαξονικής φόρτισης (2.5H:1A) και αριθμού κύκλων μέχρι την διαρροή σωλήνωσης GRE, Ellyin and Martens 2000

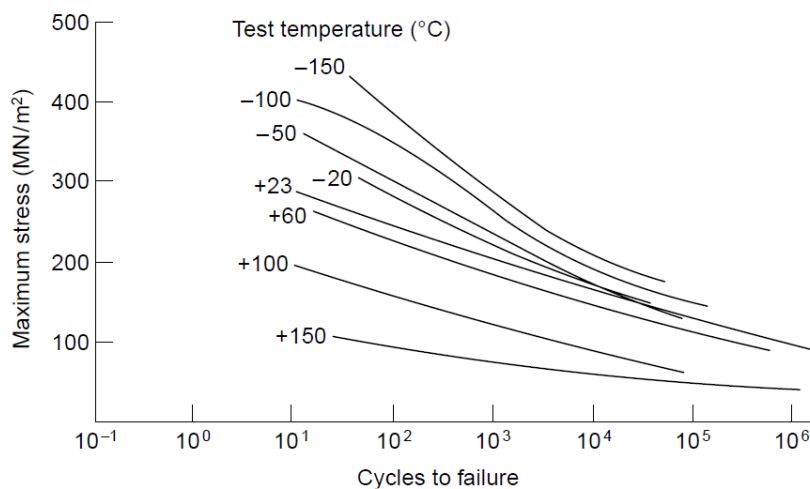
Παρότι συνηθίζεται να υπάρχουν δοκιμές για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή FRP καθώς δεν υπάρχουν ακριβή αναλυτικά εργαλεία προσδιορισμού της συμπεριφοράς τους σε κόπωση, ωστόσο με τα μέχρι τώρα πειραματικά δεδομένα μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι τα FRP υλικά έχουν συγκρίσιμη (ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη) ή και καλύτερη (ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη) συμπεριφορά σε κόπωση από τα συμβατικά μεταλλικά υλικά. Στο σχήμα 3.16 φαίνεται η συμπεριφορά σε κόπωση διαφόρων υλικών σαν σχέση μεταξύ της επιβαλλόμενης τάσης (ως ποσοστό της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό) και του αριθμού των κύκλων μέχρι την αστοχία.

Από τις ίνες γυαλιού, οι S προσδίδουν την καλύτερη αντίσταση σε κόπωση από με τις ίνες γυαλιού E να είναι συγκρίσιμες. Τα FRP με ίνες γυαλιού μπορεί να αστοχήσουν με την συσσώρευση σταδιακών φθορών από κόπωση σε αντίθεση με τα FRP από ίνες άνθρακα που έχουν πρακτικά ανοσία στην κόπωση.

Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά σε κόπωση των FRP υλικών εκτός του υλικού των ενισχυτικών ινών και της μήτρας είναι και η ποιότητα συνεργασίας μεταξύ ινών και μήτρας αλλά και το ποσοστό ενισχυτικών ινών (όσο αυξάνεται βελτιώνεται η αντοχή του FRP στην κόπωση). Επίσης η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των ινών που χρησιμοποιούνται στο FRP υλικό οδηγεί γενικά σε αύξηση της αντίστασης στην κόπωση γιατί λόγω του πιο υψηλού μέτρου ελαστικότητας μειώνεται η παραμόρφωση των ινών μέσα στην μήτρα με αποτέλεσμα να μειώνεται και ο ρυθμός των φθορών που συσσωρεύονται στην μήτρα και στην διεπιφάνεια ινών-μήτρας (SIMS and BROUGHTON 2000). Επίσης καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται η αντίσταση σε κόπωση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.17 όπου για τον ίδιο αριθμό φορτίσεων και μεγαλύτερη θερμοκρασία αντιστοιχεί και μικρότερη τάση θραύσης από κόπωση.



Σχήμα 3.16: Σύγκριση συμπεριφοράς σε κόπωση τυπικών μεταλλικών και FRP υλικών, Ship Structure Committee 1997



Σχήμα 3.17: Η επίδραση της θερμοκρασίας στην συμπεριφορά σε κόπωση FRP υλικού εποξικής ρητίνης και ινών γυαλιού, SIMS and BROUGHTON 2000

3.2.11 Υδραυλικό πλήγμα και σπηλαίωση

Υδραυλικό πλήγμα

Το υδραυλικό πλήγμα (water hammer) είναι ένα κύμα πίεσης που δημιουργείται όταν ένα κινούμενο υγρό εξαναγκάζεται να σταματήσει ή να αλλάξει διεύθυνση απότομα. Σε ένα σύστημα σωληνώσεων προκαλείται συνήθως από το απότομο κλείσιμο μιας βαλβίδας που δημιουργεί ένα κύμα πίεσης (σχήμα 3.18). Το φαινόμενο αυτό είναι εύκολα αναγνωρίσιμο από

τον ήχο που μοιάζει με χτυπήματα σφυριού στην σωλήνωση. Το κύμα πίεσης μπορεί να είναι πενταπλάσιο της πίεσης λειτουργίας και μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες τάσεις και διαστολή που δημιουργούν σημαντικές φθορές και αστοχίες κυρίως στις ενώσεις των σωληνώσεων FRP. Η πίεση λόγω υδραυλικού πλήγματος υπολογίζεται από την σχέση 3.26 όπως αναφέρεται σε AMIANTIT:

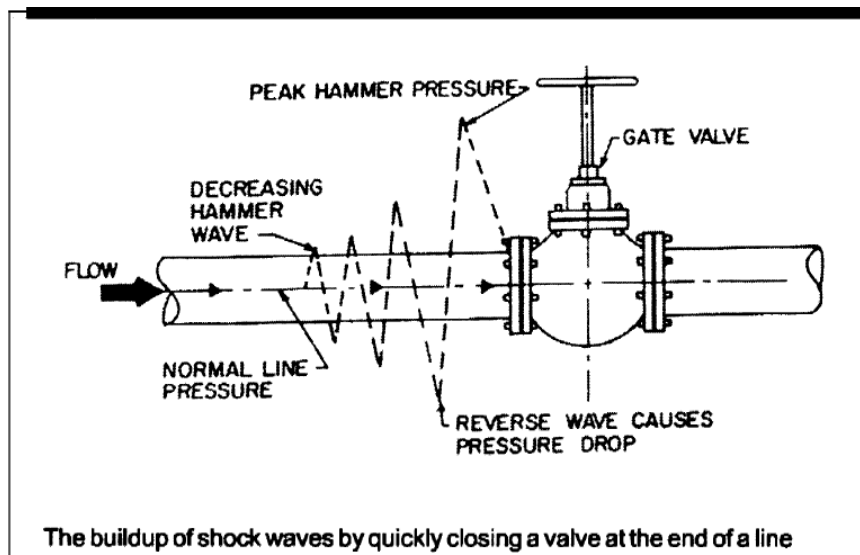
$$P_s = a * sg * \Delta V \quad (3.26)$$

Όπου P_s πίεση λόγω υδραυλικού πλήγματος σε kPa, a είναι η ταχύτητα του κύματος πίεσης σε m/s, sg είναι το ειδικό βάρος του υγρού, ΔV η αλλαγή στην ταχύτητα του υγρού σε m/s. Όπου η ταχύτητα του κύματος πίεσης a υπολογίζεται από την σχέση 3.27:

$$a = 1 / [(\rho/g * (1/(k*10^9) + d/(t*Ec*10^9))]^{0.5} \quad (3.27)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του υγρού σε kg/m^3 , g η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 , k το μέτρο συμπίεσότητας του υγρού (bulk modulus of compressibility) σε GPa, d η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε mm, t το ελάχιστο ενισχυμένο πάχος της σωλήνωσης σε mm, Ec είναι το περιφερειακό μέτρο ελαστικότητας της σωλήνωσης.

Το μέγεθος του κύματος πίεσης και των φθορών είναι συνάρτηση της ταχύτητας και των ιδιοτήτων του υγρού και του μέτρου ελαστικότητας της σωλήνωσης. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να περιοριστεί με την μείωση της παροχής στην σωλήνωση, με χαμηλές ταχύτητες υγρού (<1.5 m/s), με βαλβίδες που κλείνουν και ανοίγουν πιο αργά, με χρήση θαλάμων πίεσης και αρμών διαστολής.



Σχήμα 3.18: Η δημιουργία κυμάτων πίεσης από το κλείσιμο βαλβίδας σωλήνωσης, (Lewandowski and Britt, 2004)

Σπηλαιώση

Η σπηλαιώση σωλήνωσης προκαλείται από μια πτώση πίεσης που οφείλεται σε αύξηση της ταχύτητας του υγρού που δημιουργεί κάποιο εξάρτημα της σωλήνωσης (συνήθως κάποια βαλβίδα ελέγχου). Η σπηλαιώση είναι η φθορά που προκαλεί η έκρηξη φυσαλίδων ατμού λόγω της απότομης πτώσης πίεσης, αυτός ο μηχανισμός μπορεί σε μια σωλήνωση FRP να φθείρει το εσωτερικό αντιδιαβρωτικό στρώμα και σταδιακά και τις επόμενες στρώσεις. Το φαινόμενο αυτό είναι αναγνωρίσιμο από τον ήχο που μοιάζει με χτυπήματα χαλκιού στην σωλήνωση. Το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται με την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους (είναι συνηθισμένο λάθος η επιλογή μικρής βαλβίδας σε σχέση με την διάμετρο της σωλήνωσης για εξοικονόμηση χρημάτων) και τύπου βαλβίδας (προτιμώνται οι βαλβίδες πύλης αντί για τις βαλβίδες πεταλούδας), με μια μικρή ροή αέρα αντίθετη στην ροή του ρευστού σε σημεία στο εσωτερικό της σωλήνωσης.

3.2.12 Απορρόφηση υγρασίας και περιβαλλοντική υποβάθμιση

Απορρόφηση υγρασίας

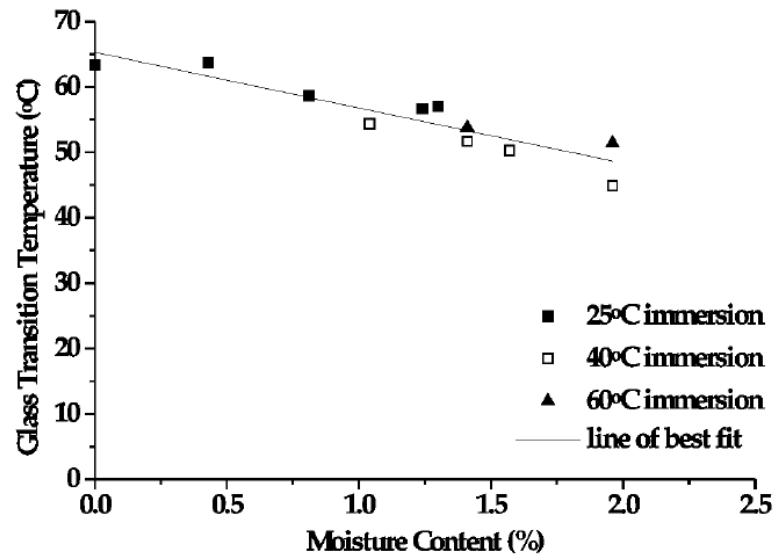
Η απορρόφηση υγρασίας καθώς και μια σειρά άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων (υπεριώδης ακτινοβολία) μπορούν να προκαλέσουν μακροπρόθεσμη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων μια σωλήνωσης από FRP. Ο ρυθμός απορρόφησης υγρασίας θεωρείται συνάρτηση του χρόνου εμβάπτισης, της θερμοκρασίας, του υλικού της μήτρας και των φορτίσεων. Την μεγαλύτερη αντίσταση στην απορρόφηση υγρασίας την εμφανίζουν οι εποξικές ρητίνες (ακολουθούμενες από τις βυνιλεστερικές και τις πολυεστερικές) και οι ίνες άνθρακα και γυαλιού (Ship Structure Committee 1997). Τα FRP υλικά με ίνες γυαλιού και απορροφούν μικρή (περίπου 0.3 έως 1.5% του βάρους τους) αλλά δυνητικά επικίνδυνη ποσότητα υγρασίας (SIMS and BROUGHTON 2000).

Ο μηχανισμός απορρόφησης υγρασίας των FRP υλικών διαφέρει αρκετά ανάλογα με το είδος της μήτρας και αλλάζει με την φυσική γήρανση του υλικού. Παρότι η απορρόφηση υγρασίας ξεκινάει αυτόματα στην επιφάνεια των FRP υλικών, εντούτοις η ροή της υγρασίας προς το εσωτερικό του υλικού θα είναι αργή και χρειάζονται αρκετοί μήνες για να απορροφήσει το υλικό σημαντική ποσότητα.

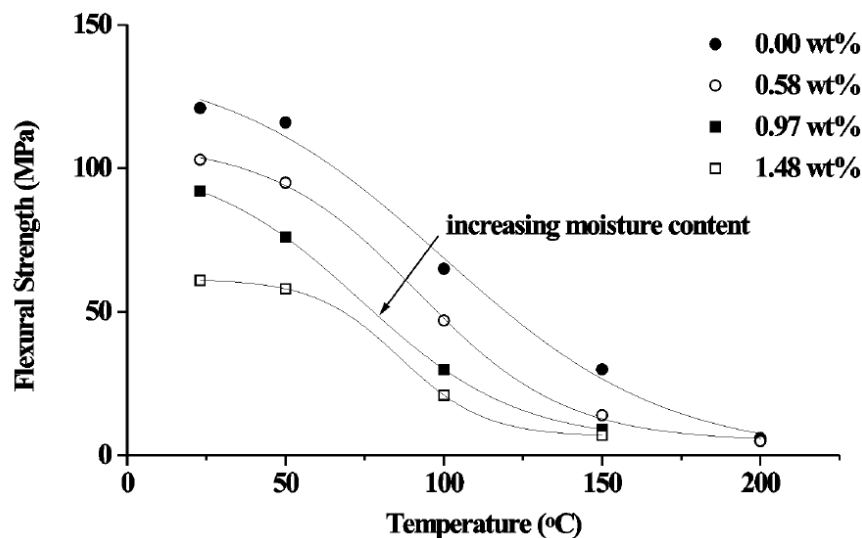
Τα δεδομένα που υπάρχουν από τις δοκιμές FRP υλικών για την αντίσταση στην απορρόφηση υγρασίας και τις επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες δείχνουν ότι καθώς το ποσοστό της απορροφούμενης υγρασίας αυξάνεται τότε μειώνονται οι μηχανικές ιδιότητες. Η μείωση της αντοχής σωλήνωσης FRP με ίνες γυαλιού λόγω θαλασσινού νερού κυμαίνεται από 15% για εποξική μέχρι 30% για πολυεστερική ρητίνη (GIBSON 2003). Η πιο επικίνδυνη μείωση αντοχής αφορά την αντίσταση στην κρούση. Επίσης η επιβολή φορτίσεων αλλά και η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την απορρόφηση υγρασίας και άρα και την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του FRP υλικού.

Η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του FRP υλικού πιο συγκεκριμένα είναι ότι μειώνονται οι μηχανικές ιδιότητες της μήτρας και της διεπιφάνειας ινών-μήτρας, μειώνεται η

Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) που αποτελεί δείκτη της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας (σχήμα 3.19), υπάρχει χημική υποβάθμιση των ινών γυαλιού. Άλλες παρενέργειες της απορρόφησης υγρασίας είναι οι αλλαγές στις διαστάσεις του FRP υλικού λόγω του διόγκωσης που παρατηρείται. Η επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας που έχει απορροφήσει ένα FRP υλικό (εποξικής ρητίνης και ινών γυαλιού) στην μείωση της καμπτικής αντοχής φαίνεται στον σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.19: Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ανάλογα την απορρόφηση υγρασίας πολυεστερικής ρητίνης, SIMS and BROUGHTON 2000

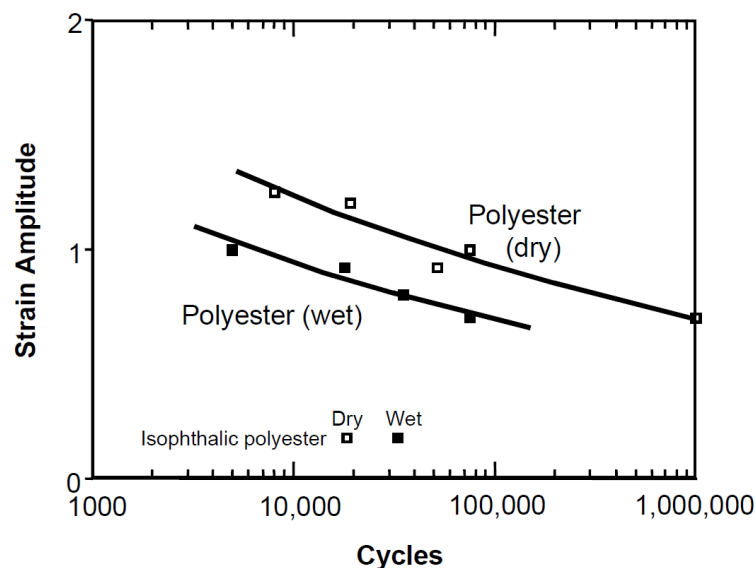


Σχήμα 3.20: Καμπτική αντοχή υλικού εποξικής ρητίνης και ινών γυαλιού ανάλογα με την θερμοκρασία και την απορρόφηση υγρασίας, SIMS and BROUGHTON 2000

Άλλα πειραματικά δεδομένα που αφορούν την επίδραση της απορρόφησης υγρασίας στις μηχανικές ιδιότητες των FRP υλικών είναι τα εξής:

- Για εμβάπτιση FRP υλικού από πολυεστερική ρητίνη και ίνες γυαλιού E, σε απεσταγμένο νερό επί 5 μήνες και σε θερμοκρασία 60 °C, προέκυψε μια απορρόφηση υγρασίας περίπου 2.5% του βάρους του δοκιμίου που προκάλεσε μια μείωση 50% της διατμητικής του αντοχής (Ship Structure Committee 1997)
- Για εμβάπτιση FRP υλικού από εποξική ρητίνη, σε θαλασσινό νερό επί 1 χρόνο, προκύπτει μείωση της καμπτικής αντοχής κατά 10 με 15% (SIMS and BROUGHTON 2000)
- Για εμβάπτιση FRP υλικού από εποξική ρητίνη και ίνες άνθρακα, προκύπτει ότι απορρόφηση υγρασίας 1% του βάρους του δοκιμίου προκαλεί μικρή υποβάθμιση στην αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ απορρόφηση υγρασίας 2% του βάρους του δοκιμίου προκαλεί μείωση 20% της αντοχής σε εφελκυσμό (Ship Structure Committee 1997)

Όπως είναι εμφανές η απορρόφηση υγρασίας επηρεάζει και την συμπεριφορά σε κόπωση και ερπυσμό των FRP υλικών με την πιο αρνητική επίπτωση να εντοπίζεται στα FRP με πολυεστερικές ρητίνες (σχήμα 3.21). Για να αποφευχθεί η υποβάθμιση των ιών χρησιμοποιούνται προστατευτικές στρώσεις πλούσιες σε ρητίνη όπως έχουμε αναφέρει ήδη και για την εσωτερική επιφάνεια των σωληνώσεων FRP. Οι συνέπειες της απορρόφησης υγρασίας είναι αντιστρεπτές σε περίπτωση ξήρανσης του FRP υλικού.



Σχήμα 3.21: Επίδραση της απορρόφησης υγρασίας στην συμπεριφορά σε κόπωση πολυεστερικής ρητίνης, GIBSON 2003

Υπεριώδης ακτινοβολία

Η έκθεση σωληνώσεων από FRP στο φως του ήλιου μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους, λόγω της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα τα FRP υλικά που αποτελούνται από εποξικές ρητίνες εμφανίζουν ραγδαία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων μετά από παρατεταμένη έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Όμοια συμπεριφορά έχουν οι βινυλεστερικές ρητίνες στην επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας, με πιο σταδιακή ωστόσο υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων

τους, ενώ οι πολυεστερικές ρητίνες αν και εμφανίζουν επίσης ευαισθησία, εντούτοις έχουν την συγκριτικά καλύτερη συμπεριφορά. Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η εφαρμογή προστατευτικών επικαλύψεων κυρίως από πολυεστερική ρητίνη.

Αντίσταση στη διάβρωση

Τα FRP υλικά γενικά είναι πρακτικά απρόσβλητα από την διάβρωση, έχουν συνεπώς ανώτερη αντίσταση σε διάβρωση από τα μεταλλικά υλικά συνολικά. Συγκεκριμένα FRP με ίνες γυαλιού είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στην δράση του θαλασσινού νερού, των ήπιων οξέων (mild acids), των αλκαλικών διαλυμάτων. Στον πίνακα 3.24 δίνεται μια ποιοτική αξιολόγηση της αντίστασης σε διάβρωση διαφόρων ρητινών και μεταλλικών υλικών για διάφορα χημικά περιβάλλοντα.

Πίνακας 3.24: Αντίσταση στην διάβρωση διαφόρων υλικών (H-High, M-Medium, L-Low), SIMS and BROUGHTON 2000

<i>Resin</i>	<i>Strong acids</i>	<i>Strong alkalis</i>	<i>Hot/Wet</i>	<i>Salt solutions</i>	<i>Strong oxidants</i>	<i>Aliphatic solvents</i>	<i>Aromatic solvents</i>
Epoxies	M	M-H	H	H	L-M	H	H
Furans	H	H	H	H	L-M	H	H
Nylons	L-M	H	L	H	L-M	H	H
Phenolics	H	M	H	H	L-M	H	H
Polyesters	H	M	L	H	H	H	H
Polypropylene	H	H	H	H	M	H	H
Polyimides	M	M	H	H	H	H	H
Polyurethanes	M	M-H	M	M	M	M	M
Vinyl esters	M-H	H	H	H	H	H	H
Mild steel	L	H	L	L	L	H	H
Stainless steel	L	H	H	L	L	H	H
Aluminum	L	L	H	L	L	H	H

3.2.13 Ερπυσμός

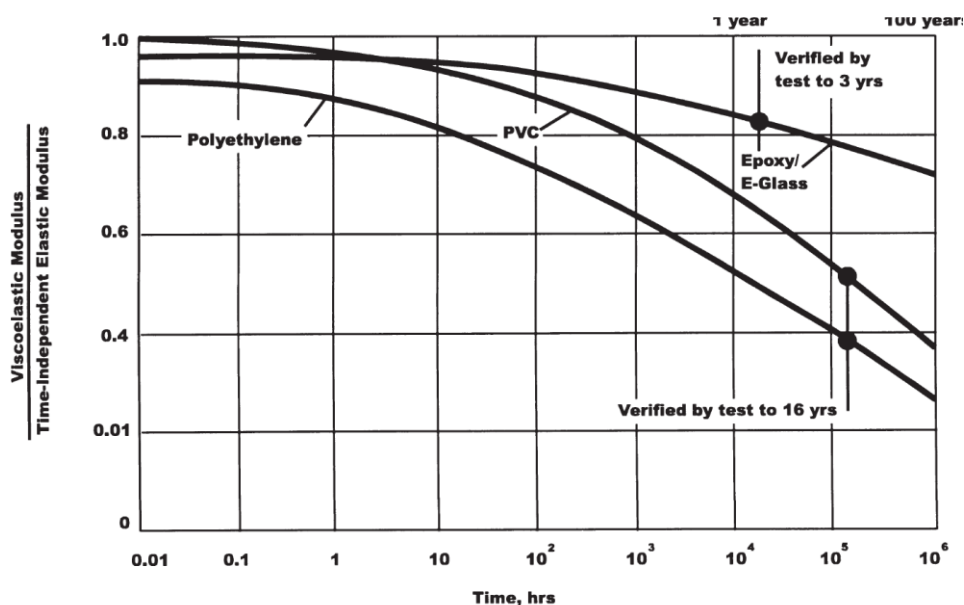
Οι σωληνώσεις όπως και άλλες μηχανολογικές εφαρμογές ενός πλοίου ή μιας θαλάσσιας κατασκευής δέχονται μακροχρόνιες σταθερές φορτίσεις που σταδιακά αυξάνουν την παραμόρφωσή τους και μειώνονται οι μηχανικές ιδιότητες τους και η τάση θραύσης τους (ερπυσμός). Ο ερπυσμός μας ενδιαφέρει στην σχεδίαση των σωληνώσεων FRP λόγω του μικρού μέτρου ακαμψίας τους καθώς απαιτείται να γνωρίζουμε την αναμενόμενη παραμόρφωση όταν υπολογίζουμε το σύστημα αγκυρώσεων της σωλήνωσης ή όταν επιλέγουμε μηχανικές συζεύξεις που απορροφάνε ένα μέρος της παραμόρφωσης των σωληνώσεων FRP.

Όπως αναφέρεται σε Τσούβαλη (1998) ο ερπυσμός των πολύστρωτων από FRP με θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι κυρίως ιξωδοελαστικός, δηλαδή το FRP εμφανίζει μια υβριδική συμπεριφορά: για φορτία μεσαίου μεγέθους δεν υπάρχουν παραμένουσες παραμορφώσεις όταν αυτά σταματήσουν να ασκούνται (ελαστική παραμόρφωση), ενώ για μεγαλύτερα φορτία υπάρχουν παραμένουσες τάσεις ακόμα και όταν αυτά σταματήσουν να

ασκούνται (ανελαστική παραμόρφωση). Στο σχήμα 3.22 φαίνεται η μείωση του μέτρου ιξωδοελαστικότητας που αποτελεί και μέτρο του ερπυσμού για διάφορα σύνθετα υλικά.

Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας των ενισχυτικών ινών του FRP τόσο μικρότερη είναι η επίδραση του ερπυσμού στο υλικό. Επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας και η απορρόφηση υγρασίας οδηγεί σε μείωση των επιδόσεων των FRP σε ερπυσμό. Οι εποξικές, πολυεστερικές και φαινολικές ρητίνες έχουν παραπλήσια συμπεριφορά σε ερπυσμό και οι όποιες διαφορές μεταξύ τους προκύπτουν αν ο ερπυσμός συνδυαστεί με αύξηση θερμοκρασίας ή «επιθετικό» περιβάλλον. Η αντίσταση στον ερπυσμό είναι μικρότερη όταν οι φορτίσεις δεν είναι παράλληλες στην διεύθυνση των ινών και όταν είναι θλιπτικές ή διατμητικές (SIMS and BROUGHTON 2000).

Όπως προαναφέραμε στο κεφάλαιο 2, οι ίνες γυαλιού υφίστανται μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό λόγω ερπυσμού, σε αντίθεση με τις ίνες άνθρακα που δεν υφίστανται μείωση στις μηχανικές τους ιδιότητες.



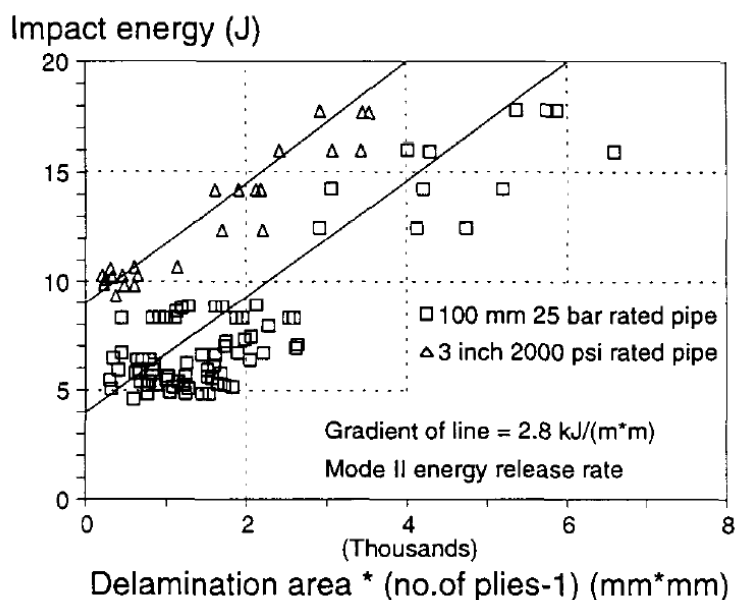
Σχήμα 3.22: Μείωση του μέτρου ιξωδοελαστικότητας με τον χρόνο φόρτισης, Ship Structure Committee 1997

3.2.14 Αντίσταση στην Κρούση

Οι σωληνώσεις από FRP θα πρέπει να έχουν μια ορισμένη αντίσταση σε κρούση καθώς θα πρέπει να αντέχουν ατυχήματα από τον χειρισμό τους κατά την εγκατάσταση ή κατά την λειτουργία τους και να διατηρούν ικανοποιητική τάση θραύσης ακόμα και μετά την μείωση της λόγω κρούσης. Ωστόσο όπως αναφέρεται σε Perillo & Vedivik & Echtermeyer (2014), η επίδραση της κρούσης στις σωληνώσεις FRP εποξικής ρητίνης και ινών γυαλιού δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοήσιμη και προβλέψιμη. Μια γενική σύγκριση των υλικών που χρησιμοποιούνται στα FRP αναφορικά με την συμπεριφορά τους σε κρούση είναι όπως αναφέρεται σε Ship Structure Committee 1997:

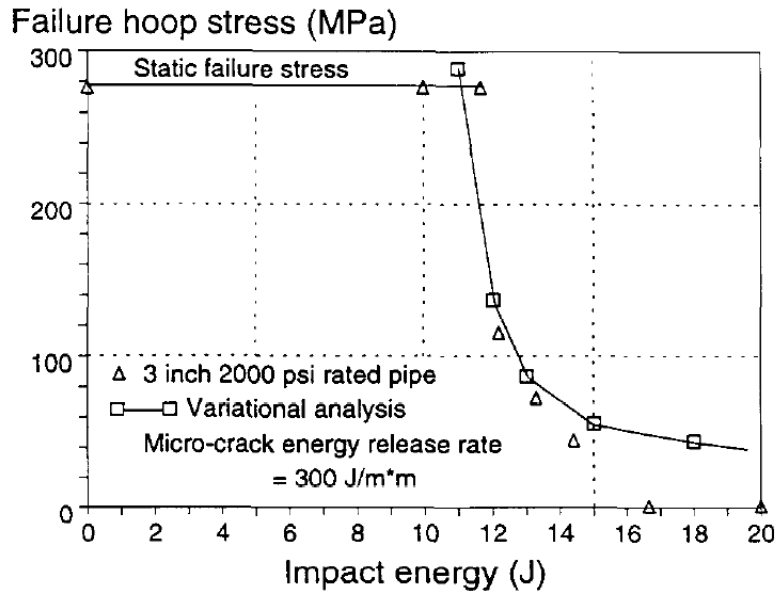
- Οι ενισχυτικές ίνες Kevlar και γυαλιού S έχουν καλύτερη αντοχή σε κρούση από τις ίνες άνθρακα και γυαλιού E
- Οι βινυλεστερικές ρητίνες έχουν καλύτερη αντοχή σε κρούση από τις εποξικές και τις πολυεστερικές

Ο βασικός μηχανισμός αστοχίας από κρούση είναι η αποκόλληση μεταξύ στρώσεων (ply delamination) που προκαλείται από την περιστροφή των στρώσεων λόγω της κρούσης στο τοίχωμα της σωλήνωσης. Αυτός ο μηχανισμός ξεκινά όταν το κρουστικό φορτίο υπερβαίνει την ικανότητα του FRP για απορρόφηση του διαμέσου ελαστικής παραμόρφωσης και ολοκληρώνεται ως αστοχία όταν το κρουστικό φορτίο υπερβεί την δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης. Η σχέση μεταξύ του μεγέθους της περιοχής αποκόλλησης και της ενέργειας της κρούσης που την προκαλεί μετρήθηκε πειραματικά για μια σωλήνωση FRP (ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη) για γωνία περιέλιξης 55 μοιρών και φαίνεται στο σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Σχέση μεταξύ του μεγέθους της περιοχής αποκόλλησης και της ενέργειας της κρούσης για σωλήνωσης GRE, Frost and Cervenka 1994

Η αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων που προξενεί η κρούση προφανώς συμβαίνει και για κρουστικά φορτία μικρότερα από αυτά που προκαλούν αστοχία. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να μην συμβαίνει αστοχία της σωλήνωσης, ωστόσο μειώνεται σημαντικά η περιφερειακή τάση θραύσης της (σχήμα 3.24). Η αποκόλληση των στρώσεων και η μείωση της περιφερειακής τάσης θραύσης λειτουργούν συσσωρευτικά με κάθε νέο κρουστικό φορτίο. Επίσης όπως έχουμε προαναφέρει η απορρόφηση υγρασίας μειώνει την αντίσταση στην κρούση. Ο συνδυασμός απορρόφησης υγρασίας και κρούσης μειώνει την τάση θραύσης μιας σωλήνωσης FRP όπως φαίνεται και από τον πίνακα 3.25 που συνοψίζει τα πειραματικά αποτελέσματα για σωλήνωση FRP εποξικής ρητίνης και ινών γυαλιού που έχει παραχθεί με περιέλιξη ινών σε γωνία 55 μοιρών.



Σχήμα 3.24: Σχέση περιφερειακής τάσης θραύσης σωλήνωσης GRE και ενέργεια κρούσης, Frost and Cervenka 1994

Πίνακας 3.25: Επίδραση της απορρόφησης υγρασίας και της κρούσης στην τάση θραύσης FRP σωλήνωσης, Hawa, Majid, Afendi, Marzuki, Amin, Mat, Gibson 2016

Ageing time (h)	Impact energy (J)	Max. burst pressure (MPa)	Axial stress (MPa)	Hoop stress (MPa)	Strain (%)	Failure type
0 (unaged)	5	10.50	113.80	227.60	0.32	Weepage
	7.5	6.57	75.78	151.55	0.18	Weepage
	10	6.04	69.92	139.84	0.17	Weepage-eruption
500	5	7.93	90.71	181.42	0.24	Weepage
	7.5	5.54	65.11	130.22	0.16	Weepage-eruption
	10	3.95	45.78	91.57	0.14	Eruption
1000	5	4.75	55.57	111.14	0.11	Weepage
	7.5	3.59	41.12	82.24	0.10	Weepage-eruption
	10	3.27	37.91	75.81	0.06	Eruption
1500	5	4.28	49.49	98.98	0.06	Weepage-eruption
	7.5	3.28	37.73	75.45	0.05	Eruption
	10	2.42	28.07	56.15	0.03	Eruption

3.2 Στηρίξεις σε σωλήνωση FRP

Οι μηχανικοί πρέπει κατά την σχεδίαση σωληνώσεων FRP να εξετάζουν αναλυτικά αν το σύστημα σωλήνωσης βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων τάσεων ακόμα και στις πιο δυσμενείς αναμενόμενες καταστάσεις λειτουργίας και να επιλέγουν το αντίστοιχο σύστημα στηρίξεων, αγκυρώσεων και οδηγών για να το διασφαλίζουν. Ο καθορισμός του συστήματος στηρίξεων μιας σωλήνωσης είναι ο παράγοντας εκείνος που διασφαλίζει μια μεγάλη διάρκεια ζωής συνολικά για την σωλήνωση καθώς αποτρέπει την εμφάνιση μη αποδεκτών αξονικών και καμπτικών φορτίων. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει κατά την σχεδίαση σωληνώσεων FRP θεωρούμε πλήρως στηριγμένο δίκτυο σωλήνωσης, δηλαδή θεωρούμε ένα σύστημα στηρίξεων

με αγκυρωμένη στήριξη στην αρχή και το τέλος κάθε ευθείας διαδρομής της σωλήνωσης. Το πλήρως στηριγμένο σύστημα σωλήνωσης είναι πιο άκαμπτο και έχει καλύτερη συμπεριφορά στις δυναμικές φορτίσεις.

Οι αγκυρωμένες στηρίξεις δεν επιτρέπουν καθόλου κίνηση και υποδιαιρούν την σωλήνωση σε επιμέρους συστήματα για τα οποία γίνονται οι υπολογισμοί διαστολής, βοηθάνε έτσι στον περιορισμό και τον έλεγχο των αξονικών τάσεων και της διαστολής των σωληνώσεων. Επίσης οι αγκυρωμένες στηρίξεις εξαλείφουν την ανάγκη για αρμούς διαστολής. Σε περιπτώσεις μεγάλων ευθείων διαδρομών σωλήνωσης, τότε οι αγκυρώσεις θα πρέπει να τοποθετούνται κάθε 45 έως 60 m. Η δύναμη σύσφιξης της σωλήνωσης FRP από την αγκύρωση θα πρέπει όπως προαναφέραμε να υπολογίζεται να είναι τόση ώστε η αναπτυσσόμενη τάση να μην προκαλεί φθορά ή αστοχία στην σωλήνωση.

Ενδιάμεσα των αγκυρωμένων στηρίξεων είναι απαραίτητη η ύπαρξη στηρίξεων και οδηγών (guides) για την αποτροπή υπερβολικής κάμψης των σωληνώσεων (λόγω βάρους σωληνώσεως και υγρού), αυτές οι στηρίξεις επιτρέπουν μόνο την αξονική κίνηση των σωληνώσεων. Όπως αναφέρεται και σε Composites & Metal Products, στις FRP σωληνώσεις μια καμπτική τάση θεωρείται αποδεκτή όταν το βέλος κάμψης που δημιουργεί μεταξύ δύο στηρίξεων είναι μικρότερο από 12.7 mm.

Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις των στηρίξεων σε σωληνώσεις από FRP έχουν αρκετά κοινά με τις αντίστοιχες απαιτήσεις των στηρίξεων για χαλύβδινες σωληνώσεις, όπως η απαίτηση να παρέχεται αρκετή απόσταση μεταξύ των στηρίξεων για να είναι δυνατός ο καθαρισμός βιδών και παξιμαδιών. Ωστόσο λόγω των μεγάλων διαφορών μεταξύ των δύο υλικών στο βάρος, στο αξονικό μέτρο ελαστικότητας και στον συντελεστή θερμικής διαστολής υπάρχουν και σημαντικές διαφορές. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για τον υπολογισμό της απόστασης των στηρίξεων FRP σωλήνωσης υπολογίζεται η συνολική τάση της σωλήνωσης (που περιλαμβάνει και την τάση λόγω της εσωτερικής πίεσης). Στη συνέχεια παρουσιάζονται στο σχήμα 3.25, βασικά είδη στηρίξεων σωλήνωσης FRP.

Fig. 13.1
SUPPORT

Size	L
2" - 10"	12"

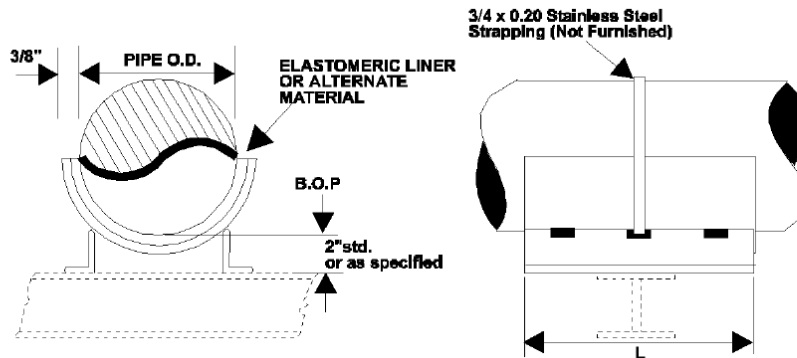


Fig. 13.2
SUPPORT

Size	L
6" - 20"	12"
24"	16"
30" - 36"	20"

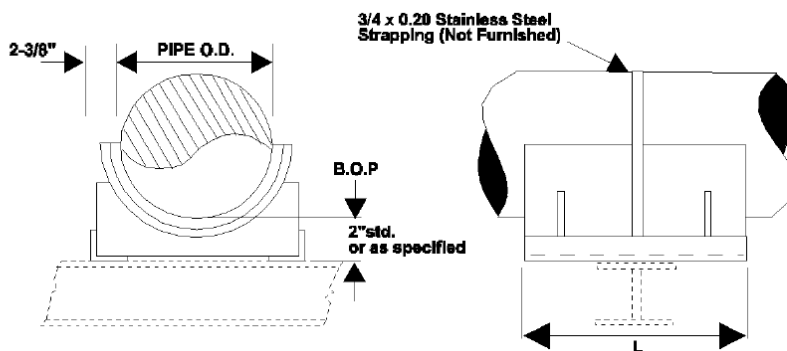
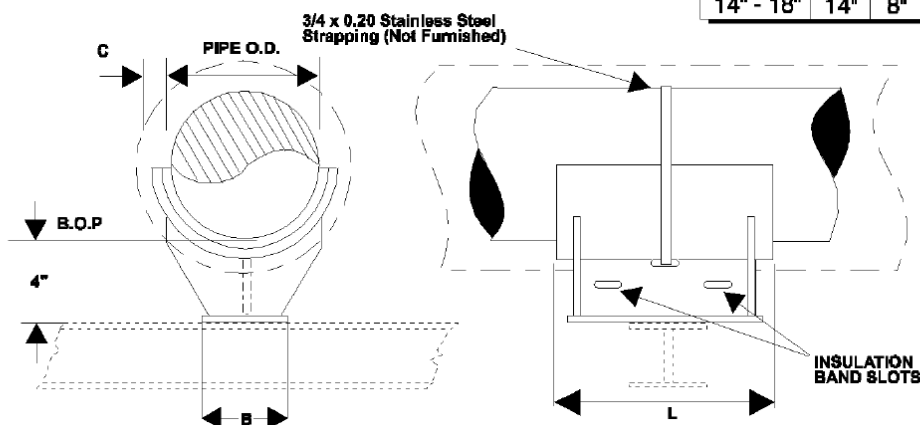
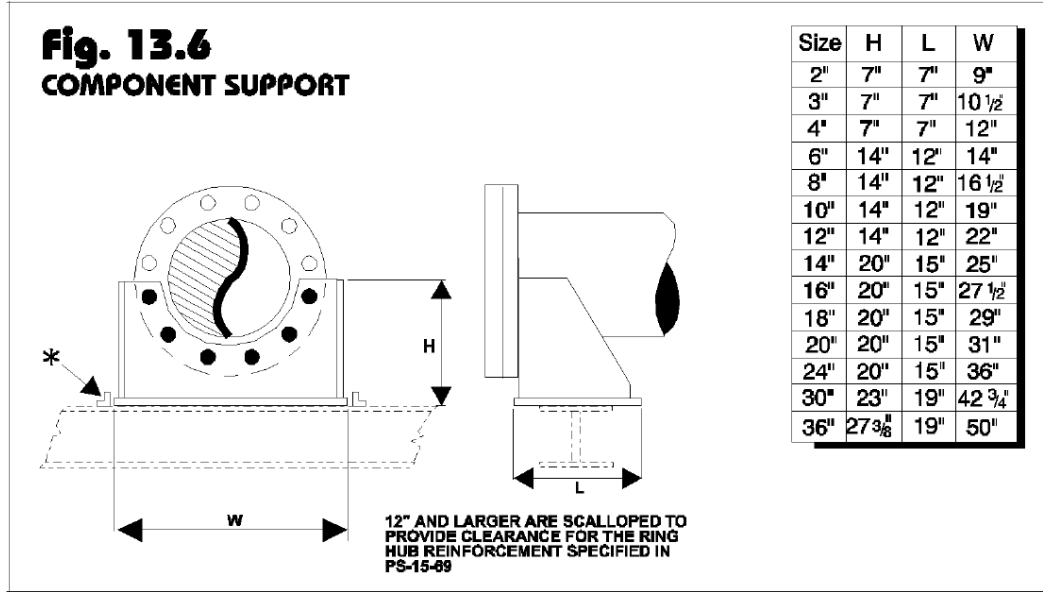
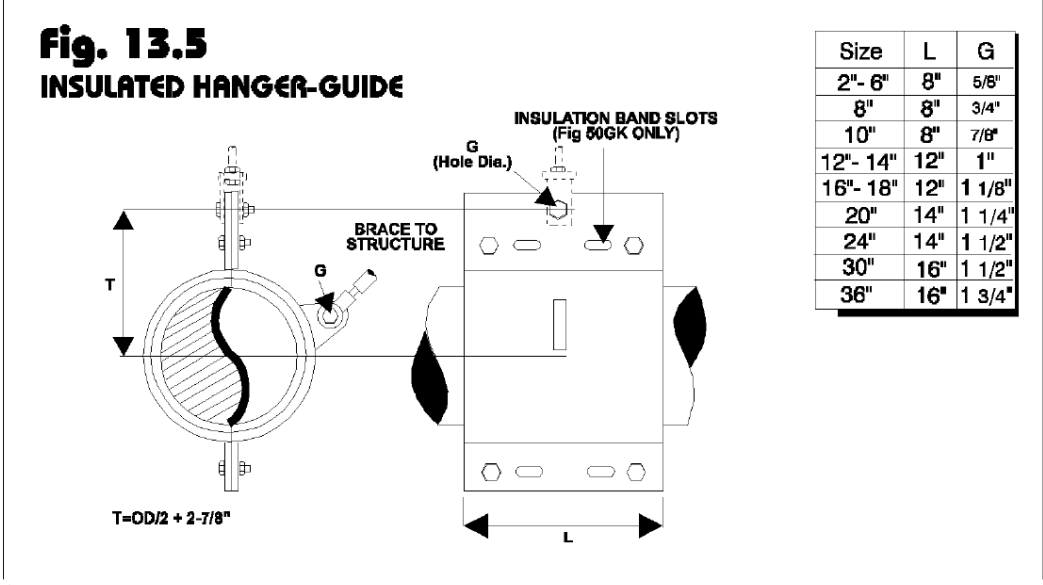
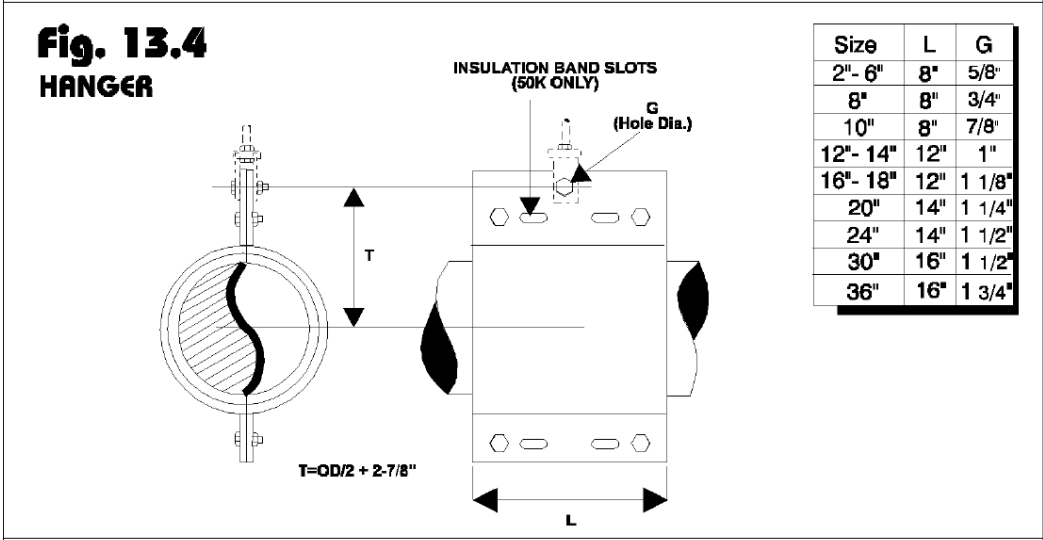


Fig. 13.3
INSULATED SUPPORT

Size	L	B	C
2" - 4"	8"	4"	5/16"
6" - 12"	12"	6"	3/8"
14" - 18"	14"	8"	5/8"

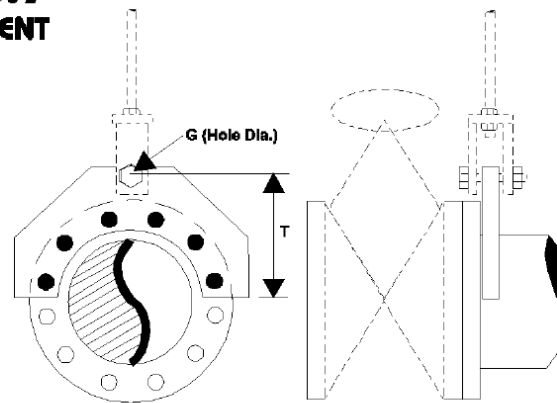


Σχήμα 3.25: Διάφορα είδη στηρίξεων σωληνώσεων FRP, Britt and Britt, 1993



Σχήμα 3.25 συνέχεια: Διάφορα είδη στηρίξεων σωληνώσεων FRP, Britt and Britt, 1993

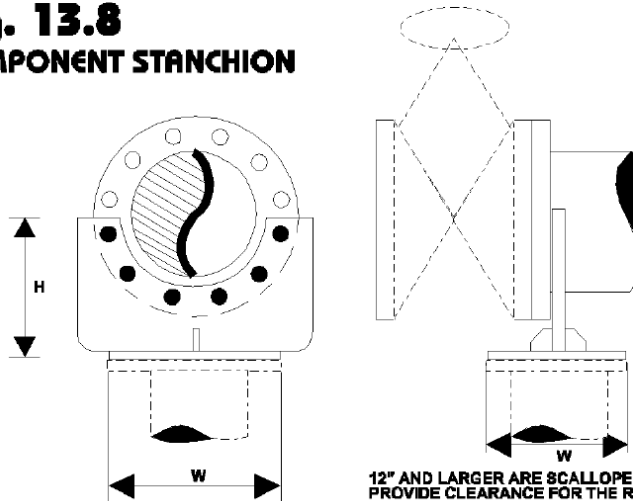
Fig. 13.7
COMPONENT
HANGER



Size	T	G
2"	4"	5/8"
3"	5 1/2"	5/8"
4"	6 1/2"	5/8"
6"	7 1/2"	5/8"
8"	8 7/8"	3/4"
10"	10 1/8"	7/8"
12"	11 3/4"	1"
14"	12 7/8"	1"
16"	14 5/8"	1 1/8"
18"	15 3/8"	1 1/8"
20"	16 3/4"	1 1/8"
24"	19"	1 1/2"

12" AND LARGER ARE SCALLOPED TO PROVIDE CLEARANCE FOR THE RING HUB REINFORCEMENT SPECIFIED IN PS-15-69

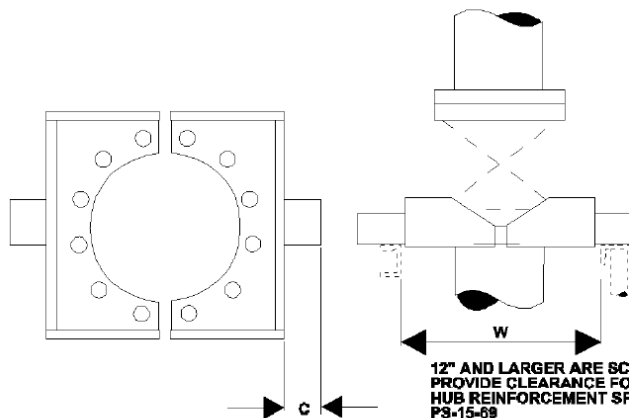
Fig. 13.8
COMPONENT STANCHION



Size	H	W
2"	7 1/2"	8"
3"	7 1/2"	8"
4"	7 1/2"	8"
6"	14 1/2"	10"
8"	14 1/2"	10"
10"	14 1/2"	10"
12"	14 5/8"	12"
14"	20 5/8"	12"
16"	20 3/4"	15"
18"	20 3/4"	15"
20"	20 3/4"	15"
24"	20 3/4"	15"

12" AND LARGER ARE SCALLOPED TO PROVIDE CLEARANCE FOR THE RING HUB REINFORCEMENT SPECIFIED IN PS-15-69

Fig. 13.9
COMPONENT SUPPORT

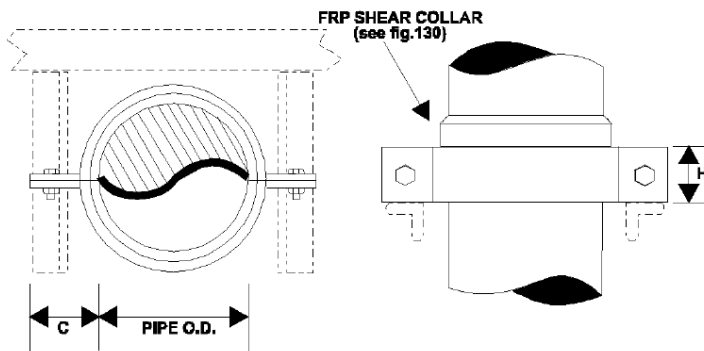


Size	C	W
2"	4"	13"
3"	4"	13"
4"	4"	14 1/2"
6"	4"	16 1/2"
8"	6"	21"
10"	6"	23"
12"	6"	26"
14"	6"	28"
16"	6"	31"
18"	6"	33"
20"	6"	35"
24"	6"	40"

12" AND LARGER ARE SCALLOPED TO PROVIDE CLEARANCE FOR THE RING HUB REINFORCEMENT SPECIFIED IN PS-15-69

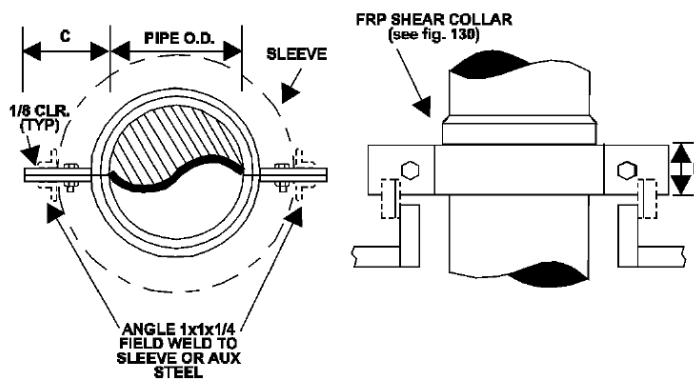
Σχήμα 3.25 συνέχεια: Διάφορα είδη στηρίξεων σωληνώσεων FRP, Britt and Britt, 1993

Fig. 13.10
RISER SUPPORT



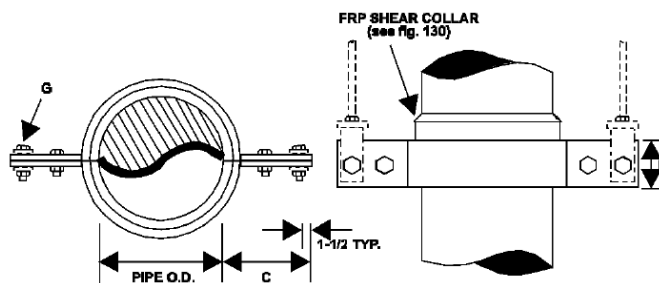
Size	H	C
2"	2"	2 5/16"
3"	2"	2 5/16"
4"	3"	2 5/16"
6"	3"	2 5/16"
8"	3"	2 3/8"
10"	3"	2 1/2"
12"	3"	2 1/2"
14"	4"	2 5/8"
16"	5"	2 5/8"
18"	6"	2 5/8"
20"	6"	2 5/8"
24"	6"	2 3/4"
30"	6"	2 7/8"
36"	8"	3"

Fig. 13.11
RISER GUIDE



Size	H	C
2"	3"	6 5/16"
3"	3"	6 5/16"
4"	3"	6 5/16"
6"	3"	6 3/8"
8"	3"	6 3/8"
10"	3"	6 3/8"
12"	3"	6 3/8"
14"	3"	6 5/8"
16"	3"	6 5/8"
18"	4"	6 5/8"
20"	4"	6 5/8"
24"	4"	6 5/8"
30"	6"	6 5/8"
36"	6"	6 5/8"

Fig. 13.12
RISER HANGER



Size	H	C	G
2"	3"	6 5/16"	9/16"
3"	3"	6 5/16"	9/16"
4"	3"	6 5/16"	9/16"
6"	3"	6 3/8"	9/16"
8"	3"	6 1/2"	11/16"
10"	4"	6 1/2"	11/16"
12"	5"	6 1/2"	13/16"
14"	6"	6 5/8"	13/16"
16"	6"	6 3/4"	1"
18"	6"	6 3/4"	1"
20"	6"	6 3/4"	1"
24"	6"	7"	1 1/4"
30"	6"	7"	1 1/4"
36"	8"	7"	1 3/8"

Σχήμα 3.25 συνέχεια: Διάφορα είδη στηρίξεων σωληνώσεων FRP, Britt and Britt, 1993

Fig. 13.13
GUIDE

Size	L
2"-4"	12"

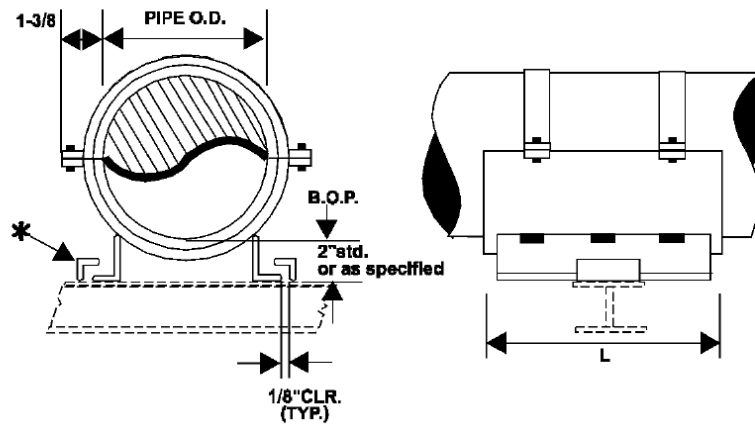


Fig. 13.14
GUIDE

Size	L	C
6"-12"	12"	2 3/8"
14"-20"	14"	2 5/8"
24"	16"	2 5/8"
30"-36"	20"	2 5/8"

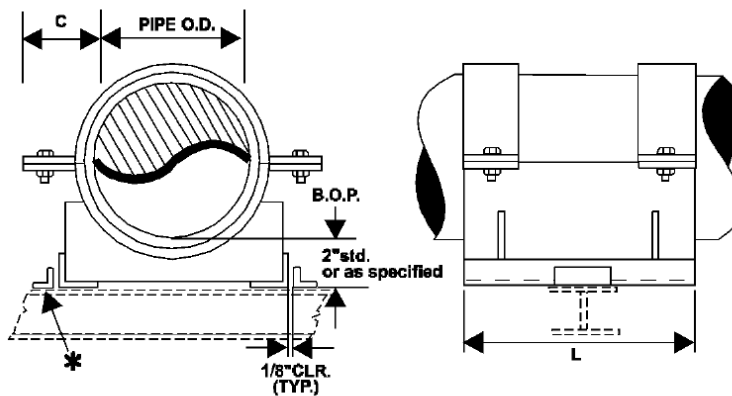
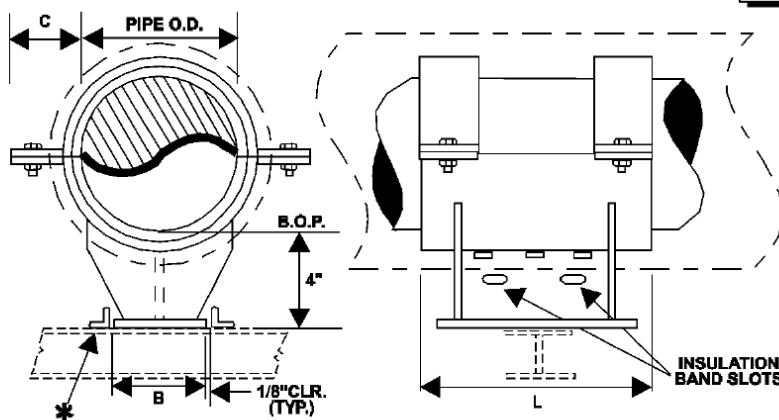


Fig. 13.15
INSULATED PIPE GUIDE

Size	L	B	C
2"-4"	12"	4"	2 5/16"
6"-12"	12"	6"	2 3/8"
14"-18"	12"	8"	2 5/8"



Σχήμα 3.25 συνέχεια: Διάφορα είδη στηρίξεων σωληνώσεων FRP, Britt and Britt, 1993

Fig. 13.16
ANCHOR

Size	L	C
2"- 4"	6"	1 5/8"

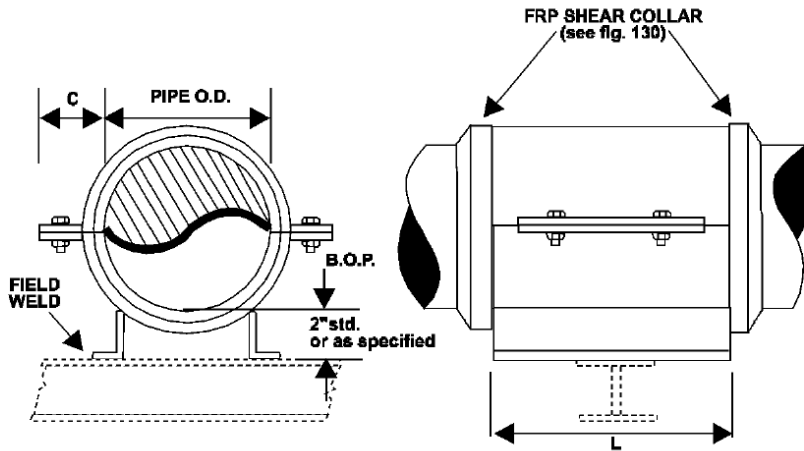


Fig. 13.17
ANCHOR

Size	L	C
6"- 12"	12"	2 3/8"
14"- 20"	14"	2 5/8"
24"	16"	2 5/8"
30"- 36"	20"	2 5/8"

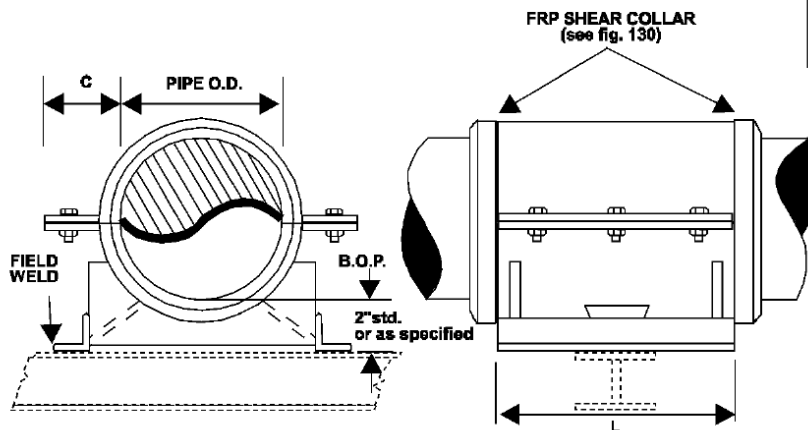
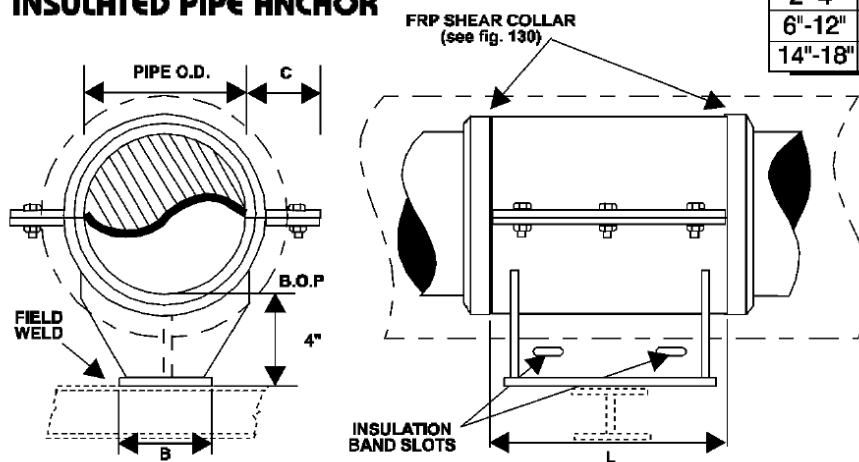
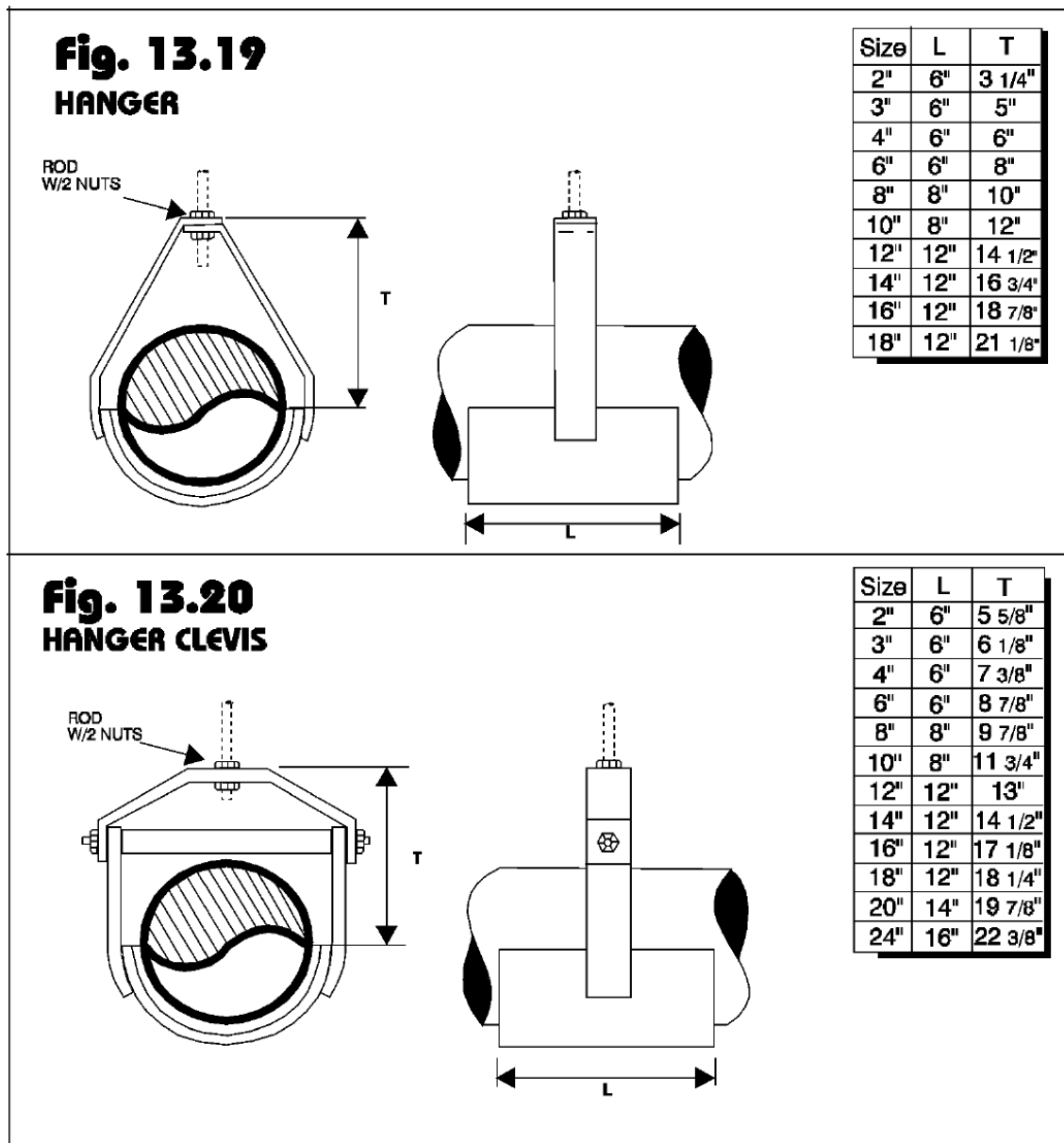


Fig. 13.18
INSULATED PIPE ANCHOR

Size	L	B	C
2"-4"	8"	4"	2 5/16"
6"-12"	12"	6"	2 3/8"
14"-18"	12"	8"	2 5/8"



Σχήμα 3.25 συνέχεια: Διάφορα είδη στηρίξεων σωληνώσεων FRP, Britt and Britt, 1993



Σχήμα 3.25 συνέχεια: Διάφορα είδη στηρίξεων σωληνώσεων FRP, Britt and Britt, 1993

Η σχεδίαση στηρίξεων σωληνώσεων από FRP για να εξασφαλίσει αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής θα πρέπει να πετύχει τα εξής:

1. Την προστασία από απόξεση λόγω τριβής (abrasion protection) στα σημεία επαφής της σωλήνωσης με τους οδηγούς (guides) και γενικά τις στηρίξεις της σωλήνωσης.

Ειδικά όσον αφορά τις σωληνώσεις πλοίων από FRP θα πρέπει να δίνεται μεγαλύτερη προσοχή κατά την σχεδίαση στα σημεία επαφής που υπάρχει ταυτόχρονα και σημαντική διαστολή λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής ή σωληνώσεις όπου μεγάλο μήκος τους βρίσκεται στο ανώτατο κατάστρωμα ή σε διαδρόμους (passageways) που επηρεάζονται πολύ από τις δυναμικές καταπονήσεις του πλοίου (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012). Η προστασία που απαιτείται σε αυτές τις περιπτώσεις επιτυγχάνεται με την χρήση ειδικών υλικών

στην διεπιφάνεια μεταξύ στηρίξεων και σωλήνωσης που αποτρέπουν την απόξεση λόγω τριβής, κάποια από αυτά τα υλικά απεικονίζονται στον πίνακα 3.26.

Πίνακας 3.26: Υλικά για προστασία από την εξωτερική απόξεση, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012

Material	Thickness		Maximum Temperature	
	(in.)	(mm)	(°F)	(°C)
Silicone Rubber R-765 Class 2, 600 Durometer or equal	1/8	3.2	450	232
Synthetic Rubber Sheet (Mil-R-6855, Class 2) 60 Durometer or equal	1/8	3.2	180	82
Fluorocarbon Elastomer (Viton, Fluorel)	1/8	3.2	650	343
Teflon (Fluorocarbon Resin)	1/4	6.0	750	399

2.Βασικές απαιτήσεις για την απόσταση μεταξύ των στηρίξεων οριζόντιας σωλήνωσης

Οι αποστάσεις μεταξύ των στηρίξεων σωλήνωσης FRP είναι συνάρτηση της επιτρεπτής τάσης και του επιτρεπτού βέλους κάμψης (12.7 mm). Οι προτεινόμενες αποστάσεις μεταξύ των στηρίξεων για οριζόντια συστήματα σωληνώσεων FRP Bondstrand (ινών γυαλιού και εποξικής ρητίνης) για θαλάσσιες εφαρμογές (χωρίς βαλβίδες και κατάκόρυφες διαδρομές) σε διάφορες διαμέτρους και θερμοκρασίες λειτουργίας δίνονται στον πίνακα 3.27.

Όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012), ο υπολογισμός για την απόσταση των στηρίξεων σωλήνωσης (partially continuous spans) με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο και επιτρεπτό βέλος κάμψης 12.7 mm, γίνεται με τις εξής σχέσεις:

$$L = 0.258 * (EI / w)^{1/4} \quad (3.28)$$

ή σε μονάδες SI:

$$L = 0.124 * (EI / w)^{1/4} \quad (3.29)$$

Όπου L είναι το μήκος μεταξύ των στηρίξεων της σωλήνωσης σε ft ή m, EI είναι η ακαμψία δοκού σε lb/in² ή kg/cm², w είναι το συνολικό ομοιόμορφα κατανεμημένο βάρος της σωλήνωσης σε lb/in ή kg/m.

Συνήθως οι σωληνώσεις φέρουν και άλλο βάρος (όπως οι μονώσεις) πέρα από ίδιο τους το βάρος και το νερό που μεταφέρουν, συνεπώς η παραπάνω σχέση ενσωματώνει στο βάρος (w) τέτοιου τύπου πρόσθετα βάρη.

Πίνακας 3.27: Προτεινόμενες αποστάσεις μεταξύ των στηρίξεων οριζόντιας σωλήνωσης FRP, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

Nominal Diameter (in) (mm)	Uniform Load		Partially Continuous Spans				For Mechanical Joints				
	Pipe lb/in. kg/m	Fluid lb/in. kg/m	@100°F(38°C)		@150°F(66°C)		@100°F(38°C)		@150°F(66°C)		
			ft	m	ft	m	ft	m	ft	m	
2	50	0.07	1.2	0.13	2.2	11.8	3.6	11.2	3.4	9.5	2.9
3	80	0.10	1.9	0.20	5.3	13.6	4.1	12.8	3.9	10.9	3.3
4	100	0.17	3.0	0.48	8.7	15.4	4.7	14.6	4.4	12.4	3.8
6	150	0.26	1.6	1.1	20.	17.5	5.3	16.5	5.0	14.0	4.3
8	200	0.43	7.8	1.9	34.	20.0	6.1	18.9	5.8	16.0	4.9
10	250	0.68	12.	3.0	54.	22.4	6.8	21.2	6.5	18.0	5.5
12	300	0.95	17.	4.3	77.	24.4	7.4	23.0	7.0	19.5	6.0
14	350	1.1	20.	5.1	89.	25.	7.7	24.	7.2	20.	6.1
16	400	1.4	25.	6.8	117.	27.	8.2	25.	7.7	20.	6.1
18	450	1.7	32.	8.3	148.	29.	8.7	27.	8.3	20.	6.1
20	500	2.2	39.	10.2	182.	30.	9.2	28.	8.7	20.	6.1
24	600	3.1	56.	14.7	263.	33.	10.	31.	9.5	20.	6.1
28	700	4.2	75.	20.0	358.	33.	10.	33.	9.5	20.	6.1
30	750	1.8	86.	23.0	411.	33.	10.	33.	10.	20.	6.1
36	900	6.9	123.	33.1	591.	33.	10.	33.	10.	20.	6.1

Είναι βασική αρχή σχεδίασης των στηρίξεων που απορρέει από την παραπάνω σχέση, ότι όταν αυξάνεται το συνολικό βάρος της σωλήνωσης τότε μειώνεται η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων και αντίστροφα όταν μειώνεται το συνολικό βάρος της σωλήνωσης τότε αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων.

Μπορούμε να ελέγξουμε αν χρειάζεται διόρθωση το μήκος μεταξύ των στηρίξεων μιας σωλήνας συνδυάζοντας τις παρακάτω εξισώσεις (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012) :

$$L = \pi * (I / (C_t * \Delta T * A))^{1/2} \quad (3.30)$$

$$y = \frac{-w*L}{2*K*P} * (\tan \frac{K*L}{4} - \frac{K*L}{4}) \quad (3.31)$$

$$K = (P/E_L)^{1/2} \quad (3.32)$$

$$P = C_t * \Delta T * A * E \quad (3.33)$$

Όπου L είναι το μήκος μεταξύ των στηρίξεων της σωλήνας σε in ή cm, I η ροπή αδράνειας της σωλήνωσης σε in⁴ ή cm⁴, C_t ο συντελεστής θερμικής διαστολής (in/in/F ή m/m/C), A η μέση επιφάνεια διατομής του πάχους τοιχώματος της σωλήνωσης (in² η cm²), ΔT η διαφορά θερμοκρασίας (F ή C), P το φορτίο από τα σημεία στήριξης σε lb ή kg), w είναι το οριζόντιο ομοιόμορφα κατανεμημένο βάρος της σωλήνωσης σε lb/in ή kg/cm, E_L το αξονικό μέτρο ελαστικότητας σε χαμηλότερη θερμοκρασία (psi ή kg/cm²), y το βέλος κάμψης.

Η σχέση 3.30 μας δίνει το μέγιστο μήκος μεταξύ των στηρίξεων που η σωλήνωση θεωρείται σταθερή. Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε αυτό το μήκος στην εξίσωση 3.31 για να ελέγξουμε αν το βέλος κάμψης υπερβαίνει το επιτρεπτό όριο των 12.7 mm. Η προσέγγιση του επιτρεπτού μήκους μεταξύ των στηρίξεων γίνεται με διαδοχικές επαναλήψεις ώστε να μην ξεπερνάμε το επιτρεπτό βέλος κάμψης.

Βασικές απαιτήσεις για την απόσταση μεταξύ των στηρίξεων κατακόρυφης σωλήνωσης FRP για θαλάσσιες εφαρμογές

Αν η διάταξη των χώρων από τις οποίες διέρχεται το εξεταζόμενο σύστημα σωληνώσεων έχει επαρκή χώρο τότε ακολουθούμε τις εξής γενικές κατευθύνσεις για την στήριξη των κατακόρυφων διαδρομών σωλήνωσης FRP Bondstrand για θαλάσσιες εφαρμογές:

- κάθε 3 m κατακόρυφης σωλήνωσης εγκαθιστούμε μια στήριξη, για κάθετες διαδρομές μικρότερες από 3 m δεν χρειάζεται στήριξη
- αν η κατακόρυφη διαδρομή στηρίζεται στην βάση της σωλήνωσης τότε χρησιμοποιούμε στο σημείο στήριξης ένα χαλαρό κολάρο σαν οδηγό που να εξασφαλίζει την απαραίτητη ευστάθεια
- για αλλαγές μήκους στην κατακόρυφη διαδρομή της σωλήνωσης προτιμάται στην σχεδίαση αυτή να απορροφάται από την ελεύθερη κίνηση των εξαρτημάτων στα άκρα της κάθετης διαδρομής. Συγκεκριμένα για κάθε 3mm αλλαγής μήκους στην κατακόρυφη διαδρομή της σωλήνωσης πρέπει να υπάρχουν 62cm οριζόντιας σωλήνωσης μεταξύ της γωνίας και της πρώτης στήριξης. Στην περίπτωση που αυτές οι προβλέψεις δεν μπορεί να υλοποιηθούν λόγω ανεπαρκούς περιβάλλοντα χώρου τότε: αγκυρώνουμε την κατακόρυφη διαδρομή πάνω στην σωλήνωση ώστε να μην επιτρέπεται η κίνηση και είτε χρησιμοποιούμε ενδιάμεσα της κάθετης διαδρομής μηχανική σύζευξη για να απορροφηθεί η αλλαγή μήκους, είτε χρησιμοποιούμε στηρίξεις που απέχουν αποστάσεις που ενδεικτικά δίνονται στον πίνακα 3.28.

Βασικές απαιτήσεις για την απόσταση μεταξύ των στηρίξεων σωλήνωσης FRP με μηχανικές συζεύξεις που επιτρέπουν αξονική κίνηση

Οι παρακάτω σχέσεις για την απόσταση των στηρίξεων αφορούν σωληνώσεις Bondstrand για θαλάσσιες εφαρμογές με μηχανικές συζεύξεις που επιτρέπουν αξονική κίνηση (Viking Johnson, Rockwell, Dresser, Straub-flex).

$$L = 0.207 * (EI / w)^{1/4} \quad (3.34)$$

ή σε μονάδες SI:

$$L = 0.0995 * (EI / w)^{1/4} \quad (3.35)$$

Όπου L είναι το μήκος μεταξύ των στηρίξεων της σωλήνας σε ft ή m, EI είναι η ακαμψία δοκού σε lb/in² ή kg/cm², w είναι το συνολικό ομοιόμορφα κατανεμημένο βάρος της σωλήνωσης σε lb/in ή kg/m.

Πίνακας 3.28: Προτεινόμενες αποστάσεις μεταξύ των στηρίξεων κατακόρυφης σωλήνωσης για διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012

Nom size in mm		L in meters for Delta T in Deg C											
		10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C	110 °C	120 °C
2	50	3.2	2.3	1.9	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9
3	80	4.8	3.4	2.8	2.4	2.2	2.0	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4
4	100	6.3	4.5	3.7	3.2	2.8	2.6	2.4	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8
6	150	9.5	6.7	5.5	4.7	4.2	3.9	3.6	3.3	3.2	3.0	2.9	2.7
8	200	12.6	8.9	7.3	6.3	5.6	5.1	4.8	4.4	4.2	4.0	3.8	3.6
10	250	16.0	11.3	9.2	8.0	7.2	6.5	6.0	5.7	5.3	5.1	4.8	4.6
12	300	19.1	13.5	11.0	9.6	8.6	7.8	7.2	6.8	6.4	6.1	5.8	5.5
14	350	20.6	14.6	11.9	10.3	9.2	8.4	7.8	7.3	6.9	6.5	6.2	6.0
16	400	23.7	16.7	13.7	11.8	10.6	9.7	8.9	8.4	7.9	7.5	7.1	6.8
18	450	26.7	18.9	15.4	13.4	12.0	10.9	10.1	9.5	8.9	8.5	8.1	7.7
20	500	29.7	21.0	17.1	14.9	13.3	12.1	11.2	10.5	9.9	9.4	9.0	8.6
24	600	35.8	25.3	20.7	17.9	16.0	14.6	13.5	12.7	11.9	11.3	10.8	10.3
28	700	43.5	30.8	25.1	21.8	19.5	17.8	16.5	15.4	14.5	13.8	13.1	12.6
30	750	46.6	33.0	26.9	23.3	20.9	19.0	17.6	16.5	15.5	14.7	14.1	13.5
36	900	56.0	39.6	32.3	28.0	25.0	22.8	21.2	19.8	18.7	17.7	16.9	16.2

3.3 Ένωση τεμαχίων σωλήνωσης FRP

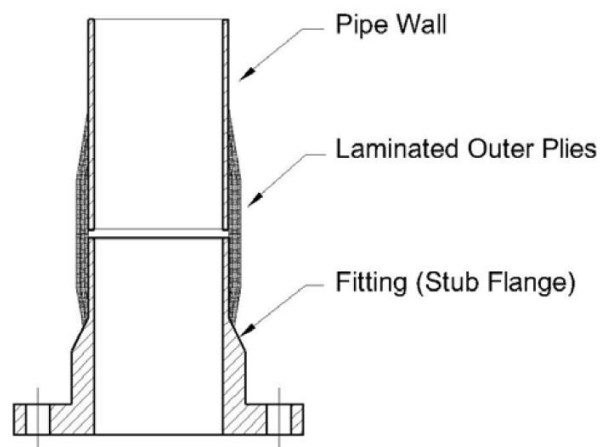
Η μεγαλύτερη δυσκολία στην εγκατάσταση FRP σωληνώσεων θεωρείται ότι είναι στα σημεία σύνδεσης των επιμέρους τεμαχίων (Ship Structure Committee 1990) όπως μεγαλύτερη είναι και η εμφάνιση αστοχιών. Η μέθοδος ένωσης που θα επιλεγεί κατά την σχεδίαση μιας συγκεκριμένης εφαρμογής σωλήνωσης FRP επηρεάζει το κόστος εγκατάστασης και την μακροπρόθεσμη λειτουργικότητα της σωλήνωσης. Οι βασικές μέθοδοι ένωσης FRP σωληνώσεων είναι η κόλληση με κάποιο κολλητικό μέσο (adhesive bonding), ο περιτυλιγμένος σύνδεσμος (butt and wrap), οι μηχανικές συζεύξεις με ελαστομερές σφράγισμα (mechanical coupling with an elastomeric seal) και οι φλάντζες. Η συνήθης σχεδιαστική πρακτική είναι ότι στα πιο κρίσιμα δίκτυα σωληνώσεων FRP χρησιμοποιούνται κυρίως περιτυλιγμένοι σύνδεσμοι και γενικά γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης του αριθμού των φλαντζών.

3.3.1 Περιτυλιγμένος σύνδεσμος (butt and wrap)

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος ένωσης σωληνώσεων FRP γενικά και ειδικά σε περιπτώσεις πολύ διαβρωτικών εφαρμογών είναι ο περιτυλιγμένος σύνδεσμος (butt and wrap) που φαίνεται στο σχήμα 3.26. Αυτή η μέθοδος ένωσης σωληνώσεων FRP είναι η πιο αξιόπιστη, φθηνή ως κόστος υλικών ένωσης και εύκολη για έλεγχο ποιότητας. Ωστόσο απαιτεί εκπαίδευση και κάποια εμπειρία για την επιτυχημένη επί τόπου εφαρμογή της, ενώ είναι και χρονοβόρα κατά την εγκατάσταση. Χρησιμοποιώντας τα ίδια υλικά στο «τύλιγμα» με τον

σωλήνα FRP μπορούμε να θεωρήσουμε κατά την σχεδίαση και να πετύχουμε στην πράξη ότι οι περιτυλιγμένοι σύνδεσμοι θα έχουν ίση ή και ανώτερη αντοχή σε αξονικά και καμπτικά φορτία από την FRP σωληνώση (EDO Specialty Plastics 2001). Ο περιτυλιγμένος σύνδεσμος έχει πάχος και πλάτος που εξαρτάται από τις απαιτήσεις πίεσης και στην πιο απλή μορφή του εφαρμόζεται ως εξής:

- λειαίνονται οι εξωτερικές επιφάνειες στα άκρα των σωληνώσεων που θα περιτυλιχθούν και έρχονται σε επαφή οι υπό ένωση σωληνώσεις
- περιτυλίγονται εξωτερικά τα άκρα των σωληνώσεων με ρητίνη και ενισχυτικές ίνες (συνήθως ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη)
- αυτό το εξωτερικό «τύλιγμα» στη συνέχεια υφίσταται σκλήρυνση (σχήμα 3.27) και συρρικνώνεται προσφέροντας έτσι έναν ισχυρό μηχανικό δεσμό.

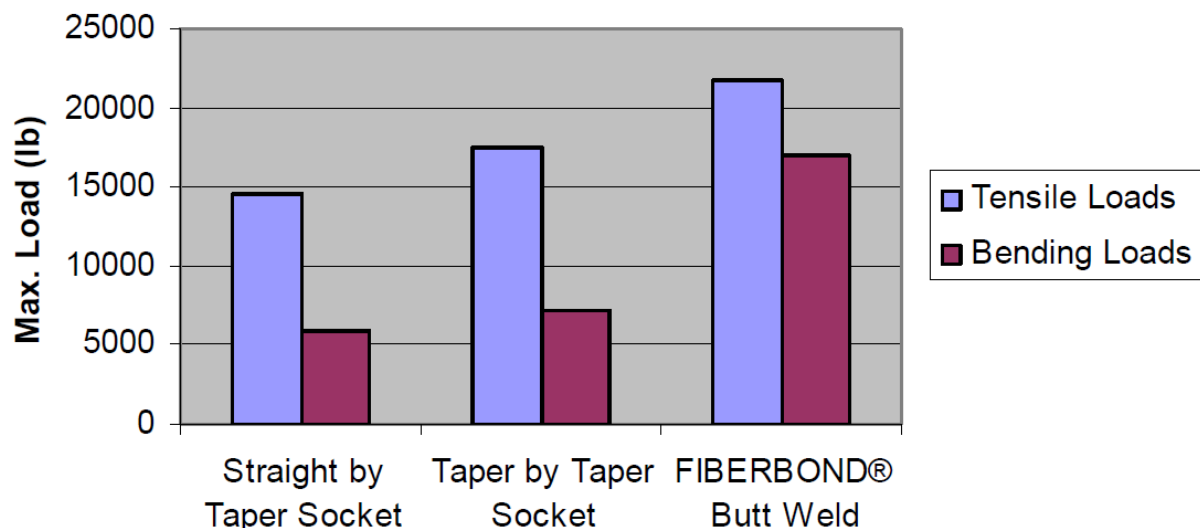


Σχήμα 3.26: Περιτυλιγμένος σύνδεσμος, EDO Specialty Plastics 2001



Σχήμα 3.27: «Κουβέρτα» θέρμανσης (heating blanket) για σκλήρυνση σωληνώσεων FRP, AMERON 2011

Στο σχήμα 3.28 γίνεται μια σύγκριση από δεδομένα πειραμάτων όπως αυτά αναφέρονται σε EDO Specialty Plastics (2001) για την τάση θραύσης σε εφελκυστικά και καμπτικά φορτία περιτυλιγμένων συνδέσμων και ενώσεων με κόλληση. Είναι προφανές από τα σχήματα ότι οι περιτυλιγμένοι σύνδεσμοι έχουν ανώτερη αντοχή σε εφελκυστικά και κυρίως σε καμπτικά φορτία συγκριτικά με τις ενώσεις από κόλληση.



Σχήμα 3.28: Σύγκριση αντοχής περιτυλιγμένων συνδέσμων και ενώσεων από κόλληση σε εφελκυστικά και καμπτικά φορτία, EDO Specialty Plastics 2001

3.3.2 Ένωση με κόλληση (adhesive bonding)

Η σύνδεση FRP σωληνώσεων με κόλληση με κολλητικό μέσο (*adhesive bonding*) χρησιμοποιείται συνήθως για σωληνώσεις μικρών διαμέτρων (συνήθως 152.4 mm διάμετρο) και θεωρείται η πιο εύκολη μέθοδος ένωσης σωληνώσεων κατά την εγκατάσταση. Επίσης έχει μικρότερο εργατικό κόστος κατά την εγκατάσταση συγκριτικά με την μέθοδο περιτυλιγμένου συνδέσμου και προτιμάται όταν οι συνθήκες εγκατάστασης είναι εξαιρετικά αντίξοες (EDO Specialty Plastics 2001). Η σύνδεση που δημιουργείται με την κόλληση είναι μόνιμη και με παραπλήσια τάση θραύσης σε εφελκυσμό με την σωλήνωση, ωστόσο είναι αδύναμη απέναντι σε καμπτικά φορτία και γενικά θεωρείται λιγότερο αξιόπιστη σε σχέση με τον περιτυλιγμένο σύνδεσμο. Η εποξική ρητίνη θεωρείται από τα καλύτερα συγκολλητικά υλικά και όταν τα δύο υπό ένωση τεμάχια σωλήνωσης είναι επίσης από εποξική ρητίνη τότε η σύνδεση είναι εξαιρετική. Συνεπώς στην περίπτωση FRP σωληνώσεων εποξικής ρητίνης και ινών γυαλιού η κόλληση είναι μια καλή επιλογή για ένωση σωληνώσεων και χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές υψηλών πιέσεων. Οι απαιτήσεις για μια καλή κόλληση με εποξική ρητίνη είναι οι υπό ένωση επιφάνειες να είναι καθαρές, να μην έχουν λίπη ή υγρασία και η διεπιφάνεια ένωσης που προκύπτει να έχει πάχος μικρότερο από 0.127 mm. Η διαδικασία κόλλησης αποτελείται από τα εξής στάδια:

- οι επιφάνειες των δύο υπό ένωση τεμαχίων σωλήνωσης και του εξαρτήματος (μούφα) καθαρίζονται και επικαλύπτονται με εποξική ρητίνη

- εφαρμόζεται εξωτερική δύναμη για την συναρμολόγηση των σωληνώσεων με το εξάρτημα (σχήμα 3.29), με την εισδοχή των σωληνώσεων στο εξάρτημα
- ολοκληρώνεται με την σκλήρυνση του κολλητικού μέσου της ένωσης για συγκεκριμένο χρόνο και θερμοκρασία.



Σχήμα 3.29: Εφαρμογή εξωτερικής δύναμης για την συναρμολόγηση σωληνώσεων FRP, AMERON 2011

Τα καλύτερα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου λαμβάνονται όταν οι υπό ένωση σωληνώσεις έχουν μια μικρή αντίστροφη κωνικότητα που επιτρέπει το «κούμπωμα» μεταξύ τους (matching tapered bonding surfaces) που διασφαλίζει και το μικρό πάχος της διεπιφάνειας ένωσης (σχήμα 3.30). Η επιλογή ωστόσο ενώσεων με κόλληση και «κούμπωμα» καθιστά πιο χρονοβόρα την διαδικασία εγκατάστασης των σωληνώσεων FRP. Αυτή η κωνικότητα μπορεί να έχει γίνει κατά την κατασκευή της σωλήνωσης ή κατά την εγκατάστασή της με φορητό εξοπλισμό. Οι περιπτώσεις που τα τεμάχια της ένωσης με κόλληση εμφανίζουν και τα δύο (taper-taper) ή μόνο το ένα (quick-lock) κωνικότητα φαίνονται στο σχήμα 3.30.

Όπως αναφέρεται σε Lewandowski and Britt (2004) η ένωση με κόλληση χρειάζεται κάποια ικανότητα του τεχνίτη που την υλοποιεί καθώς απαιτείται η επίστρωση του κολλητικού μέσου να είναι ομοιόμορφη και ίση στα υπό ένωση τεμάχια και η διασφάλιση ότι η εισδοχή του αρσενικού (spigot) στο θηλυκό (bell ή socket) τεμάχιο είναι ολοκληρωτική. Επίσης υπάρχει απαίτηση η σωλήνωση να είναι σταθερή κατά την διαδικασία σκλήρυνσης γιατί αλλιώς μπορεί να καταστραφεί ο σύνδεσμος. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν υπάρχει τρόπος να ελεγχθεί η ποιότητα της ένωσης εκτός από την διενέργεια υδροστατικού τεστ σε πίεση περίπου 1.5 φορά της πίεσης λειτουργίας. Επίσης θεωρείται ότι σε περίπτωση αστοχίας των ενώσεων με κόλληση κατά το υδροστατικό τεστ είναι αρκετά δαπανηρή η επιδιορθωσή τους (απαιτείται εξάρμωση της σωλήνωσης και επανάληψη της διαδικασίας κόλλησης).



Σχήμα 3.30: Τρόποι σύνδεσης σωληνώσεων FRP, AMERON 2001

3.3.3 Μηχανικές συζεύξεις (mechanical couplings)

Οι μηχανικές συζεύξεις χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές χαμηλών πιέσεων και μειώνουν το κόστος εγκατάστασης των σωληνώσεων FRP (GIBSON 2003). Επίσης λόγω του ότι απορροφούν ένα μέρος της αλλαγής μήκους (που προκαλείται από θερμοκρασιακή μεταβολή ή πίεση) μειώνουν τις τάσεις στις σωληνώσεις FRP. Παρότι η μείωση των τάσεων επιδιώκεται σαν γενική κατεύθυνση σε ένα σύστημα σωληνώσεων καθώς αυξάνει την διάρκεια ζωής του, ωστόσο συνήθως περιορίζονται στο ελάχιστο οι μηχανικές συζεύξεις στις σωληνώσεις FRP γιατί θεωρείται ότι τα εξαρτήματα (μούφες) που προσθέτουν αποτελούν αδύναμα σημεία στην σωλήνωση. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε όπως έχουμε ήδη αναφέρει το πλήρως στηριγμένο σύστημα σωλήνωσης.

Οι μηχανικές συζεύξεις λειτουργούν σαν μηχανικές αρθρώσεις σύνδεσης των τεμαχίων της σωλήνωσης. Το ελαστομερές σφράγισμα (elastomeric seal) που χρησιμοποιείται προσφέρει ευελιξία που μπορεί να απορροφήσει ένα ποσοστό της αξονικής αλλαγής μήκους (συνήθως περίπου 10 mm η κάθε μηχανική σύζευξη) και μικρές γωνιακές παραμορφώσεις και απώλειες ευθυγράμμισης. Αν η αλλαγή μήκους της σωλήνωσης σε ένα πλοίο (λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής, των αξονικών και καμπτικών φορτίων ή των δονήσεων από κάποια αντλία) μπορεί να υπερβεί την δυνατότητα απορρόφησης της μηχανικής σύζευξης, τότε θα πρέπει να παρέχονται επαρκείς στηρίξεις (ειδικά σε σημεία στη σωλήνωση που παράγουν αξονική δύναμη όπως βαλβίδες, γωνίες, διακλαδώσεις, μειωτήρες) ή και να χρησιμοποιηθούν περισσότερες μηχανικές συζεύξεις. Οι μεταλλικές μηχανικές συζεύξεις έχουν εμπειρικά αποδειχτεί αξιόπιστες και οικονομικές λύσεις για την ένωση συστημάτων σωλήνωσης, ωστόσο η βέλτιστη διαδικασία ένωσης σωληνώσεων FRP διαφέρει σε σχέση με την ένωση χαλύβδινων σωληνώσεων. Οι διάφορες μεταλλικές συζεύξεις που κυκλοφορούν στην αγορά (Viking Johnson, Rockwell, Dresser, Straub-flex) θεωρείται ότι έχουν παραπλήσιες απαιτήσεις σχεδίασης και διαδικασίας ένωσης τεμαχίων σωλήνωσης.

Οι μηχανικές συζεύξεις Viking Johnson

Οι μηχανικές συζεύξεις Viking Johnson κατασκευάζονται για διαφορετικά μεγέθη και απαιτήσεις σωληνώσεων και όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.31 αποτελούνται από ένα κυλινδρικό χιτώνιο (cylindrical center sleeve), δύο φλάντζες (end flanges), δύο ελαστομερείς δακτύλιους σφραγίσματος που παραμορφώνονται απορροφώντας την αλλαγή μήκους της σωλήνωσης και βίδες ('D' neck cup-head bolts).

Όσον αφορά τη σχεδίαση μηχανικών συζεύξεων, η μέγιστη πίεση λαμβάνεται από τον τύπο Barlow όπως φαίνεται στην εξίσωση 3.36, όπου θεωρείται μια τάση λειτουργίας ίση με τα 2/3 της ορίου διαρροής (minimum yield) του υλικού του κυλινδρικού χιτωνίου. Οι μηχανικές συζεύξεις καλύπτουν όλες τις σωληνώσεις με απαιτήσεις πίεσης 10 bar (150 psi).

$$P = 2 * S * t / D \quad (3.36)$$

όπου P η πίεση, S η επιτρεπτή τάση, t το πάχος του τοιχώματος, D η εξωτερική διάμετρος.

Το πιο συνηθισμένο υλικό για τους ελαστομερείς δακτύλιους σφραγίσματος στην Viking Johnson είναι το νιτρίλιο, χρησιμοποιείται σε σωληνώσεις αερίων, αέρα, πόσιμου και θαλασσινού νερού, πετρελαιοειδών. Το επιτρεπτό θερμοκρασιακό του εύρος είναι από -20°C έως 100°C. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της για χημική αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθούν επικαλύψεις ή και άλλα υλικά για τους δακτύλιους σφραγίσματος. Όπου υπάρχει η πιθανότητα μετακίνησης της μηχανικής σύζευξης κατά μήκος της σωλήνωσης λόγω των επαναλαμβανόμενων συστολών, διαστολών ή κραδασμών στη σωλήνωση, χρησιμοποιείται ένα βύσμα τοποθέτησης (locating plug) που βοηθάει να γίνει αντιληπτή τυχόν μεγάλη μετακίνηση της μηχανικής σύζευξης και να διορθωθεί. Τα βύσματα τοποθέτησης (locating plug) είναι πολλές φορές υποχρεωτικά από τους κανονισμούς νηογνομόνων όταν χρησιμοποιούνται μηχανικές συζεύξεις στις σωληνώσεις πλοίων.



Σχήμα 3.31: Μηχανική σύζευξη Viking Johnson

Οι μηχανικές συζεύξεις Straub-flex

Οι μηχανικές συζεύξεις Straub-flex χρησιμοποιούνται σε σωληνώσεις FRP, εξασφαλίζουν την ένωση χωρίς λείανση της εξωτερικής επιφάνειας των σωληνώσεων και επιτρέπουν την αποσυναρμολόγηση της σωλήνας χωρίς να απαιτείται να κοπεί. Αυτές οι μηχανικές συζεύξεις μπορούν να εφαρμοστούν σε σωληνώσεις πυρόσβεσης, θαλασσινού νερού, πετρελαιοειδών.

Η μηχανική σύνδεση Straub-flex που φαίνεται στο σχήμα 3.32, αποτελείται από ένα κυλινδρικό περίβλημα ανοξείδωτου χάλυβα με ένα διάμηκες σχίσσιμο και από μια ελαστική φλάντζα με στεγανοποιητικό χείλος που πιέζεται στη θέση του με μια σχετικά χαμηλή ακτινική πίεση. Το υλικό της ελαστικής φλάντζας μπορεί να είναι είτε το EPDM (ethylene propylene diene rubber) που εμφανίζει εξαιρετική αντίσταση για πόσιμο και θαλασσινό νερό, αποχέτευση, είτε το Buna-N (nitrile rubber) που χρησιμοποιείται όταν έχουμε παράγωγα πετρελαίου. Η ελαστική φλάντζα αποσβένει τους κραδασμούς και επιτρέπει την ευλυγισία των αρθρώσεων σε συστήματα σωληνώσεων όπως των πλοίων. Με τις κατάλληλες στηρίξεις η Straub-flex επιτρέπει μέχρι δύο μοίρες γωνιακής κίνησης. Η εγκατάσταση της γίνεται στα άκρα των σωληνώσεων με την σύσφιξη δύο βιδών που αν δεν είναι από ανοξείδωτο χάλυβα θα πρέπει να ελέγχονται τακτικά για τυχόν διάβρωση. Επίσης οι μηχανικές συζεύξεις Straub-flex δεν είναι σχεδιασμένες για να αντέχουν αξονικές δυνάμεις.

Οι ενδεικτικές πιέσεις για την Straub-flex που φαίνονται στον πίνακα 3.29 αφορούν συνεχή λειτουργία σε θερμοκρασία 82 C για ελαστική φλάντζα από EPDM και 71 C για ελαστική φλάντζα από Buna-N. Η διαδικασία συναρμολόγησης της Straub-flex ακολουθεί τα ίδια βήματα με την διαδικασία συναρμολόγησης της μηχανικής σύζευξης Viking Johnson που θα

περιγράψουμε στο κεφάλαιο 5. Ωστόσο στην περίπτωση που παρά την εφαρμογή των παραπάνω βημάτων υπάρξουν προβλήματα διαρροών, τότε συνίσταται να γίνει αποσυναρμολόγηση των συζεύξεων που εμφανίζουν διαρροές και να ελεγχθούν οι ελαστικές φλάντζες και τα άκρα των σωλήνων, αντικατάσταση της φλάντζας σε περίπτωση φθορών και αν δεν τηρούνται τα όρια στην διάμετρο των άκρων της σωλήνας (πίνακας 3.29) και λείανση και επανεγκατάσταση.



Σχήμα 3.32: Μηχανική σύζευξη Straub-flex

3.3.4 Αρμοί διαστολής (expansion joints)

Οι αρμοί διαστολής (σχήμα 3.33) προσφέρουν μεγαλύτερη δυνατότητα αξονικής κίνησης και άρα δίνουν μεγαλύτερη ευελιξία κατά την σχεδίαση. Αυτό το μεγαλύτερο εύρος αξονικής κίνησης αποτελεί πλεονέκτημα κυρίως σε μεγάλα μήκη σωληνώσεων, στην περίπτωση ενός πλοίου αυτό αφορά δίκτυα σωληνώσεων που διατρέχουν σχεδόν όλο το πλοίο στο διάμηκες όπως το δίκτυο σωληνώσεων φορτίου. Οι αρμοί διαστολής συνήθως δεν χρησιμοποιούνται στο δίκτυο σωληνώσεων έρματος των πλοίων γιατί συνηθίζεται να υπάρχουν αγκυρωμένες στηρίξεις ανά συχνά διαστήματα της σωληνώσης (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012). Πρέπει να δίνεται έμφαση κατά το στάδιο της σχεδίασης στις στηρίξεις των αρμών διαστολής γιατί αφενός προσθέτουν βάρος και αφετέρου για να διατηρείται ελεγχόμενο το βέλος κάμψης τους. Συνήθως η δύναμη από την παραμόρφωση μιας σωλήνας FRP δεν είναι αρκετή για να παραμορφώσει τους συνηθισμένους αρμούς διαστολής που χρησιμοποιούνται στις μεταλλικές σωληνώσεις για αυτό προτιμώνται ελαστομερείς αρμοί διαστολής που είναι και πιο ελαφριοί. Στις εφαρμογές σε συστήματα σωληνώσεων πλοίου ωστόσο, η χρήση ελαστομερών αρμών διαστολής περιορίζεται από την μειωμένη αντοχή που εμφανίζουν σε εξωτερικά φορτία, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν σε σωληνώσεις στα διπύθμενα του πλοίου.

Πίνακας 3.29: Στοιχεία εφαρμογών για Straub-flex, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

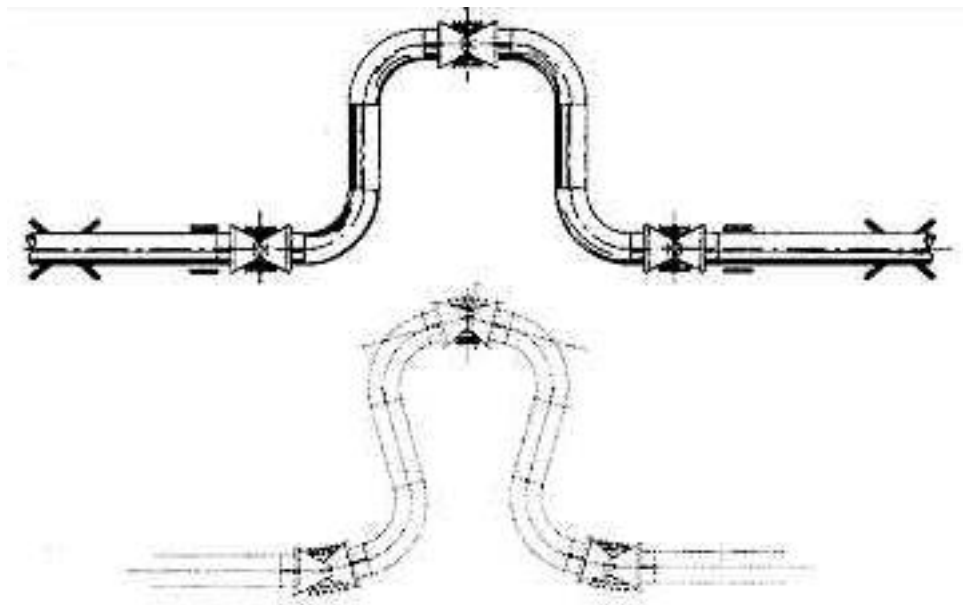
Nominal Diameter (in.) (mm)		Straub Type	Article No. (1)	Pressure Rating (3)		Coupling Width		Pipe Outside Diameter			
				psi.	Bar	(in.)	(mm)	Minimum (in.) (mm)	Maximum (in.) (mm)		
2	50	Flex-1 L-LS	005761	225	16	3.0	76	2.25	57	2.40	61
3	80	Flex-1 L-LS	008792	225	16	3.7	94	3.43	87	3.62	92
4	100	Flex-1 L-LS	112117	225	16	3.7	94	4.41	112	4.60	117
6	150	Flex-1 L-LS	166171	225	16	4.3	108	6.54	116	6.73	171
8	200	Flex-2 L-LS (2)	214224	213	15	5.5	139	8.43	214	8.81	224
10	250	Flex-2 L-LS (2)	270280	178	12.5	5.5	139	10.63	270	11.02	280
12	300	Flex-2 L-X	323333	>225	>16	5.8	148	12.72	323	13.11	333
14	350	Flex-2 L-X	353363	>225	>16	5.8	148	13.90	353	14.30	363
16	400	Flex-2 L-X	404414	>225	>16	5.8	148	15.90	404	16.30	414
18	450	Flex-2 L-X	455465	>225	>16	5.8	148	17.90	455	18.30	465
20	500	Flex-2 L-X	505516	>225	>16	5.8	148	19.90	505	20.30	516
22	550	Flex-2 L-X	556566	>225	>16	5.8	148	21.90	556	22.30	566
24	600	Flex-2 L-X	608617	>225	>16	5.8	148	23.90	608	24.30	617
26	650	Flex-2 L-X	658668	>225	>16	5.8	148	25.90	658	26.30	668
28	700	Flex-2 L-X	709719	>225	>16	5.8	148	27.90	709	28.30	719
30	750	Flex-2 L-X	759770	>225	>16	5.8	148	29.90	759	30.30	770
32	800	Flex-2 L-X	810820	>225	>16	5.8	148	31.90	810	32.30	820
34	850	Flex-2 L-X	862871	>225	>16	5.8	148	33.90	862	34.30	871
36	900	Flex-2 L-X	912922	>225	>16	5.8	148	35.90	912	36.30	922



Σχήμα 3.33: Αρμός διαστολής

3.3.5 Βρόγγοι σωλήνωσης (pipe loops)

Οι βρόγγοι σωλήνωσης (σχήμα 3.34) αποτελούν την πρώτη επιλογή για την απορρόφηση της αλλαγής μήκους (λόγω των θερμικών τάσεων) μεταξύ των αγκυρωμένων στηρίξεων. Αυτή η σχεδιαστική προτίμηση οφείλεται στο γεγονός ότι μπορούν εύκολα να παρασκευασθούν συνδυάζοντας σωλήνες και γωνίες (elbows) κατευθείαν στον τόπο εγκατάστασης της σωλήνωσης. Επίσης προτιμάται σχεδιαστικά οι βρόγγοι σωλήνωσης να είναι οριζόντιοι ώστε να αποφεύγεται ο εγκλωβισμός αέρα και ιζημάτων και να διευκολύνεται η αποστράγγιση. Για μη οριζόντιους βρόγγους θα πρέπει να υπάρχουν παραπάνω προβλέψεις κατά την σχεδίαση (ειδικές βρύσες). Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση ανερχόμενων βρόγγων σε σχέση με τη σωλήνωση, πρέπει να υπάρχουν βαλβίδες απομάκρυνσης του αέρα για καλύτερη ροή και ασφάλεια στην περίπτωση υψηλών πιέσεων. Για κατερχόμενους βρόγγους πρέπει να εξισορροπείται η πίεση του αέρα ώστε να επιτυγχάνεται η αποστράγγιση.



Σχήμα 3.34: Βρόγγος σωλήνωσης χωρίς και με αύξηση μήκους σωλήνωσης

Όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012) το μέγεθος του βρόγγου υπολογίζεται από την σχέση 3.40 ακολουθώντας την μέθοδο του ελαστικού κέντρου (Elastic-Center Method) όπου η δύναμη στον βρόγγο δίνεται από την εξίσωση 3.37:

$$F_x = \frac{\Delta L * E * I}{l_x} = \frac{4 * \Delta L * E * I}{L^3} \quad (3.37)$$

$$M = F_x * (L / 2) \quad (3.38)$$

$$S_A = \frac{M * D}{2 * I} \quad (3.39)$$

$$L = \left(\frac{\Delta L * E * D}{S_A} \right)^{1/2} \quad (3.40)$$

Όπου ΔL είναι η συνολική γραμμική επιμήκυνση που απορροφάει από τον βρόγχο, F_x είναι η δύναμη στην διεύθυνση x , E το μέτρο ελαστικότητας της σωλήνωσης, I ροπή αδράνειας της σωλήνας, I_x ροπή αδράνειας ως προς x άξονα που περνάει από το κέντρο της σωλήνας πριν και μετά τον βρόγχο, M είναι η καμπτική ροπή που μεγιστοποιείται στις γωνίες, S_A είναι η επιτρεπτή τάση, D η εξωτερική διάμετρο της σωλήνωσης, L το απαιτούμενο μήκος του βρόγχου

Όμοια υπολογίζεται και το απαιτούμενο μήκος για βρόγχους τύπου Z και γωνίες τύπου L ως εξής:

$$L = \left(\frac{2 * \Delta L * E * D}{S_A} \right)^{1/2} \quad (3.41)$$

Στις περιπτώσεις που η σωλήνωση FRP έχει και μόνωση το απαιτούμενο μήκος του βρόγχου θα είναι μεγαλύτερο και υπολογίζεται ως εξής:

$$L_{ip} = L_{bp} * \left(\frac{(E * I)_{ip}}{(E * I)_{bp}} \right)^{1/2} \quad (3.42)$$

Όπου i_p συμβολίζει την μονωμένη σωλήνωση και b_p την χωρίς μόνωση σωλήνα.

Κεφάλαιο 4

Σωληνώσεις FRP για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον

4.1 Συνηθισμένες πρακτικές κατά την εγκατάσταση σωληνώσεων FRP για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον

Οι σωληνώσεις και τα εξαρτήματα FRP είναι πιο ευαίσθητα σε φθορές από κρούση ή ακατάλληλο χειρισμό σε σχέση με τις χαλύβδινες σωληνώσεις. Αυτός είναι ο λόγος που ακολουθούνται πρακτικές οδηγίες για την προστασία των FRP σωληνώσεων κατά την ανύψωση, την φορτοεκφόρτωση, την αποθήκευση, την εγκατάσταση και τον έλεγχο των σωληνώσεων FRP όπως αναφέρονται συγκεκριμένα σε AMERON (2011).

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η μεγαλύτερη δυσκολία στην εγκατάσταση FRP σωληνώσεων θεωρείται ότι είναι στα σημεία σύνδεσης των επιμέρους τμαχίων (Ship Structure Committee 1990). Οι εργάτες θα πρέπει να έχουν μια μικρή ενημέρωση και εξοικείωση (συνήθως είναι από 1 έως 3 μέρες) πριν την εγκατάσταση των σωληνώσεων FRP και κυρίως πάνω στις ενώσεις των σωληνώσεων (Chasis 1988). Στον πίνακα 4.1 φαίνεται και ο αριθμός των εργατών που χρειάζονται για την ένωση πλαστικών σωληνώσεων ανάλογα με την διάμετρο της σωλήνωσης FRP.

Πίνακας 4.1: Αριθμός εργατών για την ένωση πλαστικών σωληνώσεων ανάλογα με την διάμετρο, Chasis 1988

Pipe Diameter (in.)	Joining Work Crew (minimum)
1/4–1 1/4	1
1 1/2–3	2
4–8	3
10 and above	4

Η επιτυχής εγκατάσταση συστήματος σωληνώσεων FRP για εφαρμογές σε θαλάσσιες εφαρμογές και σε πλοία, απαιτεί την πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο η σωλήνωση θα διατρέχει χώρους με υδατοστεγείς φρακτές και καταστρώματα. Επίσης κατά την εγκατάσταση θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην σωστή υλοποίηση των σχεδιαστικών προβλέψεων στήριξης και αγκύρωσης αυτών των σωληνώσεων. Το εγχειρίδιο σχεδίασης της NOV για FRP σωληνώσεις σε θαλάσσιο περιβάλλον (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012) προσφέρει οδηγίες που έχουν προέλθει από υπολογισμούς και εμπειρικά στοιχεία από την εγκατάσταση αυτών των σωληνώσεων.

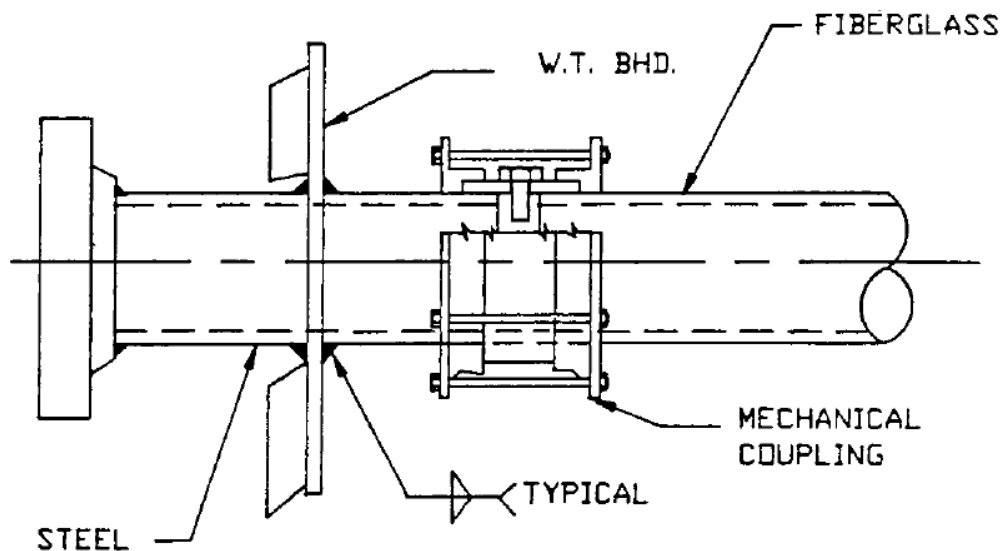
4.1.1 Εγκατάσταση σωληνώσεων που περνούν από στεγανές φρακτές και καταστρώματα

Όλα τα ανοίγματα στις υδατοστεγείς φρακτές και καταστρώματα πρέπει να τηρούν τους κανονισμούς των Νηογνομόνων και να είναι κατασκευασμένα από υλικό ικανό να συγκολληθεί (χάλυβας ή άλλο μεταλλικό υλικό) υδατοστεγώς με τον χάλυβα της φρακτής ή

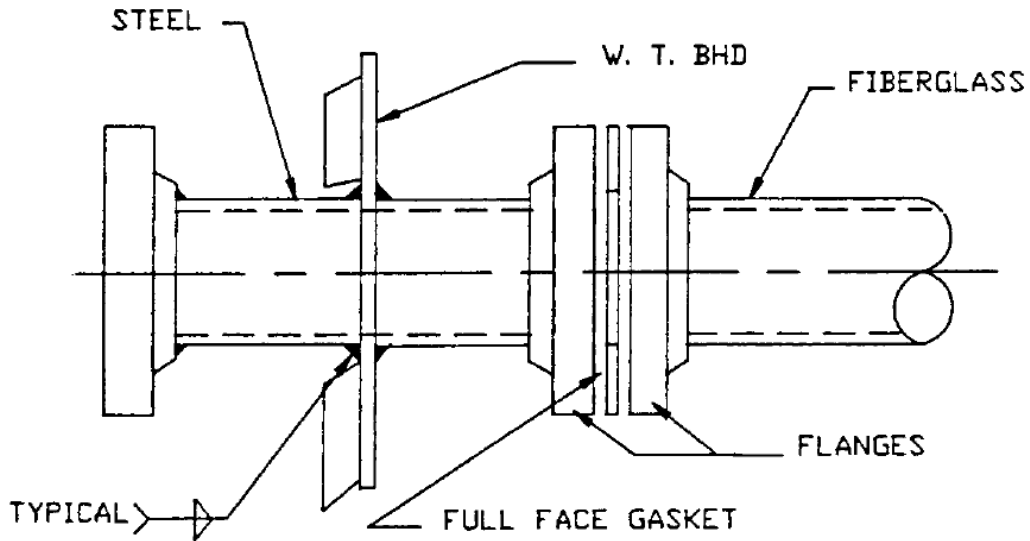
του καταστρώματος. Η FRP σωλήνωση μπορεί κατά την εγκατάσταση του εκάστοτε δικτύου σωληνώσεων να εξασφαλίσει την μεταφορά του φορτίου της μέσα από αυτά τα ανοίγματα με τους εξής τρόπους:

α) Με την χρήση μιας μηχανικής σύζευξης που να συνδέει την μεταλλική προέκταση του ανοίγματος της υδατοστεγούς φρακτής (ή καταστρώματος) με την σωλήνωση FRP (σχήμα 4.1). Πρέπει να υπάρχει ευθυγράμμιση της μεταλλικής προέκτασης της σωλήνωσης με τον διαμήκη άξονα της σωλήνωσης FRP μέσα στα όρια αποκλίσεων που επιτρέπει ο κατασκευαστής της μηχανικής σύζευξης.

β) Με την χρήση μιας μεταλλικής προέκτασης του ανοίγματος της υδατοστεγούς φρακτής (ή καταστρώματος) που να έχει και στα δύο άκρα της φλάντζες (σχήμα 4.2). Αυτός ο τύπος μεταλλικής προέκτασης χρησιμοποιείται αν απαιτείται να ενσωματωθεί κάποια βαλβίδα στο άνοιγμα της υδατοστεγούς φρακτής. Η απόκλιση της ευθυγράμμισης μεταξύ της χαλύβδινης και της FRP φλάντζας πρέπει να είναι μέσα στα όρια που αναφέρονται στον πίνακα 4.2 για να επιτυγχάνεται σωστό σφράγισμα μεταξύ τους και να μην αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις.



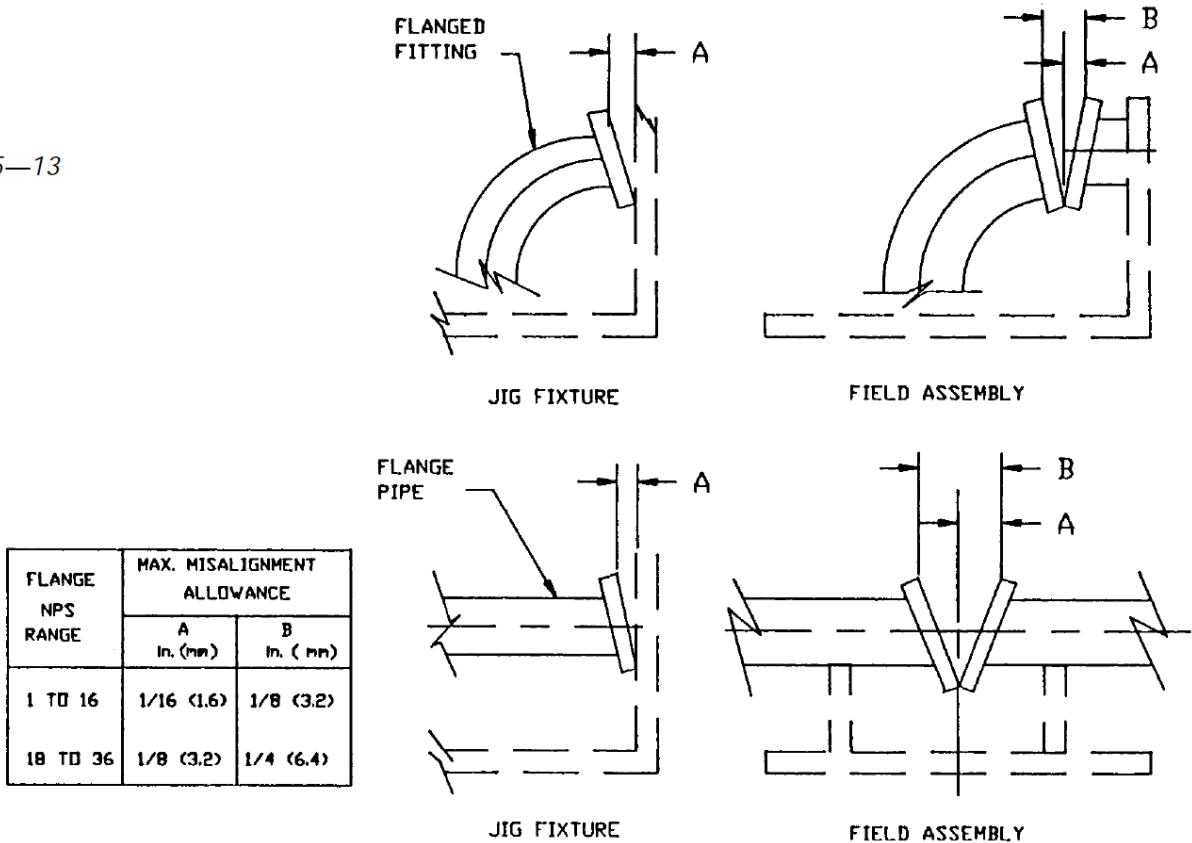
Σχήμα 4.1: Ένωση σωλήνα FRP και της προέκτασης του ανοίγματος υδατοστεγούς φρακτής ή καταστρώματος με μηχανική σύζευξη, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012



Σχήμα 4.2: Ένωση σωλήνα FRP και της προέκτασης του ανοίγματος υδατοστεγούς φρακτής ή καταστρώματος με φλάντζες, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

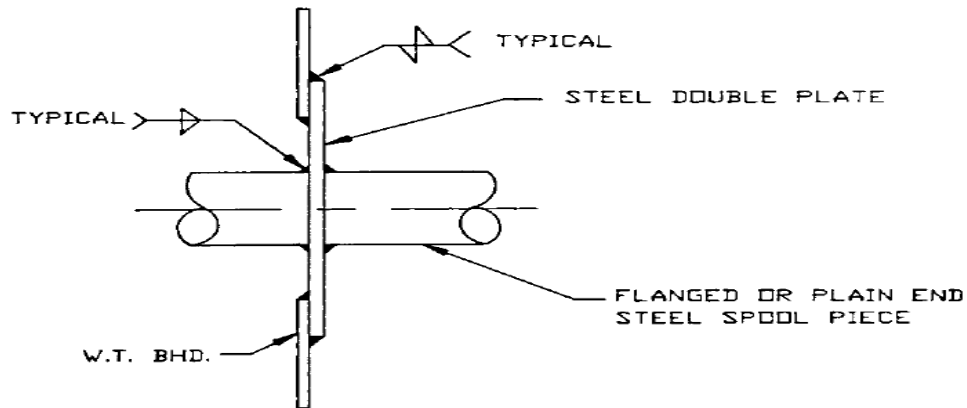
Πίνακας 4.2: Όρια απόκλισης από την ευθυγράμμιση μεταξύ χαλύβδινης και FRP φλάντας, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

5—13



γ) Με την χρήση προσωρινής συγκόλλησης (tack welding) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3, που επιτρέπει την μετακίνηση της μεταλλικής πλάκας με το ενσωματωμένο άνοιγμα επί της

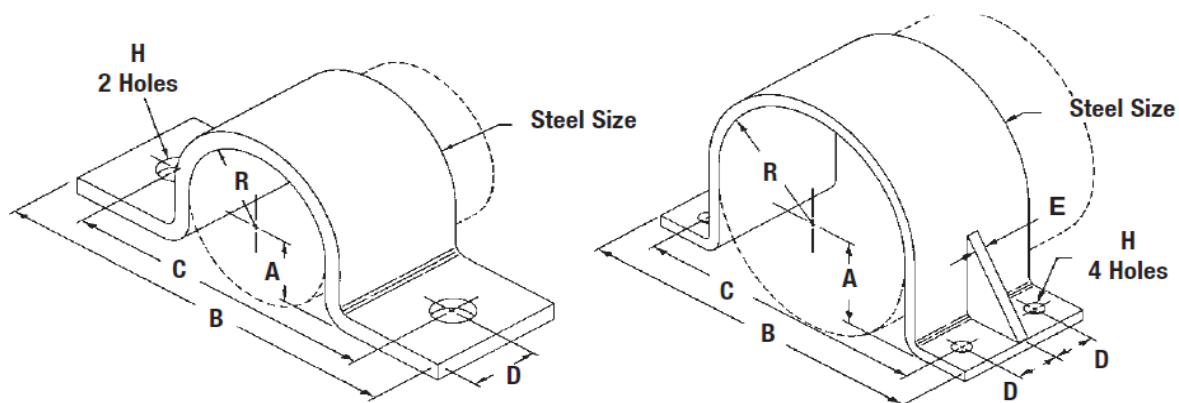
υδατοστεγούς φρακτής (ή καταστρώματος). Αυτή η διάταξη επιτρέπει την μεγαλύτερη δυνατή ευθυγράμμιση της σωλήνας FRP με την μεταλλική προέκταση του ανοίγματος. Χρησιμοποιεί ειδικά στις περιπτώσεις που η σωλήνωση διατρέχει πολλές φρακτές και η ελλιπής ευθυγράμμιση αυξάνει τις τάσεις που επιδρούν στο σύστημα της σωλήνωσης.



Σχήμα 4.3: Ένωση σωλήνα FRP και της προέκτασης του μετακινούμενου ανοίγματος υδατοστεγούς φρακτής ή καταστρώματος, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

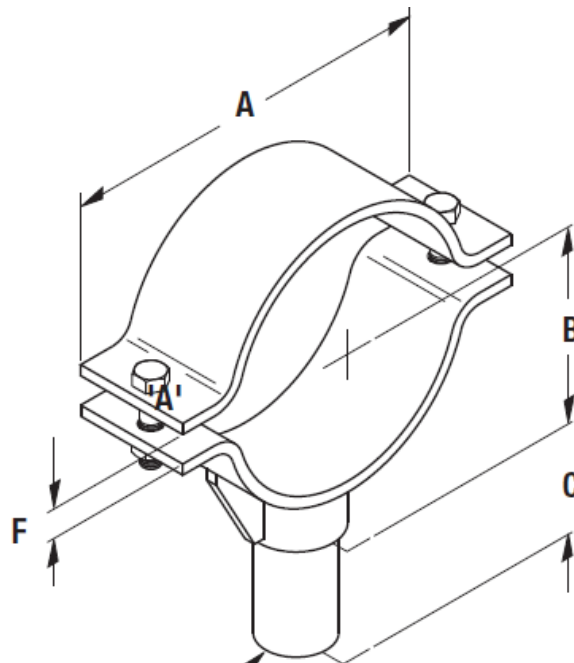
4.1.2 Αγκυρωμένες στηρίξεις σωληνώσεων FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον

Διάφορες πρακτικές χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση αγκυρωμένων στηρίξεων σε θαλάσσιες εφαρμογές. Μία μορφή αγκυρωμένης στήριξης φαίνεται στο σχήμα 4.4, όπου χρησιμοποιείται ένα έλασμα που τυλίγει ένα μέρος της περιμέτρου της σωλήνωσης και πακτώνεται πάνω σε κάποιο αμετακίνητο στοιχείο. Το έλασμα αυτό λειτουργώντας σαν σφικτήρας αγκυρώνει την σωλήνωση και αποτρέπει την διαμήκη αλλαγή μήκους και παραλαμβάνει την αξονική δύναμη που δημιουργείται. Η δύναμη που ασκεί ο σφικτήρας στον FRP σωλήνα θα πρέπει να είναι τέτοια που να αποφεύγεται η φθορά του σωλήνα. Η φθορά των σωληνώσεων FRP από τους σφικτήρες είναι πιο έντονο πρόβλημα για σωλήνες διαμέτρου μικρότερης των 8 in λόγω μικρότερου πάχους.



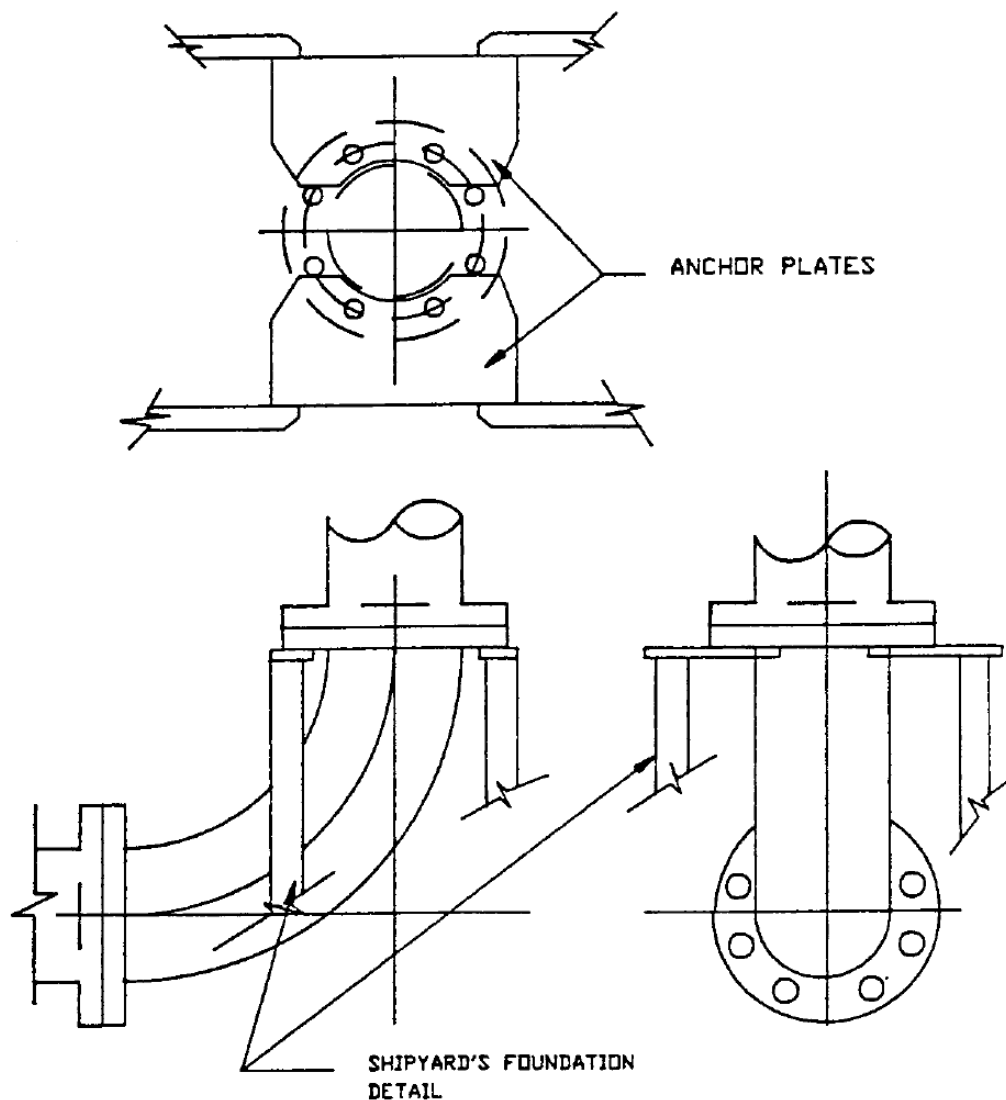
Σχήμα 4.4: Σφικτήρας αγκύρωσης (hold-down anchor clamp), EATON

Μία άλλη μορφή αγκυρωμένης στήριξης φαίνεται στο σχήμα 4.5, όπου χρησιμοποιείται ένα έλασμα που τυλίγει όλη την περίμετρο της σωλήνωσης και πακτώνεται πάνω σε κάποιο αμετακίνητο στοιχείο. Το έλασμα αυτό λειτουργεί επίσης σαν σφικτήρας που αγκυρώνει την σωλήνωση και αποτρέπει την διαμήκη αλλαγή μήκους, ωστόσο λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής ελάσματος-σωλήνωσης (σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή) απορροφά καλύτερα τις αξονικές δυνάμεις και υπάρχουν μικρότεροι κίνδυνοι φθοράς της σωλήνωσης.



Σχήμα 4.5: Σφικτήρας αγκύρωσης με περιμετρικό τύλιγμα της σωλήνωσης (pipe saddle with strap), EATON

Στις περιπτώσεις γωνιών σωλήνωσης μεγάλης διαμέτρου, τότε η συνηθισμένη πρακτική που χρησιμοποιείται από τα ναυπηγεία για να αγκυρώσουμε και να στηρίξουμε τις φλάντζες είναι οι πλάκες που φαίνονται στο σχήμα 4.6.



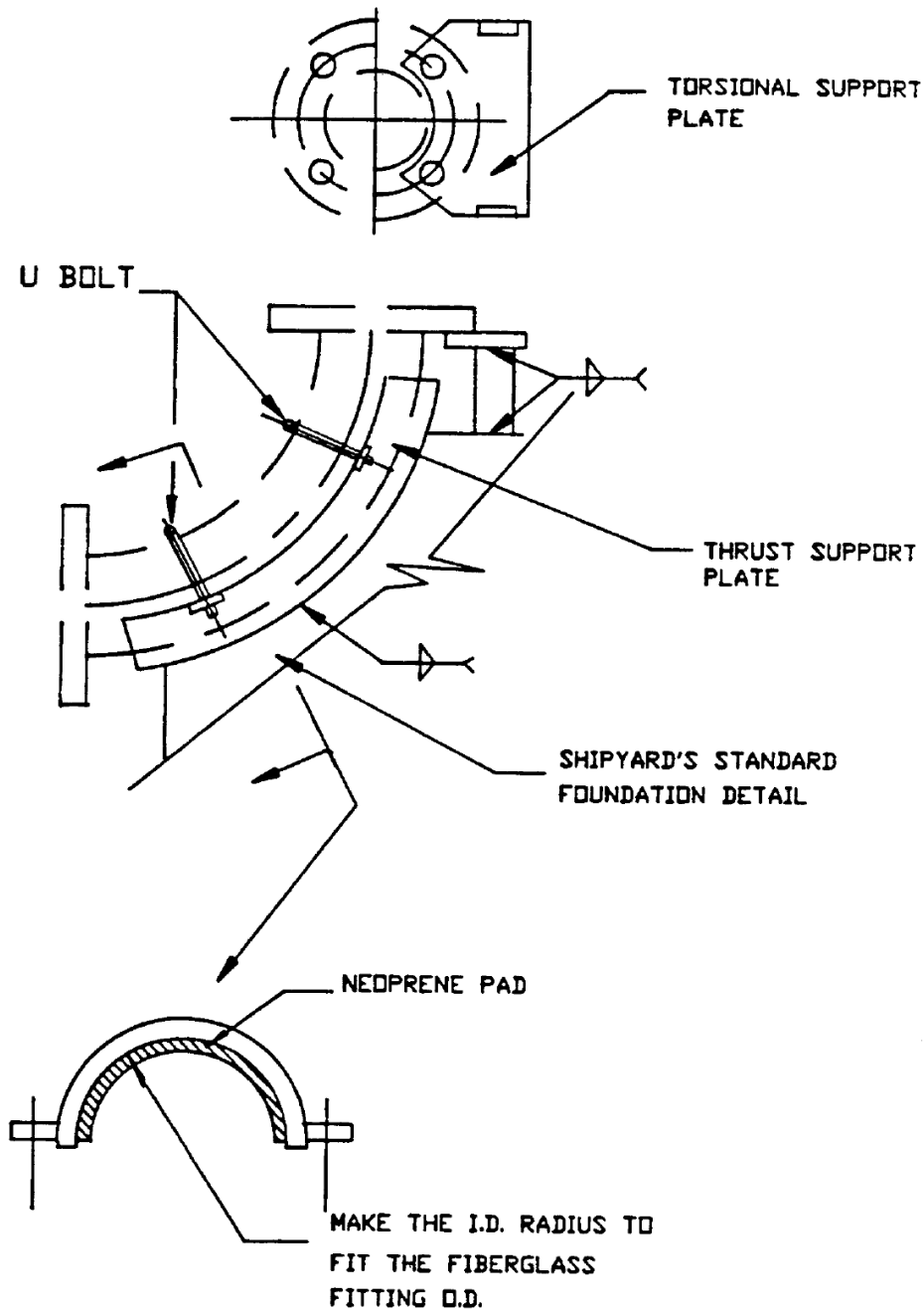
Σχήμα 4.6: Πλάκα αγκυρωμένης στήριξης για γωνία σωλήνωσης μεγάλης διαμέτρου, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

4.1.3 Πλάκες στήριξης σωληνώσεων FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον

Χρησιμοποιούνται συχνά πλάκες στήριξης ως αντισταθμιστές των επιπτώσεων που μπορεί να εμφανιστούν σε μέρη της σωλήνωσης που αναμένονται υψηλές τιμές αξονικής δύναμης ή υδροστατικής πίεσης που να υπερβαίνουν την αντοχή της σωλήνωσης, των ενώσεων ή των διάφορων εξαρτημάτων της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων σημείων όπως έχουμε ήδη αναφέρει είναι τα διάφορα εξαρτήματα της σωλήνωσης που παράγουν αξονική δύναμη παραπάνω από αυτή που παράγεται από την πίεση και την θερμοκρασία στην υπόλοιπη σωλήνωση. Τέτοια εξαρτήματα είναι οι βαλβίδες, οι γωνίες, οι διακλαδώσεις, οι μειωτήρες.

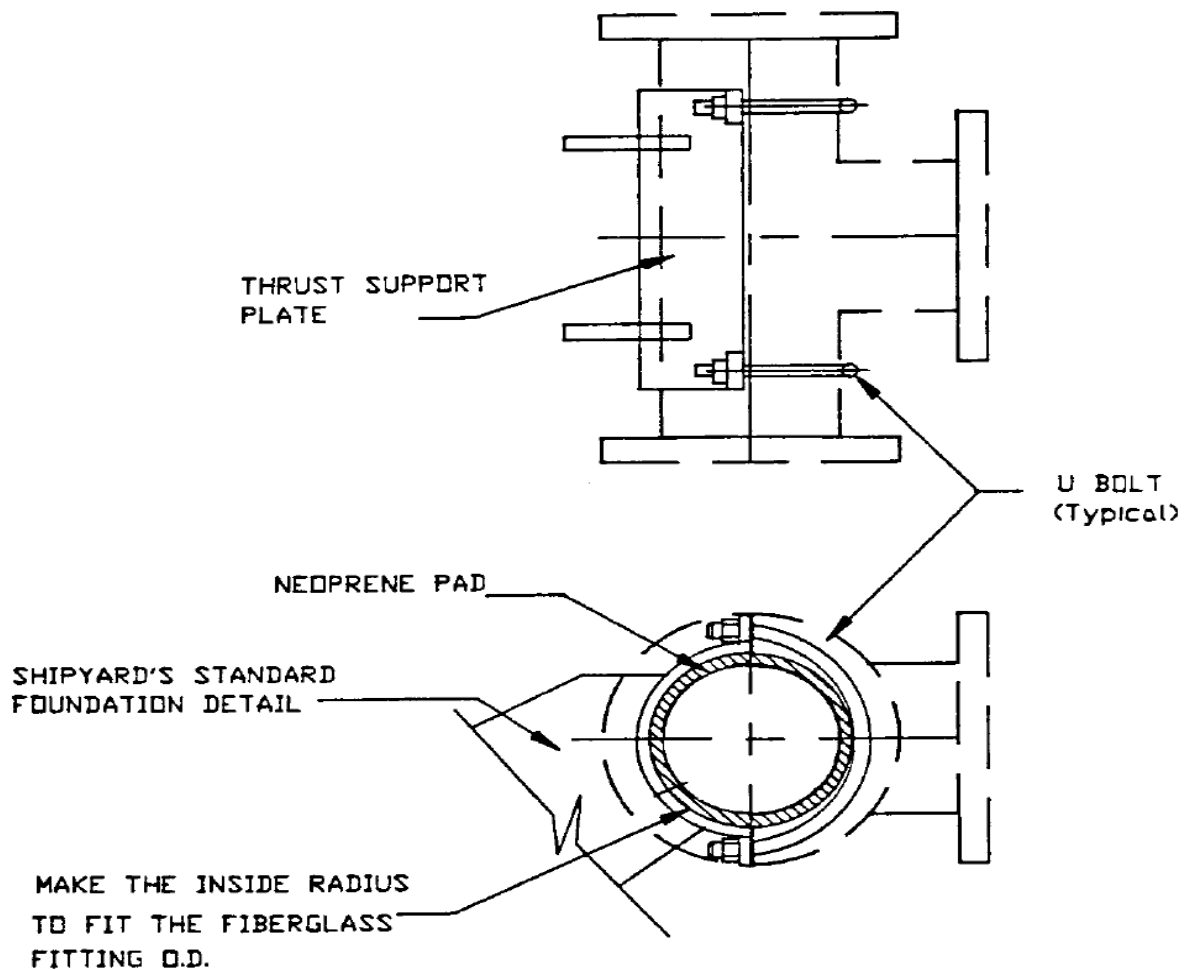
Για γωνίες 90° και 45° στη σωλήνωση συνίσταται η στήριξη που θα χρησιμοποιηθεί για να παραλάβει την αξονική δύναμη (thrust support plate), να μεταφέρει κατευθείαν την φόρτιση από το εξάρτημα της γωνίας στην ίδια τη στήριξη (σχήμα 4.7). Όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012), αυτή η πλάκα στήριξης διαμορφώνεται κατά

αντιστοιχία με την διάμετρο και την καμπυλότητα του εξαρτήματος και προσαρτάται μόνιμα στις γωνίες της σωλήνωσης κατά την εγκατάσταση της στο πλοίο. Επίσης μια ακόμα πλάκα στήριξης (torsional support plate) βιδώνεται απευθείας στην φλάντζα της γωνίας για να απορροφηθεί η στρεπτική τάση και να αποτραπεί η γωνιακή μετατόπιση του εξαρτήματος της γωνίας. Συνίσταται να υπάρχει στην επιφάνεια επαφής μεταξύ της πλάκας στήριξης και της γωνίας ένα συμπιεσμένο μαξιλάρι (pad) από νεοπρένιο πάχους 10 mm, για αποφυγή φθορών από τριβή στην σωλήνωση FRP.



Σχήμα 4.7: Πλάκες στήριξης σε γωνία σωλήνωσης για την απορρόφηση της αξονικής και στρεπτικής δύναμης, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

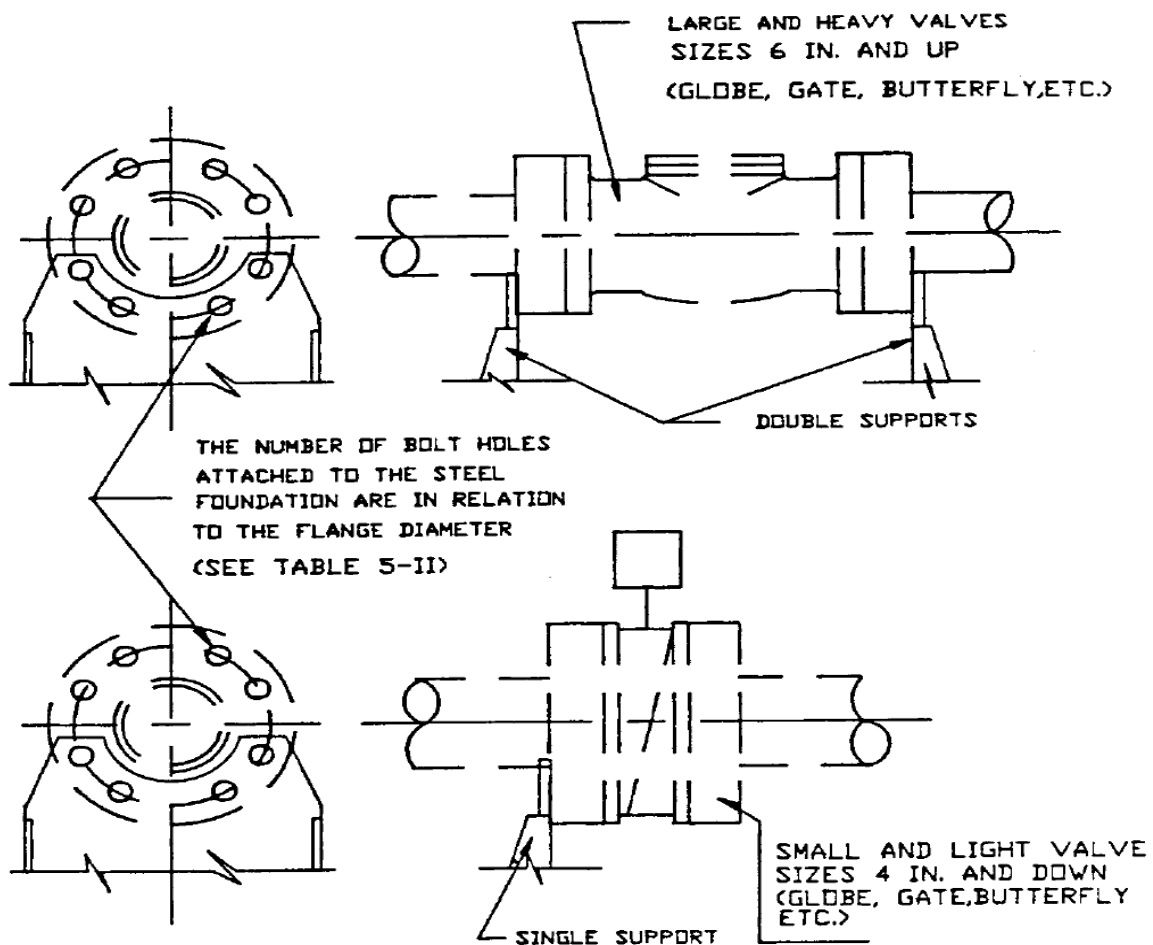
Για εξαρτήματα διακλάδωσης τύπου T (Tees) χρησιμοποιούνται επίσης πλάκες στήριξης για να παραλάβουν την αξονική ή υδροστατική δύναμη που μπορεί να υπερβεί την αντοχή του εξαρτήματος σε διατμητική τάση (σχήμα 4.8). Όμοια με τις πλάκες στήριξης για γωνίες, η φόρτιση πρέπει να μεταφέρεται κατευθείαν από το εξάρτημα T στην ίδια τη στήριξη. Η κατασκευή και εγκατάσταση των πλακών στήριξης είναι απλούστερη στην περίπτωση των T καθώς δεν υπάρχουν απαιτήσεις καμπυλότητας, ούτε στρεπτικές τάσεις.



Σχήμα 4.8: Πλάκα στήριξης σε εξάρτημα σωλήνωσης τύπου T για την απορρόφηση της αξονικής δύναμης, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

Για τα διάφορα μεγέθη βαλβίδων συνήθως χρησιμοποιείται κατά την σχεδίαση και εγκατάσταση της σωλήνωσης και αντίστοιχη στήριξη. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.9, οι μικρότερες βαλβίδες (<4 in) είναι πιο ελαφριές και συνήθως υποστηρίζονται από μία στήριξη, ενώ οι μεγαλύτερες βαλβίδες από δύο στήριξεις. Όμοια με τις πλάκες στήριξης των γωνιών και των διακλαδώσεων T, οι πλάκες στήριξης των βαλβίδων πρέπει να μεταφέρουν την φόρτιση κατευθείαν από το εξάρτημα T στην ίδια τη στήριξη και από εκεί στο πλοίο. Οι βαλβίδες όπως και όλα τα βαριά μεταλλικά εξαρτήματα της σωλήνωσης θα πρέπει να στηρίζονται για να

αποφεύγεται η μεταφορά του βάρους τους στην σωλήνωση FRP και οι αντίστοιχες καμπτικές τάσεις που θα αναπτύσσονταν.



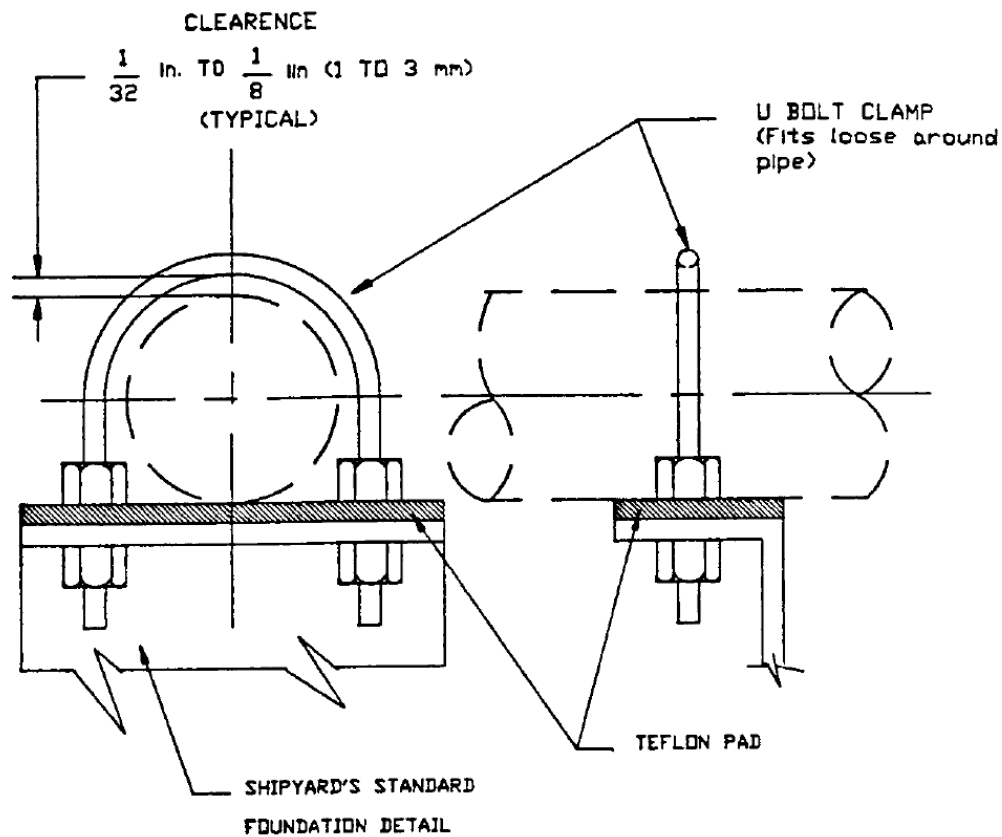
Σχήμα 4.9: Πλάκες στήριξης σε βαλβίδες σωλήνωσης για την απορρόφηση βάρους, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

4.1.4 Στηριζέις-οδηγοί σωληνώσεων FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον

Για την εγκατάσταση των στηριζέων-οδηγών (guides) της σωλήνωσης FRP σε πλοία χρησιμοποιείται συνήθως η διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 4.10. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι στηριζέις-οδηγοί δεν αποτρέπουν την αξονική κίνηση. Το «μαξιλάρι» που φαίνεται στο σχήμα 5.10 είναι από υλικό Teflon (Teflon pad) και χρησιμοποιείται γιατί έχει αυτό-λιπαντικές ιδιότητες και μειώνει τον κίνδυνο απόξεσης της σωλήνωσης FRP λόγω της τριβής με το «κολλάρο» χάλυβα.

Όπως αναφέρεται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012), το Teflon δεν προσβάλλεται από χημικά και πετρελαιοειδή και συνίσταται το πάχος του μαξιλαριού από Teflon να αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση του μεγέθους του δικτύου της σωλήνωσης με ελάχιστο πάχος τα 5 mm. Συνήθως το μαξιλάρι από Teflon συγκρατείται από βίδες τύπου U

που συνίσταται να έχουν επικάλυψη που να αποτρέπει την διάβρωσή τους (Amercoat, urethane, hot dip coating).



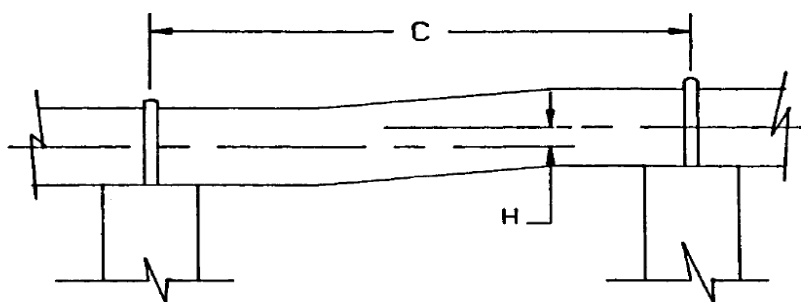
Σχήμα 4.10: Στηρίξεις-οδηγοί σωληνώσεων FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

4.1.5 Επιτρεπτό όριο απώλειας ευθυγράμμισης σωλήνωσης FRP μεταξύ των στηρίξεων

Η μέγιστη απώλεια στην ευθυγράμμιση της σωλήνωσης FRP μεταξύ δύο στηρίξεων φαίνεται στο σχήμα 4.11 και υπολογίζεται από την σχέση 4.1 για διάφορες αποστάσεις μεταξύ δύο στηρίξεων.

$$H = H_{20} * C^2 / 400, \quad 4.1$$

Όπου H είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη απώλεια ευθυγράμμισης μεταξύ δύο στηρίξεων σε in, C η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων σε ft, H₂₀ η μέγιστη επιτρεπόμενη απώλεια ευθυγράμμισης για απόσταση 20 ft μεταξύ των στηρίξεων που ενδεικτικές τιμές της δίνονται στον πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.11: Μέγιστη απόλεια ευθυγράμμισης της σωλήνωσης FRP μεταξύ δύο στηρίξεων, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

Πίνακας 4.3: Μέγιστη επιτρεπόμενη απόλεια ευθυγράμμισης για απόσταση 20 ft μεταξύ των στηρίξεων, National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012

NPS RANGE	C= 20 ft. (6m)	
	m.	mm.
2-4	1	25.4
6-12	3/4	19.1
14 - 20	1/2	12.7
24 - 36	3/8	9.5

4.1.6 Διαδικασία συναρμολόγησης της μηχανικής σύζευξης Viking Johnson κατά την εγκατάσταση σωληνώσεων FRP

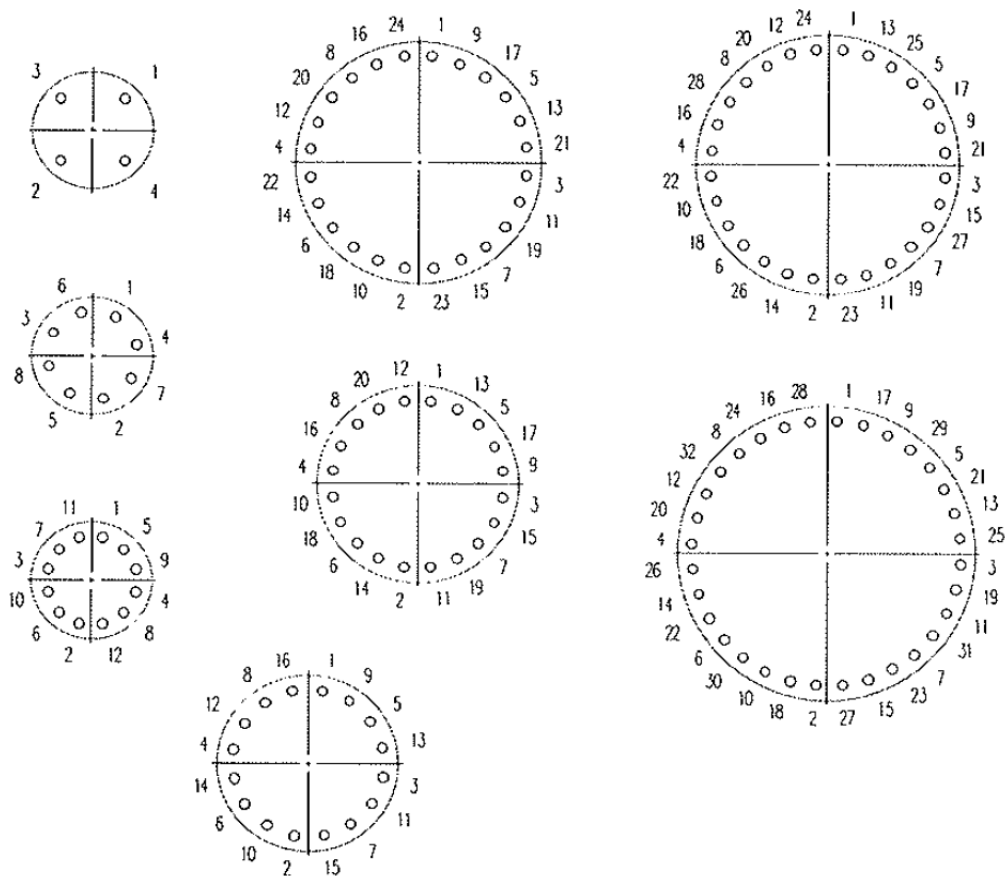
Η διαδικασία συναρμολόγησης σωληνώσεων FRP με μηχανική σύζευξη Viking Johnson παρότι είναι γενικά παρόμοια έχει κάποιες σημαντικές διαφορές με την διαδικασία συναρμολόγησης χαλύβδινων σωληνώσεων. Αυτές οι διαφορές επιτάσσουν μια λίγο διαφορετική διαδικασία για τις FRP σωληνώσεις ώστε να αποφευχθούν τυχόν φθορές. Τα βασικά βήματα της διαδικασίας συναρμολόγησης μηχανικής σύζευξης Viking Johnson σε σωληνώσεις FRP, όπως αναφέρονται σε National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (2012), είναι τα εξής:

- Κόψιμο του σωλήνα στο κατάλληλο μήκος όταν αυτό απαιτείται. Η σωλήνα τοποθετείται σε μέγγενη με μια προστατευτική πλαστική επικάλυψη πάχους 6 mm για αποφυγή φθορών και στην συνέχεια κόβεται με σιδεροπρίονο ή τροχό.
- Λείανση των άκρων της σωλήνωσης. Η λείανση γίνεται είτε με χειροκίνητο τρίψιμο είτε με τροχό λείανσης (σχήμα 4.12) και αποφεύγεται η επαφή της λειασμένης σωλήνωσης με οτιδήποτε μπορεί να δημιουργήσει μια λιπαρή επικάλυψη.
- Προετοιμασία των επιφανειών σφραγίσματος της φλάντζας, καθώς μπορεί οι σωληνώσεις FRP που παρασκευάζονται με περιέλιξη ινών να έχουν λίγο μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη εξωτερική διάμετρο.

- Εφαρμογή προστατευτικής επικάλυψης στις επιφάνειες που έχουν υποστεί κοπή και λείανση.
- Καθαρισμός και λίπανση των επιφανειών των δακτυλίων σφραγίσματος και της εξωτερικής επιφάνειας της σωλήνωσης ώστε να διεισδύσουν πιο εύκολα οι δακτύλιοι στα άκρα των σωλήνων.
- Ανάρτηση και συναρμολόγηση της μηχανικής σύζευξης. Πρώτα ευθυγραμμίζονται οι σωληνώσεις και στη συνέχεια ενώνονται με την μηχανική σύζευξη στο μέσο της ένωσης. Η συναρμολόγηση πρέπει να γίνει αφότου η σωλήνωση έχει στηριχθεί και βρίσκεται στην τελική της θέση.
- Σύσφιξη των βιδών ώστε να υπάρξει ομοιόμορφη συμπίεση της μηχανικής σύζευξης (σχήμα 4.13)
- Έλεγχος της στρεπτικής ροπής των βιδών. Η διαδοχική σύσφιξη βιδών μπορεί να προκαλέσει την χαλάρωση κάποιων εξ' αυτών που πρέπει να επανασυσφιχθούν, ενώ η υπερβολική στρεπτική ροπή των βιδών μπορεί να προκαλέσει φθορά στην σωλήνωση.
- Σε περίπτωση που παρά την εφαρμογή των παραπάνω βημάτων υπάρξουν προβλήματα τότε συνίσταται να χαλαρώνονται όλες οι βίδες και παξιμάδια, να γίνεται έλεγχος για την ευθυγράμμιση της συναρμολόγησης και διόρθωση σε περίπτωση απώλειας ευθυγράμμισης, αντικατάσταση κατεστραμμένων δακτυλίων.



Σχήμα 4.12: Τροχός λείανσης σωληνώσεων FRP, AMERON 2011



Σχήμα 4.13: Αλληλουχία σύσφιξης βιδών για ομοιόμορφη συμπίεση της μηχανικής σύζευξης, AMERON 2007

4.2 Ενδεικτικές ιδιότητες σωληνώσεων FRP για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον

Θα παραθέσουμε στην συνέχεια καταλόγους από Ameron Bondstrand Product Guide (2007) με τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες σωληνώσεων FRP (ινών γυαλιού και εποξικής ρητίνης) που προορίζονται για εφαρμογές σε θαλάσσιο περιβάλλον. Οι σωληνώσεις αυτές αφορούν την σειρά 2000M που έχει και μια εσωτερική στρώση ρητίνη πάχους 0.5 mm και την σειρά 7000M που αφορά κυρίως εφαρμογές με απαιτήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Όπου δεν αναφέρονται οι σειρές τα στοιχεία είναι κοινά. Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα τυπικά μήκη στα οποία κατασκευάζονται οι σωληνώσεις και οι εκτιμώμενες ανοχές και στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι κοινές φυσικές ιδιότητες τους. Στον πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των σωληνώσεων ανάλογα την διαδικασία σκλήρυνσης που έχει ακολουθηθεί στην κατασκευή τους και για δύο θερμοκρασίες λειτουργίας.

Πίνακας 4.4: Τοπικά μήκη σωληνώσεων, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Nominal Length* Plant [mm]	Pipe Size Asia Plant [inch]	Joining	Approximate overall System [m]	Europe [m]
25-40	1-1½	Quick-Lock	5.5	3.0
50-125	2-5	Quick-Lock	6.15	5.85/9.0
150	6	Quick-Lock	6.1	5.85/9.0
200	8	Quick-Lock	6.1/11.8	5.85/9.0
250	10	Quick-Lock	6.1/11.8	5.85/11.89
300-400	12-16	Quick-Lock	6.05/11.8	5.85/11.89
450-1000	18-40	Taper/Taper	11.8	11.89

* Tolerance +/- 50 mm.

Πίνακας 4.5: Φυσικές ιδιότητες σωληνώσεων, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Pipe property	Units	Value	Method
Thermal conductivity pipe wall	W/(m K)	.33	Ameron
Thermal expansivity (lineair)	10 ⁻⁶ mm/mm °C	18.0	Ameron
Flow coefficient	Hazen-Williams	150	—
Absolute roughness	10 ⁻⁶ m	5.3	—
Density	kg/m ³	1800	—
Specific gravity	-	1.8	ASTM D-792

Πίνακας 4.6: Μηχανικές ιδιότητες σωληνώσεων, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Pipe property	IPD cured	Units	21°C.	93°C.	Method
Bi-axial					
Ultimate hoop stress at weeping		N/mm ²	300	—	ASTM D-1599
Circumferential					
Hoop tensile strength		N/mm ²	380	—	ASTM D-2290
Hoop tensile modulus		N/mm ²	23250	18100	ASTM D-2290
Poisson's ratio axial/hoop		—	0.93	1.04	Ameron
Longitudinal					
Axial tensile strength		N/mm ²	65	50	ASTM D-2105
Axial tensile modulus		N/mm ²	10000	7800	ASTM D-2105
Poisson's ratio hoop/axial		—	0.40	0.45	ASTM D-2105
Axial bending strength		—	80	—	Ameron
Beam					
Apparent elastic modulus		N/mm ²	9200	7000	ASTM D-2925
Hydrostatic Design Basis					
Static		N/mm ²	148*	—	ASTM D-2992 (Proc. B.)

Πίνακας 4.6 συνέχεια: Μηχανικές ιδιότητες σωληνώσεων, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Pipe property	MDA cured	Units	21°C.	93°C.	Method
Bi-axial					
Ultimate hoop stress at weeping		N/mm ²	250	—	ASTM D-1599
Circumferential					
Hoop tensile strength		N/mm ²	220	—	ASTM D-2290
Hoop tensile modulus		N/mm ²	25200		ASTM D-2290
Poisson's ratio axial/hoop		—	0.65	0.81	Ameron
Longitudinal					
Axial tensile strength		N/mm ²	80	65	ASTM D-2105
Axial tensile modulus		N/mm ²	12500	9700	ASTM D-2105
Poisson's ratio hoop/axial		—	0.40	0.44	ASTM D-2105
Axial bending strength		—	85	—	Ameron
Beam					
Apparent elastic modulus		N/mm ²	12500	8000	ASTM D-2925
Hydrostatic Design Basis					
Static		N/mm ²	124*	—	ASTM D-2992 (Proc. B.)

* At 65°C.

Στους πίνακες 4.7 και 4.8 δίνονται στοιχεία για την εσωτερική διάμετρο, το ελάχιστο πάχος και το βάρος των σωληνώσεων 2000M και 7000M αντίστοιχα. Στον πίνακα 4.9 δίνονται στοιχεία για την πίεση κατάρρευσης των σωληνώσεων.

Πίνακας 4.7: Διαστάσεις και βάρος σωληνώσεων 2000M, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Nominal Pipe Size		Pipe Inside Diameter	Minimum Struct. Wall Thickness [t]	Average Pipe Weight	Designation per ASTM D-2966	
[mm]	[inch]	[mm]	[mm]	[kg/m]	MDA	IPD
25	1	27.1	3.0	0.7	RTRP-11 FW1-2112	FX1-3112
40	1½	42.1	3.0	1.3	RTRP-11 FW1-2112	FX1-3112
50	2	53.0	3.1	1.3	RTRP-11FW1-2112	FX1-3112
80	3	81.8	3.1	1.8	RTRP-11FW1-2112	FX1-3112
100	4	105.2	4.1	3.1	RTRP-11FW1-2113	FX1-3113
125	5	131.9	4.1	3.5	RTRP-11FW1-2113	FX1-3113
150	6	159.0	4.1	4.6	RTRP-11FW1-2113	FX1-3113
200	8	208.8	5.5	7.4	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
250	10	262.9	7.0	12	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
300	12	313.7	8.3	17	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
400	14	337.6	9.0	19	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
400	16	385.8	10.3	25	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
450	18	433.8	11.5	32	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
500	20	482.1	12.8	39	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
600	24	578.6	15.4	56	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
700	28	700.0	18.7	75	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
750	30	750.0	20.0	93	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
800	32	800.0	21.4	102	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
900	36	900.0	24.0	132	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116
1000	40	1000.0	26.9	165	RTRP-11FW1-2116	FX1-3116

Πίνακας 4.8: Διαστάσεις και βάρος σωληνώσεων 7000M, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Nominal Pipe Size		Pipe Inside Diameter	Minimum Struct. Wall Thickness [t]	Average Pipe Weight		Designation per ASTM D-2966
[mm]	[inch]	[mm]	[mm]	[kg/m]	MDA	IPD
25	1	27.1	3.5	0.7	RTRP-11AW1-2112	AX1-3112
40	1½	42.1	3.5	1.3	RTRP-11AW1-2112	AX1-3112
50	2	53.0	3.6	1.3	RTRP-11AW1-2112	AX1-3112
80	3	81.8	3.6	1.8	RTRP-11AW1-2112	AX1-3112
100	4	105.2	4.6	3.1	RTRP-11AW1-2113	AX1-3113
125	5	131.9	4.6	3.5	RTRP-11AW1-2113	AX1-3113
150	6	159.0	4.6	4.6	RTRP-11AW1-2113	AX1-3113
200	8	208.8	5.5	7.4	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
250	10	262.9	7.0	12	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
300	12	313.7	8.3	17	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
350	14	337.6	9.0	19	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
400	16	385.8	10.3	25	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
450	18	433.8	11.5	32	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
500	20	482.1	12.8	39	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
600	24	578.6	15.4	56	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
700	28	700.0	18.7	75	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
750	30	750.0	20.0	93	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
800	32	800.0	21.4	102	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
900	36	900.0	24.0	132	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116
1000	40	1000.0	26.9	165	RTRP-11AW1-2116	AX1-3116

Πίνακας 4.9: Πίεση κατάρρευσης σωληνώσεων, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Ultimate collapse pressure (ultimate short term external failure pressure) at 21° C.

Nominal Pipe Size		Internal Pressure static*	2000M MDA	2000M IPD	7000M MDA	7000M IPD
[mm]	[inch]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]
25	1	16	491	491	714	714
40	1½	16	160	160	239	239
50	2	16	95	95	141	141
80	3	16	29	29	44	44
100	4	16	31	31	43	43
125	5	16	16.5	16.5	23	23
150	6	16	9.7	9.7	13.5	13.5
200	8	16	10.3	10.3	10.3	10.3
250	10	16	10.7	10.7	10.7	10.7
300	12	16	10.5	10.5	10.5	10.5
350	14	16	10.7	10.7	10.7	10.7
400	16	16	10.7	10.7	10.7	10.7
450	18	16	10.5	10.5	10.5	10.5
500	20	16	10.6	10.6	10.6	10.6
600	24	16	10.7	10.7	10.7	10.7
700	28	16	10.8	10.8	10.8	10.8
750	30	16	10.7	10.7	10.7	10.7
800	32	16	10.8	10.8	10.8	10.8
900	36	16	10.7	10.7	10.7	10.7
1000	40	16	11.0	11.0	11.0	11.0

* Up to 93°C.

Στον πίνακα 4.10 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες τιμές των μέγιστων αποστάσεων μεταξύ των στηρίξεων των σωληνώσεων 2000M και 7000M, υπολογισμένες για σωληνώσεις γεμάτες με νερό αλλά χωρίς βαριά εξαρτήματα (βαλβίδες, φλάντζες)

Πίνακας 4.10: Απόσταση μεταξύ των στηρίξεων σωληνώσεων 2000M και 7000M, Ameron
Bondstrand Product Guide 2007

Bondstrand 2000M.

Nominal Pipe Size		Single Span*	MDA Continuous Span*	Single Span*	IPD Continuous Span*
[mm]	[inch]	[m]	[m]	[m]	[m]
25	1	2.6	3.3	2.4	3.0
40	1½	2.9	3.7	2.7	3.4
50	2	3.1	4.0	2.9	3.7
80	3	3.5	4.5	3.3	4.2
100	4	4.0	5.1	3.7	4.7
125	5	4.3	5.4	4.0	5.0
150	6	4.5	5.7	4.2	5.3
200	8	5.1	6.5	4.8	6.1
250	10	5.8	7.3	5.3	6.8
300	12	6.3	8.0	5.8	7.4
350	14	6.5	8.3	6.0	7.7
400	16	7.0	8.8	6.4	8.2
450	18	7.4	9.3	6.8	8.7
500	20	7.7	9.8	7.2	9.1
600	24	8.5	10.8	7.9	10.0
700	28	9.3	11.8	8.6	11.0
750	30	9.6	12.2	8.9	11.3
800	32	10.0	12.7	9.2	11.7
900	36	10.5	13.4	9.8	12.4
1000	40	11.1	14.1	10.3	13.1

Bondstrand 7000M.

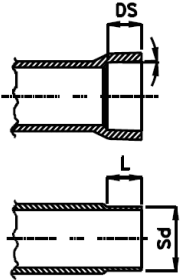
		MDA	IPD
25	1	2.5	3.0
40	1½	2.9	3.4
50	2	3.1	3.7
80	3	3.5	4.2
100	4	4.0	4.7
125	5	4.3	5.0
150	6	4.5	5.3
200	8	5.0	5.9
250	10	5.7	6.7
300	12	6.2	7.3
350	14	6.4	7.6
400	16	6.9	8.1
450	18	7.3	8.6
500	20	7.7	9.0
600	24	8.4	9.9
700	28	9.3	10.9
750	30	9.6	11.3
800	32	9.9	11.7
900	36	10.5	12.4
1000	40	11.1	13.0

4.3 Ενδεικτικές διαστάσεις εξαρτημάτων σωληνώσεων FRP για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον

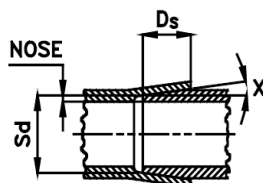
Θα παραθέσουμε στην συνέχεια καταλόγους από Ameron Bondstrand Product Guide (2007) με διαστάσεις ενδεικτικών εξαρτημάτων των σωληνώσεων FRP (ινών γυαλιού και εποξικής ρητίνης) που αναφέραμε και στο προηγούμενο εδάφιο (2000M, 7000M) και προορίζονται για εφαρμογές σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Στον πίνακα 4.11 παρουσιάζονται οι διαστάσεις για δύο τύπους ενώσεων με κόλληση (adhesive bonding), ο πρώτος (Quick lock) αφορά ένωση όπου μόνο το θηλυκό τεμάχιο (bell) δεν έχει εσωτερική κωνικότητα, ενώ ο δεύτερος τύπος (taper/taper) αφορά ένωση όπου και τα δύο τεμάχια έχουν κωνικότητα.

Πίνακας 4.11: Διαστάσεις ενώσεων σωληνώσεων, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Quick-Lock® dimensions		Nominal Length	Pipe	Insertion	Spigot Diameter	Spigot		
	Max. Size			(Ds)	Sd	L		
		[mm]	[inch]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
	25		1	27	32.6	32.9	28.5	31.0
	40		1½	32	47.5	47.8	33.5	36.0
	50		2	46	59.2	59.6	49.0	52.0
	80		3	46	87.6	88.0	49.0	52.0
	100		4	46	112.5	112.9	49.0	52.0
	125		5	57	139.5	139.9	58.5	61.5
	150		6	57	166.2	166.6	59.0	62.0
	200		8	64	217.1	217.5	65.0	68.0
	250		10	70	271.3	271.7	71.0	74.0
	300		12	76	322.2	322.6	78.0	81.0
	350		14	89	353.8	354.2	89.0	93.0
	400		16	102	404.1	404.5	103.0	106.0
Dimensions for Quick-Lock Spigots for bonding HD Flanges.							Dia of Straight Spigot [Sd]	
	450		18	111				455.8
	500		20	111				506.6
	600		24	127				608.2
	700		28	152				736.3
	750		30	165				788.4
	800		32	178				840.5
	900		36	163				943.4
	1000		40	230				1051.4

Taper/Taper dimensions

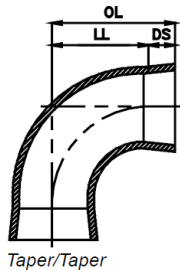
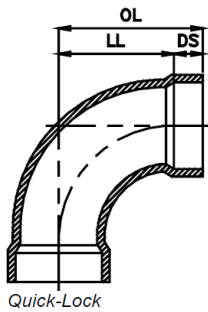


Dimensions for adhesive Taper spigots for adhesive Taper/Taper joints.						
Nominal Pipe Size		Taper Angle	Insertion Depth	Nominal Spigot Nose Thickn. nose	Dia of Spigot at Nose Sd	
		X	Ds			
		[degrees]	[mm]	[mm]	[mm]	
450	18	2.5	114	4.6	443.0	
500	20	2.5	127	5.0	492.2	
600	24	3.5	178	3.8	586.3	
700	28	1.75	178	6.4	712.9	
750	30	1.75	178	4.2	758.4	
800	32	1.75	178	8.9	817.8	
900	36	1.75	203	5.6	911.3	
1000	40	1.75	410	8.1	1016.3	

Στους πίνακες 4.12, 4.13 και 4.14 παρουσιάζονται τυπικές διαστάσεις, πιέσεις λειτουργίας και βάρη για εξαρτήματα γωνιών 90, 45 και 22.5 μοιρών αντίστοιχα.

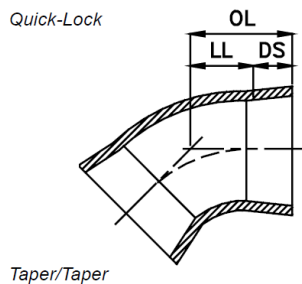
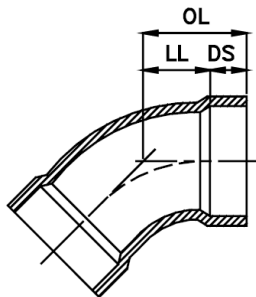
Πίνακας 4.12: Χαρακτηριστικά γωνίας 90 μοιρών, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Elbows 90°		Filament-wound 90° elbows with integral Quick-Lock (1-16 inch) or Taper/Taper (18-40 inch) socket ends for adhesive bonding.				
Nominal Pipe Size [mm]	[inch]	Laying Length (LL) [mm]	Overall Length (OL) [mm]	Max. Working Pressure [bar]	Average Weight [kg]	
						DS
25	1	65	92	20	0.3	
40	1½	81	113	20	0.4	
50	2	76	122	20	0.5	
80	3	114	160	20	1.1	
100	4	152	198	20	1.6	
125	5	195	252	16	2.7	
150	6	229	286	16	3.6	
200	8	305	369	16	6.8	
250	10	381	451	16	11.0	
300	12	457	533	16	18.0	
350	14	359	448	16	26.0	
400	16	397	499	16	31.0	
450	18	458	572	16	53.0	
500	20	508	635	16	65.0	
600	24	584	762	16	122.0	
700	28	711	889	16	205.0	
750	30	762	940	16	243.0	
800	32	813	991	16	330.0	
900	36	915	1118	16	417.0	
1000	40	1040	1450	16	489.0	



Πίνακας 4.13: Χαρακτηριστικά γωνίας 45 μοιρών, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

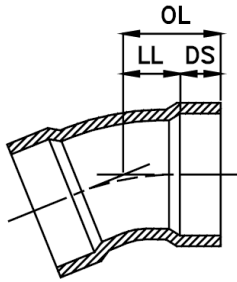
Elbows 45°		Filament-wound 45° Quick-Lock (1-16 inch) or Taper/Taper (18-40 inch) socket ends for adhesive bonding.				
Nominal Pipe Size [mm]	[inch]	Laying Length (LL) [mm]	Overall Length (OL) [mm]	Maximum Working Pressure [bar]	Average Weight [kg]	
						DS
25	1	22	49	16	0.2	
40	1½	29	61	16	0.3	
50	2	35	81	16	0.4	
80	3	51	97	16	0.8	
100	4	64	110	16	1.1	
125	5	84	141	16	1.8	
150	6	95	152	16	2.4	
200	8	127	191	16	4.3	
250	10	159	229	16	7.3	
300	12	191	267	16	11.0	
350	14	121	210	16	17.0	
400	16	137	239	16	20.0	
450	18	191	305	16	33.0	
500	20	210	337	16	40.0	
600	24	252	430	16	82.0	
700	28	295	473	16	140.0	
750	30	322	500	16	164.0	
800	32	337	515	16	283.0	
900	36	400	603	16	283.0	
1000	40	450	860	16	334.0	



Πίνακας 4.14: Χαρακτηριστικά γωνίας 22.5 μοιρών, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Elbows 22½°

Filament-wound 22½°elbows with integral Quick-Lock socket ends for adhesive bonding.



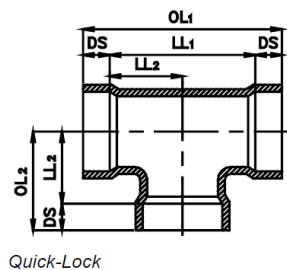
Nominal Pipe Size	[mm]	[inch]	Laying Length (LL) [mm]	Overall Length (OL) [mm]	Maximum Working Pressure [bar]	Average Weight [kg]
25		1	9	36	16	0.1
40		1½	9	41	16	0.2
50		2	13	59	16	0.5
80		3	21	67	16	0.7
100		4	29	75	16	1.0
125		5	43	100	16	1.4
150		6	43	100	16	1.9
200		8	57	121	16	3.9
250		10	67	137	16	5.9
300		12	76	152	16	10.4
350		14	83	172	16	12.0
400		16	89	191	16	14.0

Στους πίνακες 4.15 και 4.16 παρουσιάζονται τυπικές διαστάσεις, πιέσεις λειτουργίας και βάρη για διάφορα εξαρτήματα τύπου Tees (T).

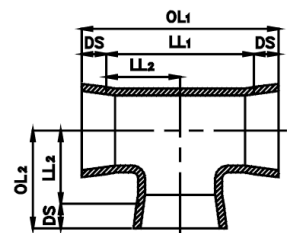
Πίνακας 4.15: Χαρακτηριστικά T τύπου Equal Tees, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Equal Tees

Filament-wound equal Tee with integral Quick-Lock (1-16 inch) or Taper/Taper (18-40 inch) socket ends for adhesive bonding.



Quick-Lock



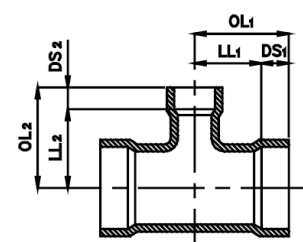
Taper/Taper

Nominal Pipe Size	[mm]	[inch]	Laying Length total run (LL1) [mm]	Overall Length total run (OL1) [mm]	Laying Length branch (LL2) [mm]	Overall Length branch (OL2) [mm]	Maximum Working Pressure [bar]	Average Weight [kg]
25		1	54	108	27	54	16	0.2
40		1½	60	124	30	62	16	0.4
50		2	128	220	64	110	16	1.0
80		3	172	264	86	132	16	1.8
100		4	210	302	105	151	16	2.5
125		5	254	368	127	184	16	5.0
150		6	286	400	143	200	16	6.7
200		8	356	484	178	242	16	10.0
250		10	432	572	216	286	16	18.0
300		12	508	660	254	330	16	29.0
350		14	534	712	267	356	16	37.0
400		16	584	788	292	394	16	56.0
450		18	648	876	324	438	16	69.0
500		20	712	966	356	483	16	92.0
600		24	838	1194	419	597	16	168.0
700		28	964	1320	482	660	16	285.0
750		30	1016	1372	508	686	16	337.0
800		32	1090	1446	545	723	16	459.0
900		36	1220	1626	610	813	16	581.0
1000		40	1416	2236	708	1118	16	686.0

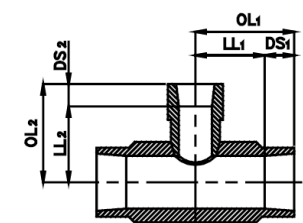
Πίνακας 4.16: Χαρακτηριστικά T τύπου Reducing Tees, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Reducing Tees

Filament-wound standard and fabricated reducing tees with integral Quick-Lock (1-16 inch) socket ends for adhesive bonding.



Standard



Fabricated

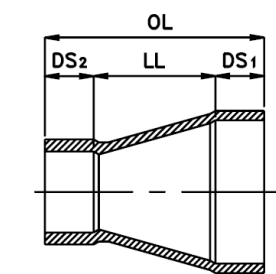
Nominal Pipe Size (runxrunxbranch)	Laying Length (LL1) half run	Overall Length (OL1) half run	Laying Length (LL2) branch	Overall Length (OL2) branch	Maximum Working Pressure [bar]	Average Weight [kg]	
							[mm]
40x40x25	1½x1½x1	30	62	30	57	20	0.6
50x50x25	2x2x1	64	110	57	84	20	0.9
50x50x40	2x2x1½	64	110	57	89	20	1.0
80x80x25	3x3x1	86	132	76	103	20	1.6
80x80x40	3x3x1½	86	132	76	108	20	1.6
80x80x50	3x3x2	86	132	76	122	20	1.7
100x100x25	4x4x1	72	118	194	221	20	7.5
100x100x40	4x4x1½	89	136	194	226	20	9.0
100x100x50	4x4x2	105	151	89	135	20	2.1
100x100x80	4x4x3	105	151	98	144	20	2.3
125x125x50	5x5x2	127	184	102	148	16	3.4
125x125x80	5x5x3	127	184	111	157	16	4.0
125x125x100	5x5x4	127	184	118	164	16	4.6
150x150x25	6x6x1	83	140	221	248	16	11.7
150x150x40	6x6x1½	101	158	221	253	16	13.8
150x50x50	6x6x2	143	200	114	160	16	5.4
150x150x80	6x6x3	143	200	124	170	16	6.0
150x150x100	6x6x4	143	200	130	176	16	6.2
150x150x125	6x6x5	143	200	136	193	16	6.5
200x200x25	8x8x1	84	148	245	272	16	15.0
200x200x40	8x8x1½	101	165	246	278	16	17.5
200x200x50	8x8x2	116	180	246	292	16	19.9
200x200x80	8x8x3	178	242	149	195	16	9.1
200x200x100	8x8x4	178	242	162	208	16	9.7
200x200x125	8x8x5	178	242	168	225	16	10.6
200x200x150	8x8x6	178	242	168	225	16	11.4
250x250x25	10x10x1	83	153	273	300	16	18.1
250x250x40	10x10x1½	100	170	273	305	16	21.0
250x250x50	10x10x2	115	185	273	320	16	24.0
250x250x80	10x10x3	115	185	273	320	16	24.0
250x250x100	10x10x4	216	286	184	230	16	14.8
250x250x125	10x10x5	216	286	194	251	16	15.2
250x250x150	10x10x6	216	286	194	251	16	15.5
250x250x200	10x10x8	216	286	203	267	16	16.5
300x300x25	12x12x1	84	160	298	325	16	21.2
300x300x40	12x12x1½	102	178	298	330	16	25.0
300x300x50	12x12x2	117	193	298	344	16	29.0
300x300x80	12x12x3	117	193	298	344	16	29.0
300x300x100	12x12x4	254	330	206	252	16	21.0
300x300x150	12x12x6	254	330	219	276	16	22.0
300x300x200	12x12x8	254	330	229	293	16	23.0
300x300x250	12x12x10	254	330	241	311	16	24.0
350x350x25	14x14x1	81	170	314	341	16	24.0
350x350x40	14x14x1½	99	188	314	346	16	28.0
350x350x50	14x14x2	114	203	314	361	16	31.0
350x350x80	14x14x3	114	203	314	361	16	31.0
350x350x100	14x14x4	114	203	314	361	16	31.0
350x350x150	14x14x6	267	356	244	301	16	29.0
350x350x200	14x14x8	267	356	254	318	16	30.0
350x350x250	14x14x10	267	356	267	337	16	32.0
350x350x300	14x14x12	267	356	279	355	16	34.0
400x400x25	16x16x1	85	187	338	365	16	29.0
400x400x40	16x16x1½	103	205	338	370	16	33.0
400x400x50	16x16x2	118	220	338	384	16	37.0
400x400x80	16x16x3	118	220	338	384	16	37.0
400x400x100	16x16x4	118	220	338	384	16	37.0
400x400x150	16x16x6	292	394	264	321	16	37.0
400x400x200	16x16x8	292	394	273	337	16	38.0
400x400x250	16x16x10	292	394	283	353	16	41.0
400x400x300	16x16x12	292	394	295	371	16	45.0
400x400x350	16x16x14	292	394	292	381	16	49.0

Στους πίνακες 4.17 και 4.18 παρουσιάζονται τυπικές διαστάσεις, πιέσεις λειτουργίας και βάρη για μειωτήρες και φλάντζες αντίστοιχα.

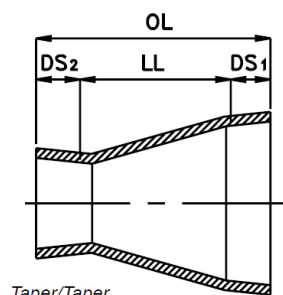
Πίνακας 4.17: Χαρακτηριστικά μειωτήρων, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Concentric Reducers

Filament-wound concentric reducers with integral Quick-Lock (1-16 inch) or Taper/Taper (18-40 inch) socket ends.



Quick-Lock



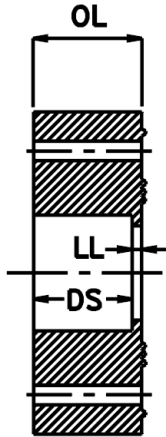
Taper/Taper

Nominal Pipe Size (run/run)		Laying Length (LL)	Overall Length (OL)	Maximum Working Pressure	Average Weight
[mm]	[inch]	[mm]	[mm]	[bar]	[kg]
40x25	1½x1	32	91	16	0.2
50x25	2x1	64	137	16	0.3
50x40	2x1½	32	110	16	0.5
80x40	3x1½	76	154	16	0.5
80x50	3x2	54	146	16	0.5
100x50	4x2	76	168	16	1.1
100x80	4x3	73	165	16	0.9
125x80	5x3	74	177	16	1.4
125x100	5x4	74	177	16	1.5
150x80	6x3	97	200	16	1.8
150x100	6x4	94	197	16	1.8
150x125	6x5	110	224	16	1.8
200x100	8x4	138	248	16	2.9
200x125	8x5	126	247	16	2.8
200x150	8x6	98	219	16	2.7
250x150	10x6	117	244	16	3.7
250x200	10x8	105	239	16	3.6
300x200	12x8	149	289	16	5.0
300x250	12x10	137	283	16	4.6
350x250	14x10	184	343	16	7.2
350x300	14x12	178	343	16	7.3
400x300	16x12	165	343	16	8.9
400x350	16x14	152	343	16	9.0
450x400	18x16	103	319	16	12.7
500x400	20x16	225	454	16	22.6
500x450	20x18	123	364	16	18.9
600x400	24x16	453	733	16	48.4
600x450	24x18	353	645	16	44.3
600x500	24x20	230	535	16	38.5
700x400	28x16	765	1045	16	79.0
700x450	28x18	661	953	16	74.0
700x500	28x20	542	847	16	69.0
700x600	28x24	311	667	16	67.3
750x400	30x16	876	1156	16	111.6
750x450	30x18	775	1067	16	106.6
750x500	30x20	653	958	16	99.6
750x600	30x24	422	778	16	87.2
750x700	30x28	111	467	16	57.2
800x400	32x16	1023	1303	16	139.4
800x450	32x18	920	1212	16	125.4
800x500	32x20	798	1103	16	108.8
800x600	32x24	570	926	16	94.3
800x700	32x28	259	615	16	81.8
800x750	32x30	148	504	16	70.9
900x500	36x20	1029	1359	16	210.0
900x600	36x24	799	1180	16	176.1
900x700	36x28	487	868	16	140.2
900x750	36x30	375	756	16	125.9
1000x900	40x36	285	898	16	182.0

Πίνακας 4.18: Χαρακτηριστικά φλαντζών, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Heavy-Duty Flanges

Filament-wound Heavy-Duty flanges with integral Quick-Lock (1-40 inch) socket end.



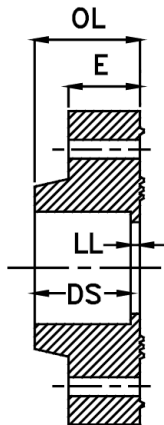
Nominal Pipe Size	Laying Length (LL)		Overall Length (OL)	Maximum Working Pressure	Average weight		DIN 2632/DIN 2633	
	[mm]	[inch]			ANSI B16.5 CL.150	ANSI B16.5 CL.300	PN10	PN16
25	3	1	29	16	0.5	0.6	0.5	0.5
40	3	1½	35	16	1.1	1.1	1.0	1.0
50	4	2	51	16	1.3	1.7	1.8	1.8
80	5	3	51	16	1.8	2.6	2.4	2.4
100	5	4	51	16	2.8	3.8	2.7	2.7
125	5	5	62	16	3.8	5.4	4.0	4.0
150	6	6	63	16	4.5	6.7	4.9	4.9
200	6	8	70	16	5.0	9.9	7.1	6.9
250	6	10	76	16	9.5	13.2	9.1	9.8
300	5	12	81	16	14.5	19.2	11.2	12.7
350	8	14	97	16	20.5	29.8	18.6	20.5
400	8	16	110	16	27.0	40.0	25.0	27.4
450	10	18	114	16	32.0	-	-	-
500	10	20	121	16	40.0	-	-	-
600	11	24	138	16	58.0	-	-	-
700	14	28	165	16	73.0	-	-	-
750	14	30	178	16	88.0	-	-	-
800	14	32	192	16	112.0	-	-	-
900	14	36	178	16	116.0	-	-	-
1000	15	40	245	16	162.0	-	-	-

Note: Other drillings may be possible. Please consult Ameron.

- 1) Full-face elastomeric gaskets may be used suitable for the service pressure, service temperature and fluid. Shore A durometer hardness of 60 +5 is recommended (3 mm thick). Compressed fibre gaskets (3 mm thick), compatible with pressure, temperature and medium may also be used. Mechanical properties should be in accordance with DIN 3754 (IT 400) or equal.
- 2) For maximum bolt torque refer to the appropriate Bondstrand literature. A torque-wrench must be used, since excessive torque may result in flange damage.
- 3) Size 18-40 inch can be bonded directly to a fitting by using a Quick-Lock to Taper/Taper transition nipple. For bonding to pipe, a Quick Lock (straight) spigot has to be shaved on the pipe.

Hub Flanges

Filament-wound Hubbed flanges with integral Quick-Lock (1-36 inch) socket end.



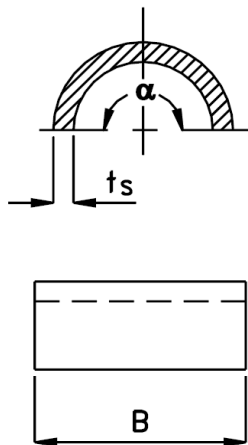
Nominal Pipe Size	Laying Length (LL)		Overall Length (OL)	Flange Thickness (E)	Maximum Working Pressure	Average weight		DIN 2632	
	[mm]	[inch]				ANSI B16.5 CL.150	ANSI B16.5 CL.300	PN10	PN16
50	4	2	51	30	12	0.9	1.1	1.0	1.0
80	5	3	51	30	12	1.5	1.8	1.6	1.1
100	5	4	51	33	12	2.2	2.9	2.1	2.1
125	5	5	62	47	12	3.7	4.9	3.6	3.6
150	6	6	63	47	12	3.7	5.4	3.9	3.9
200	6	8	70	54	12	6.2	8.4	6.0	6.0
250	6	10	76	54	12	8.4	11.1	7.6	8.2
300	5	12	81	56	12	12.3	15.3	9.0	10.2
350	8	14	97	72	12	17.3	22.6	14.1	15.5
400	8	16	110	85	12	26.0	32.9	20.6	22.6
450	10	18	114	89	12	30.0	-	-	-
500	10	20	121	96	12	35.0	-	-	-
600	11	24	138	113	12	48.0	-	-	-
700	14	28	165	114	12	67.0	-	-	-
750	14	30	178	121	12	77.0	-	-	-
800	14	32	192	124	12	85.0	-	-	-
900	14	36	178	140	12	93.0	-	-	-

Στον πίνακα 4.19 παρουσιάζονται τυπικές διαστάσεις και στοιχεία για «κολάρα» που χρησιμοποιούνται σε στηρίξεις και αγκυρώσεις και για «κολάρα» που χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται γείωση της σωλήνωσης.

Πίνακας 4.19: Χαρακτηριστικά «κολάρων» στήριξης και γείωσης, Ameron Bondstrand Product Guide 2007

Support Saddles

Filament-wound pipe saddles for wear, support and anchor.



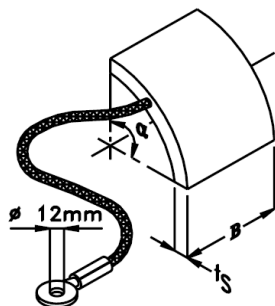
Nominal Pipe Size	Saddle Angle α	Saddle Thickn. t_s	Saddle Weight	Required Adhesive Kits	Saddle Weight B=150mm	Required Adhesive Kits
[mm]	[inch]	[degree]	[mm]	[3 and 6Oz]	[kg]	[3 and 6 Oz]
25	1	180	14	1	0.3	1
40	1½	180	14	1	0.5	1
50	2	180	14	1	0.6	1
80	3	180	14	1	0.8	1
100	4	180	14	1	1.1	1
125	5	180	14	1	1.2	1
150	6	180	14	1	1.4	1
200	8	180	14	1	1.7	1
250	10	180	14	1	2.3	2
300	12	180	14	1	2.7	2
350	14	180	14	1	3.0	2
400	16	180	14	2	3.6	3
450	18	180	16	-	3.2	2
500	20	180	16	-	3.6	2
600	24	180	16	-	4.3	2
700	28	180	16	-	5.1	3
750	30	180	16	-	5.5	3
800	32	180	16	-	5.8	3
900	36	180	16	-	6.5	4
1000	40	180	16	-	8.2	4

Notes:

- 1) Filament-wound support saddles are intended for protection of pipe at supports and clamps, as well as for anchoring purposes. Support and anchor saddles are standard 180°. Saddles are supplied in standard lengths of 100 mm and 150 mm.
- 2) For special saddle -lengths, -thickness and/or angles consult Ameron.
- 3) Wear saddles are standard 90°. Weights of 90° degree saddles are 50% of value shown.

Grounding Saddles

Filament-wound pipe saddles for grounding in conductive piping systems.



Nominal Pipe Size	Saddle Angle α	Saddle Length B	Saddle Thickness t_s	Average Saddle Weight	Required Adhesive Kits
[mm]	[inch]	[mm]	[mm]	[kg]	[3Oz]
25	1	76	14	0.1	1
40	1½	76	14	0.1	1
50	2	76	14	0.1	1
80	3	76	14	0.1	1
100	4	76	14	0.2	1
125	5	76	14	0.3	1
150	6	76	14	0.3	1
200	8	76	14	0.2	1
250	10	76	14	0.2	1
300	12	76	14	0.2	1
350	14	76	14	0.3	1
400	16	76	14	0.3	1
450	18	76	16	0.2	1
500	20	76	16	0.2	1
600	24	76	16	0.3	1
700	28	76	16	0.3	2
750	30	76	16	0.4	2
800	32	76	16	0.4	3
900	36	76	16	0.4	3
1000	40	76	16	0.5	3

Notes:

- 1) Bondstrand conductive adhesive should be used for mounting.
- 2) Saddles are supplied with integrated stainless steel cable with a length of 600 mm.

4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σωληνώσεων από FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον

Θα συνοψίσουμε τα βασικά πλεονεκτήματα που καθιστούν τις σωληνώσεις από FRP και γενικά την χρήση σύνθετων υλικών στην ναυπηγική μια ρεαλιστική τεχνικά και ανταγωνιστική οικονομικά επιλογή σε σχέση με τις χαλύβδινες. Θα παρουσιάσουμε ωστόσο και τα βασικά μειονεκτήματα που περιορίζουν ακόμα την χρήση FRP στις σωληνώσεις θαλασσιών εφαρμογών και γενικότερα των σύνθετων υλικών στην ναυπηγική.

πλεονεκτήματα

- Υψηλότερη αντίσταση στη διάβρωση και την θαλάσσια ρύπανση σε σχέση με τις μεταλλικές σωληνώσεις που οδηγούν σε μειωμένες ανάγκες και κόστη συντήρησης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της σωλήνωσης FRP που εξηγεί και το χαμηλότερο συνολικό κόστος κατά την διάρκεια ζωής του πλοίου σε σχέση με τις σωληνώσεις από συμβατικά μεταλλικά υλικά
- Μεγάλη αντοχή των σωληνώσεων από FRP λόγω των ινών γυαλιού και ανώτερες ειδικές ιδιότητες (ειδική αντοχή, ειδική δυσκαμψία) σε σχέση με το χάλυβα και τα συμβατικά μεταλλικά υλικά
- Πολύ μικρότερο βάρος μιας σωλήνωσης από FRP (από 12.5% έως 25% του βάρους μιας μεταλλικής σωλήνωσης) και γενικά μικρότερο βάρος των σύνθετων υλικών σε σχέση με τα συμβατικά μεταλλικά υλικά
- Καλή συμπεριφορά γενικά των σύνθετων υλικών σε κόπωση, κρούση, διάδοση ρωγμών και στην απόσβεση ταλαντώσεων (ηχομόνωση)
- Αυξημένη ευελιξία γενικά κατά τον σχεδιασμό των σύνθετων υλικών λόγω της δυνατότητας επιλογής μέσα από ένα μεγάλο εύρος σύνθετων υλικών και μεθόδων κατασκευής και δυνατότητα κατασκευής στοιχείων με σύνθετη γεωμετρία.
- Μικρότερο κόστος εγκατάστασης των σωληνώσεων FRP, αφού η μέθοδος ένωσης σωληνώσεων FRP με κόλληση είναι πιο εύκολη, γρήγορη, μαθαίνεται γρήγορα στο προσωπικό και καταργεί την ανάγκη για εξειδικευμένους και ακριβούς συγκολλητές και μεθόδους συγκόλλησης. Επίσης δεν απαιτείται βαρύς και ακριβός μηχανισμός εγκατάστασης λόγω του μικρότερου βάρους της σωλήνωσης FRP. Όπως εκτιμάται (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012) το κόστος εγκατάστασης της σωλήνωσης FRP είναι μικρότερο κατά 30-40% σε σχέση με τις χαλύβδινες. Το παραπάνω οδηγεί σε συγκρίσιμο αρχικό συνολικό κόστος με μια σωλήνωση ανθρακούχου χάλυβα.
- Το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε σχέση με τις χαλύβδινες σωληνώσεις, λόγω των μικρότερων τριβών που οδηγούν σε μικρότερη απώλεια ενέργειας στην FRP σωλήνωση
- Η εξοικονόμηση χρόνου που προσφέρει η δυνατότητα να γίνουν επισκευές στη σωλήνωση από FRP χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του πλοίου, καθώς δεν απαιτούνται συγκολλήσεις.

μειονεκτήματα

- χαμηλή αντοχή σε φωτιά συγκριτικά με τα συμβατικά μεταλλικά υλικά που οδηγούν και σε πιο αυστηρούς περιορισμούς από τους κανονισμούς των Νηογνομόνων στην χρήση σωληνώσεων από FRP στα πλοία
- Υψηλά επίπεδα ερπυσμού και μικρή αντίσταση σε μηχανικές φθορές
- κίνδυνοι αστοχίας στους συνδέσμους των σωληνώσεων σε περιπτώσεις ανεπαρκούς σύσφιξης των αγκυρωμένων
- προβλήματα στην μακροχρόνια αντοχή μέσα σε ένα εύρος δύσκολων περιβαλλοντικών συνθηκών (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον)
- πιο σύνθετη σχεδίαση λόγω των ανισοτροπικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών
- ανεπάρκειες σε σχεδιαστικούς κανόνες, τυποποίηση και βάσεις δεδομένων
- υψηλότεροι συντελεστές ασφαλείας που μειώνουν το πλεονέκτημα του χαμηλού βάρους
- αδυναμία καθορισμού με απλή ανάλυση των μορφών αστοχίας κατασκευών από σύνθετα υλικά υπό κρούση, έκρηξη και φωτιά
- απουσία μεγάλης βάσης δεδομένων που να παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες στα Ναυπηγεία για το κόστος κατασκευής των σωληνώσεων πλοίου από FRP
- Αδύνατη ή περίπλοκη η επισκευή γενικά των στοιχείων από FRP

Κεφάλαιο 5

Κανονισμοί για χρήση σωληνώσεων από σύνθετο υλικό σε θαλάσσιο περιβάλλον

5.1 Εισαγωγή

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι κανονισμοί τεσσάρων Νηογνώμωνων για την χρήση σωληνώσεων FRP σε θαλάσσιο περιβάλλον. Η παρουσίαση των κανονισμών ακολουθεί την δομή των κανονισμών που αφορούν την χρήση σωληνώσεων FRP σε πλοία και έχει επιλεγθεί να γίνεται ακολουθώντας έναν Νηογνώμονα (ABS) και να επισημαίνονται οι όποιες διαφορές από τους υπόλοιπους Νηογνώμονες.

Οι γενικές απαιτήσεις σχεδίασης των Νηογνώμωνων για μεταλλικές σωληνώσεις και ειδικά για σωληνώσεις από σύνθετο υλικό σε θαλάσσιες εφαρμογές ταυτίζονται με τις αντίστοιχες απαιτήσεις για σωληνώσεις πλοίων. Όπου υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις θα επισημαίνεται. Τυχόν προσθήκες ή διαφοροποιήσεις από IMO Resolution A.753 (18) που είναι οδηγίες για την χρήση σωληνώσεων FRP σε πλοία, θα επισημαίνονται επίσης.

5.2 Κανονισμοί νηογνώμωνων για χρήση σωληνώσεων από σύνθετο υλικό σε πλοία

Οι κανονισμοί Νηογνώμωνων για χρήση σωληνώσεων από σύνθετο υλικό σε πλοία, που μελετήθηκαν, είναι οι εξής: American Bureau of Shipping 2015, Bureau Veritas 2014, Det Norske Veritas 2014, Lloyd's Register 2014. Η παρουσίαση των βασικών κανονισμών για την χρήση πλαστικών σωληνώσεων σε πλοία γίνεται ακολουθώντας την δομή του American Bureau of Shipping 2015 με προσθήκες από τους υπόλοιπους Νηογνώμονες, όπου υπάρχουν διαφορές ή παραπάνω αναφορές. Αρχικά παραθέτουμε κάποιες γενικές επισημάνσεις και κατηγοριοποιήσεις που θέτουν οι κανονισμοί γενικά για τις σωληνώσεις:

Ως πίεση σχεδίασης θεωρείται η πίεση για την οποία σχεδιάστηκε το κάθε μέρος της σωλήνωσης και δεν μπορεί να είναι μικρότερη από την πίεση στην πιο δύσκολη κατάσταση (εσωτερική ή εξωτερική πίεση και θερμοκρασία) που μπορεί να συμβεί κατά την διάρκεια λειτουργίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις η πίεση σχεδίασης μπορεί να είναι και υψηλότερη από την μέγιστη αναμενόμενη πίεση λειτουργίας (σωληνώσεις που μεταφέρουν θερμαινόμενο καύσιμο). Ως μέγιστη επιτρεπτή πίεση λειτουργίας ορίζεται η μέγιστη πίεση ενός συστήματος σωληνώσεων που καθορίζεται από το πιο αδύναμο εξάρτημα της σωλήνωσης ή την βαλβίδα εκτόνωσης (relief valve). Η μέγιστη επιτρεπτή πίεση λειτουργίας δεν μπορεί να ξεπερνά την πίεση σχεδίασης.

Ως θερμοκρασία σχεδίασης ορίζεται η μέγιστη θερμοκρασία για την οποία σχεδιάστηκε να λειτουργεί το κάθε μέρος της σωλήνωσης και δεν μπορεί να είναι μικρότερη από την θερμοκρασία στην πιο δύσκολη κατάσταση (εσωτερική ή εξωτερική πίεση και θερμοκρασία)

που μπορεί να συμβεί κατά την διάρκεια λειτουργίας. Η μέγιστη θερμοκρασία του ρευστού στην σωλήνωση θεωρείται ότι ταυτίζεται με την θερμοκρασία σχεδίασης. Για συστήματα σωληνώσεων που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, θα πρέπει η θερμοκρασία σχεδίασης να περιλαμβάνει και την ελάχιστη θερμοκρασία για την οποία σχεδιάστηκε να λειτουργεί το κάθε μέρος της σωλήνωσης και δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία στην πιο δύσκολη κατάσταση (εσωτερική ή εξωτερική πίεση και θερμοκρασία) που μπορεί να συμβεί κατά την διάρκεια λειτουργίας. Η ελάχιστη θερμοκρασία του ρευστού στην σωλήνωση θεωρείται ότι ταυτίζεται με την θερμοκρασία σχεδίασης. Για όλες τις σωληνώσεις, η θερμοκρασία σχεδίασης χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό των επιτρεπτών τάσεων και των απαιτήσεων δοκιμής των υλικών.

Εύφλεκτα ρευστά θεωρούνται όλα τα ρευστά που μπορούν να υποστηρίξουν φλόγα ανεξαρτήτως του σημείου ανάφλεξής τους (aviation fuel, diesel fuel, heavy fuel oil, lubricating oil and hydraulic oil). Τοξικά ρευστά θεωρούνται όλα τα ρευστά που είναι ικανά να προκαλέσουν θάνατο ή σοβαρό τραυματισμό ή να βλάψουν την ανθρώπινη υγεία σε περίπτωση κατάποσης ή εισπνοής ή επαφής με το δέρμα. Διαβρωτικά ρευστά, εκτός από το θαλασσινό νερό, θεωρούνται αυτά που στην αρχική τους κατάσταση μπορούν μέσω χημικής δράσης να προκαλέσουν βλάβη ερχόμενα σε επαφή με ζωντανούς ιστούς, το πλοίο ή το φορτίο του, όταν για κάποιο λόγο διαφύγουν του περιορισμού τους.

Τα συστήματα σωληνώσεων κατηγοριοποιούνται από τους κανονισμούς σε κλάσεις ανάλογα με την λειτουργία τους, την πίεση και θερμοκρασία σχεδίασης όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 5.2. Κάθε κλάση έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις για την σχεδίαση των ενώσεων, την κατασκευή και τις δοκιμές των εξαρτημάτων της σωλήνωσης που απαιτούνται. Όπως αναφέρεται σε Lloyd's Register 2014, οι σωληνώσεις από σύνθετο υλικό και τα εξαρτήματά τους γενικά γίνονται αποδεκτά σε σωληνώσεις 3^{ης} κλάσης, ενώ η χρήση σύνθετου υλικού σε σωληνώσεις που απαιτούν 2^η και 1^η κλάση θα εξεταστεί ειδικά. Οι απαιτήσεις πιστοποίησης των σωληνώσεων των διαφόρων κλάσεων από τους Νηογνώμονες φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Κλάσεις και πιστοποίηση σωληνώσεων, American Bureau of Shipping 2015

<i>Piping Component</i>	<i>Class</i>	<i>ABS Certification ⁽¹⁾</i>	<i>Design Approval ⁽¹⁾</i>	<i>Manufacturer's Certification ⁽¹⁾</i>	<i>Identification ⁽¹⁾</i>
Pipes	I, II	Required ⁽²⁾	Not applicable ⁽³⁾	Required	Temporary ⁽³⁾
	III	Not required ⁽³⁾	Not applicable ⁽³⁾	Required	Temporary ⁽³⁾
Pipe fittings	I, II	Not required	Required ^(4, 6)	Required	Permanent
	III	Not required	Not required ^(5, 6)	Required	Permanent
Valves	I, II	Not required	Required ⁽⁴⁾	Required	Permanent
	III	Not required	Not required ⁽⁵⁾	Required	Permanent

Notes:

- 1 See 4-6-1/7.1.1, 4-6-1/7.1.2, 4-6-1/7.1.3 and 4-6-1/7.1.4.
- 2 Except hydraulic piping.
- 3 Except for plastic piping. See Section 4-6-3.
- 4 Where not in compliance with a recognized standard.
- 5 Documentary proof of pressure/temperature rating is required. See 4-6-2/5.15.
- 6 Design of flexible hoses and mechanical pipe joints is to be approved in each case. See 4-6-2/5.7 and 4-6-2/5.9, respectively.

Παρατηρούμε ότι παρότι για την 3^η κλάση σωληνώσεων δεν απαιτούνται κάποια πιστοποιητικά (έγκρισης σχεδίασης, γενικής πιστοποίησης), αυτό δεν ισχύει για τις σωληνώσεις από σύνθετο υλικό όπου οι κανονισμοί είναι πιο αυστηροί.

Πίνακας 5.2: Κλάσεις σωληνώσεων, American Bureau of Shipping 2015

Piping Class →	Class I		Class II Bounded by Class I and Class III - see chart above		Class III	
	$P > P_2$	OR $T > T_2$	$P \leq P_1$	AND $T \leq T_1$		
Piping System ↓	bar; (kgf/cm ² , psi)	°C (°F)	bar; (kgf/cm ² , psi)	°C (°F)	bar; (kgf/cm ² , psi)	°C (°F)
Corrosive fluids	Without special safeguards		With special safeguard		Not applicable	
Toxic fluids	All		Not applicable		Not applicable	
Flammable liquids heated to above flash point or having flash point 60°C or less	Without special safeguards		With special safeguards		Open-ended piping	
Liquefied gas	Without special safeguards		With special safeguards		Open-ended piping	
Steam	16 (16.3, 232)	300 (572)	See chart		7 (7.1, 101.5)	170 (338)
Thermal oil	16 (16.3, 232)	300 (572)	See chart		7 (7.1, 101.5)	150 (302)
Fuel oil Lubricating oil Flammable hydraulic oil	16 (16.3, 232)	150 (302)	See chart		7 (7.1, 101.5)	60 (140)
Cargo oil piping in cargo area	Not applicable		Not applicable		All	
Other fluids (including water, air, gases, non-flammable hydraulic oil)	40 (40.8, 580)	300 (572)	See chart		16 (16.3, 232)	200 (392)
Open ended pipes (drains, overflows, vents, exhaust gas lines, boilers escapes pipes)	Not applicable		Not applicable		All	
(2013) Fixed Oxygen-acetylene System	High pressure side		Not applicable		Low pressure side	

Notes:

- 1 The above requirements are not applicable to piping systems intended for liquefied gases in cargo and process areas.
- 2 The above requirements are also not applicable to cargo piping systems of vessels carrying chemicals in bulk.
- 3 Safeguards are measures undertaken to reduce leakage possibility and limiting its consequences, (e.g., double wall piping or equivalent, or protective location of piping etc.)

5.3 Απαιτήσεις σχεδίασης σωληνώσεων από σύνθετο υλικό

Οι κανονισμοί Νηογνομένων για χρήση σωληνώσεων από σύνθετο υλικό σε πλοία, περιλαμβάνουν σωληνώσεις και εξαρτήματα σωληνώσεων από θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα και παρόμοιων θερμομηχανικών ιδιοτήτων σύνθετα υλικά. Αναφέρεται στους κανονισμούς ότι η χρήση σύνθετων υλικών σε σωληνώσεις πλοίων καθορίζεται σε τελική ανάλυση από την αντοχή τους στην φωτιά, πράγμα απόλυτα φυσιολογικό αφού η αντοχή στη φωτιά αποτελεί και το πιο αδύναμο σημείο των σωληνώσεων από σύνθετο υλικό.

Εσωτερική πίεση

Η εσωτερική πίεση σχεδίασης της σωλήνωσης δεν μπορεί να είναι μικρότερη από την πίεση σχεδίασης του συστήματος στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί. Η εσωτερική πίεση σχεδίασης του σωλήνα δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από τις τιμές των παρακάτω σχέσεων:

$$P_{int} = P_{sth} / 4 \quad (5.1)$$

ή

$$P_{int} = P_{lth} / 2.5 \quad (5.2)$$

Όπου P_{int} η εσωτερική πίεση σχεδίασης, P_{sth} η πίεση αστοχίας σε μικρής διάρκειας υδροστατικό τεστ, P_{lth} η πίεση αστοχίας σε μεγάλης διάρκειας (μεγαλύτερης των 100000 ωρών) υδροστατικό τεστ. Η εσωτερική πίεση αστοχίας του υδροστατικού τεστ μπορεί να επιβεβαιωθεί είτε πειραματικά είτε με ένα συνδυασμό πειραμάτων και υπολογιστικών μεθόδων. Το υδροστατικό τεστ πρέπει να γίνει κάτω από τις εξής τυποποιημένες συνθήκες: ατμοσφαιρική πίεση 1 bar, σχετική υγρασία 30%, θερμοκρασία ρευστού 25 °C.

Εξωτερική πίεση

Η εξωτερική πίεση σχεδίασης πρέπει να υπολογίζεται για κάθε σύστημα σωλήνωσης που μπορεί να βρεθεί σε συνθήκες πλήρους κενού για το εσωτερικό της σωλήνωσης ή να υποβληθεί σε πίεση στο εξωτερικό της σωλήνωσης. Η εξωτερική πίεση σχεδίασης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το άθροισμα των πιέσεων λόγω πίεσης στο εξωτερικό της σωλήνωσης και πλήρους κενού (1 bar) στο εσωτερικό της. Η μέγιστη εξωτερική πίεση που μπορούμε να θεωρήσουμε κατά την σχεδίαση καθορίζεται διαιρώντας την πίεση που έχει προκύψει από την δοκιμή αστοχίας με συντελεστή ασφάλειας ίσο με 3. Όμοια με την εσωτερική, η εξωτερική πίεση αστοχίας του υδροστατικού τεστ μπορεί να επιβεβαιωθεί είτε πειραματικά είτε με ένα συνδυασμό πειραμάτων και υπολογιστικών μεθόδων.

Αξονική αντοχή

Το άθροισμα των διαμηκών τάσεων λόγω της πίεσης, του βάρους, της θερμικής διαστολής ή συστολής, τυχόν εξωτερικών φορτίσεων και των άλλων δυναμικών και σταθερών φορτίσεων δεν πρέπει να υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση στην διαμήκη διεύθυνση. Στην περίπτωση των FRP σωληνώσεων το άθροισμα των διάφορων διαμηκών τάσεων δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό της ονομαστικής περιφερειακής τάσης που δημιουργείται από την μέγιστη εσωτερική πίεση της σωλήνωσης. Η επιτρεπτή διαμήκης τάση μπορεί να επιβεβαιωθεί είτε πειραματικά είτε με ένα συνδυασμό πειραμάτων και υπολογιστικών μεθόδων.

Πάχος σωλήνωσης

Όπως αναφέρεται και σε Bureau Veritas 2014, το πάχος των σωληνώσεων από σύνθετο υλικό υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν μια μέγιστη επιτρεπτή τάση που δεν υπερβαίνει το 1/7 της τάσης θραύσης σε εφελκυσμό του υλικού στην θερμοκρασία λειτουργίας.

Θερμοκρασία

Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας του σωλήνα να ακολουθεί τις συστάσεις του κατασκευαστή. Σε κάθε περίπτωση πρέπει είναι να είναι τουλάχιστον 20°C (36°F) χαμηλότερη από την ελάχιστη θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης του υλικού του σωλήνα που προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 75 μέθοδος A ή ισοδύναμο αυτού. Επίσης η ελάχιστη θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 80°C (176°F). Αυτή η απαίτηση των κανονισμών για ελάχιστη θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης δεν μπορεί να τηρηθεί σε σωλήνες και εξαρτήματα σωληνώσεων κατασκευασμένα από θερμοπλαστικό υλικό, όπως πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP), πολυβουτυλένιο (PB) και ως εκ τούτου προορίζονται μόνο για χρήση σε δίκτυα σωληνώσεων μη βασικών υπηρεσιών. Σε περίπτωση που εκτιμώνται χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, πρέπει να δοθεί ειδική προσοχή στις ιδιότητες του υλικού. Όπως αναφέρεται σε Bureau Veritas 2014, οι σωληνώσεις από σύνθετο υλικό δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για υγρά με θερμοκρασία μεγαλύτερη από 60°C ή μικρότερη από 0°C, εκτός και αν υπάρχει επαρκή δικαιολόγηση στον Νηογνώμονα. Οι παρακάτω πίνακες 5.3 και 5.4 αναφέρουν τα επιτρεπτά όρια θερμοκρασίας και πίεσης λειτουργίας σωληνώσεων από σύνθετο υλικό, όπως αυτά αναφέρονται σε Lloyd's Register 2014.

Αντοχή σε κρούση

Οι σωληνώσεις και οι ενώσεις τους από σύνθετο υλικό πρέπει να έχουν μια ελάχιστη αντοχή σε κρούση που να καθορίζεται από αναγνωρισμένο εθνικό ή διεθνές πρότυπο (όπως το ASTM D2444). Μετά την δοκιμή της σωλήνας για την αντοχή σε κρούση θα πρέπει να υποβάλλεται επί μια ώρα σε υδροστατική πίεση ίση με 2.5 φορές την πίεση σχεδίασης.

Γήρανση

Αναφέρεται σε IMO Resolution A.753 (18), ότι ο κατασκευαστής σωλήνωσης από σύνθετο υλικό θα πρέπει να επιβεβαιώσει ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες (που περιλαμβάνουν ενδεικτικά: έκθεση σε υπεριώδεις ακτίνες, θαλασσινό νερό, λάδι και λιπαντικό, θερμοκρασία, υγρασία) δεν θα οδηγήσουν σε τέτοια υποβάθμιση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του υλικού της σωλήνωσης ώστε να μην πληρούνται οι απαιτήσεις των κανονισμών. Ο κατασκευαστής θα πρέπει να καθιερώσει τα χαρακτηριστικά γήρανσης του υλικού διεξάγοντας δοκιμές γήρανσης και επιβεβαιώνοντας την κάλυψη των απαιτήσεων των κανονισμών.

Κόπωση

Αναφέρεται σε IMO Resolution A.753 (18), ότι σε περιπτώσεις που οι φορτίσεις σχεδίασης είναι σε μεγάλο βαθμό εναλλασσόμενες, τότε θα πρέπει η κόπωση να λαμβάνεται υπόψιν κατά την διαδικασία επιλογής υλικού και την σχεδίαση. Ο σχεδιαστής μπορεί να στηριχθεί στην εμπειρία από παρόμοια υλικά σε παραπλήσιες λειτουργίες ή στην διεξαγωγή δοκιμών για να προσδιορίσει την συμπεριφορά και την αντοχή του υλικού σε κόπωση. Ωστόσο ο σχεδιαστής πρέπει να είναι προσεκτικός, καθώς μια μικρή αλλαγή στην σύνθεση του υλικού μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες αλλαγές στην συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση.

Πίνακας 5.3: Επιτρεπτά όρια θερμοκρασίας και πίεσης λειτουργίας θερμοπλαστικών σωληνώσεων

Material	Nominal pressure, bar	Maximum permissible working pressure, bar						
		-20 to 0°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
PVC	10		7,5	6				
	16		12	9	6			
ABS	10	7,5	7,5	7	6			
	16	12	12	10,5	9	7,5	6	
HDPE	10	7,5	6					
	16	12	9,5	6				
Abbreviations PVC Polyvinyl chloride ABS Acrylonitrile – butadiene – styrene HDPE High density polyethylene								

Πίνακας 5.4: Όρια θερμοκρασίας και πίεσης λειτουργίας θερμοσκληρυνόμενων σωληνώσεων

Minimum heat distortion temperature of resin	Nominal pressure, bar	Maximum permissible working pressure, bar							
		-50 to 30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	95°C
80°C	10	10	9	7,5	6				
	16	16	14	12	9,5				
	25	16	16	16	15				
100°C	10	10	10	9,5	8,5	7	6		
	16	16	16	15	13,5	11	9,5		
	25	16	16	16	16	16	15		
135°C	10	10	10	10	10	9,5	8,5	7	6
	16	16	16	16	16	15	13,5	11	9,5
	25	16	16	16	16	16	16	16	15

Αντίσταση στη διάβρωση

Αναφέρεται σε IMO Resolution A.753 (18), ότι σε περιπτώσεις που στο υγρό στη σωλήνωση αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες, χαρακτηριστικά απόξεσης ή υπάρχουν αλλαγές διεύθυνσης της σωλήνωσης που προκαλούν υπερβολικά τυρβώδη ροή, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την σχεδίαση η πιθανότητα διάβρωσης. Αν η διάβρωση δεν μπορεί να αποφευχθεί τότε θα πρέπει να ληφθούν επαρκή μέτρα αντιμετώπισής της (αυξημένο πάχος τοιχώματος, ειδικές επικαλύψεις, αλλαγή υλικού).

Απορρόφηση υγρού

Αναφέρεται σε IMO Resolution A.753 (18), ότι η απορρόφηση υγρού από το υλικό της σωλήνωσης δεν θα πρέπει να προκαλέσει μη επιτρεπτή μείωση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του υλικού. Το υγρό το οποίο μεταφέρει η σωλήνωση (ή στο οποίο είναι βυθισμένη) δεν θα πρέπει να διαπερνά τα τοιχώματα της. Οι δοκιμές για τα χαρακτηριστικά της απορρόφησης υγρού θα πρέπει να γίνονται με βάση κάποιο αναγνωρισμένο πρότυπο.

Συμβατότητα υλικού

Το υλικό της σωλήνωσης πρέπει να είναι συμβατό με το υγρό που μεταφέρει (ή στο οποίο είναι βυθισμένη), ώστε να η αντοχή σχεδίασης να μην εκφυλίζεται κάτω από το αποδεκτό όριο. Όπου η συμπεριφορά του υλικού της σωλήνωσης σε σχέση με ένα υγρό είναι άγνωστη, αυτή θα πρέπει να αποδεικνύεται.

Αντοχή σε φωτιά

Οι σωληνώσεις και τα εξαρτήματα τους που η λειτουργία τους ή η ακεραιότητα τους είναι σημαντικές για την ασφάλεια του πλοίου πρέπει να πληρούν της απαιτήσεις για αντοχή σε φωτιά του πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά σωληνώσεων από σύνθετο υλικό ανά λειτουργία και χώρο του πλοίου, American Bureau of Shipping 2015

PIPING SYSTEMS		LOCATION										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
CARGO (Flammable cargoes with flash point ≤ 60°C (140°F))												
1	Cargo lines	NA	NA	L1	NA	NA	0	NA	0 ⁽¹⁰⁾	0	NA	L1 ⁽²⁾
2	Crude oil washing lines	NA	NA	L1	NA	NA	0	NA	0 ⁽¹⁰⁾	0	NA	L1 ⁽²⁾
3	Vent lines	NA	NA	NA	NA	NA	0	NA	0 ⁽¹⁰⁾	0	NA	X
INERT GAS												
4	Water seal effluent line	NA	NA	0 ⁽¹⁾	NA	NA	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	NA	0
5	Scrubber effluent line	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	NA	NA	NA	NA	NA	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	NA	0
6	Main line	0	0	L1	NA	NA	NA	NA	NA	0	NA	L1 ⁽⁶⁾
7	Distribution lines	NA	NA	L1	NA	NA	0	NA	NA	0	NA	L1 ⁽²⁾
FLAMMABLE LIQUIDS [flash point > 60°C (140°F)]												
8	Cargo lines	X	X	L1	X	X	NA ⁽³⁾	0	0 ⁽¹⁰⁾	0	NA	L1
9	Fuel oil	X	X	L1	X	X	NA ⁽³⁾	0	0	0	L1	L1
10	Lubricating oil	X	X	L1	X	X	NA	NA	NA	0	L1	L1
11	Hydraulic oil	X	X	L1	X	X	0	0	0	0	L1	L1
SEA WATER (See Note 1)												
12	Bilge main and branches	L1 ⁽⁷⁾	L1 ⁽⁷⁾	L1	X	X	NA	0	0	0	NA	L1
13	Fire main and water spray	L1	L1	L1	X	NA	NA	NA	0	0	X	L1
14	Foam system	L1W	L1W	L1W	NA	NA	NA	NA	NA	0	L1W	L1W
15	Sprinkler system	L1W	L1W	L3	X	NA	NA	NA	0	0	L3	L3
16	Ballast	L3	L3	L3	L3	X	0 ⁽¹⁰⁾	0	0	0	L2W	L2W
17	Cooling water, essential services	L3	L3	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	NA	L2W
18	Tank cleaning services, fixed machines	NA	NA	L3	NA	NA	0	NA	0	0	NA	L3 ⁽²⁾
19	Non-essential systems	0	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0
FRESH WATER												
20	Cooling water, essential services	L3	L3	NA	NA	NA	NA	0	0	0	L3	L3
21	Condensate return	L3	L3	L3	0	0	NA	NA	NA	0	0	0
22	Non-essential systems	0	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0
SANITARY/DRAINS/SCUPPERS												
23	Deck drains (internal)	L1W ₍₄₎	L1W ₍₄₎	NA	L1W ₍₄₎	0	NA	0	0	0	0	0
24	Sanitary drains (internal)	0	0	NA	0	0	NA	0	0	0	0	0
25	Scuppers and discharges (overboard)	0 ^(1,8)	0 ^(1,8)	0 ^(1,8)	0 ^(1,8)	0 ^(1,8)	0	0	0	0	0 ^(1,8)	0
VENTS/SOUNDING												
26	Water tanks/dry spaces	0	0	0	0	0	0 ⁽¹⁰⁾	0	0	0	0	0
27	Oil tanks [flashpoint > 60°C (140°F)]	X	X	X	X	X	X ⁽³⁾	0	0 ⁽¹⁰⁾	0	X	X
MISCELLANEOUS												
28	Control air	L1 ⁽⁵⁾	L1 ⁽⁵⁾	L1 ⁽⁵⁾	L1 ⁽⁵⁾	L1 ⁽⁵⁾	NA	0	0	0	L1 ⁽⁵⁾	L1 ⁽⁵⁾
29	Service air (non-essential)	0	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0
30	Brine	0	0	NA	0	0	NA	NA	NA	0	0	0
31	Auxiliary low pressure steam [Pressure ≤ 7 bar (7 kgf/cm ² , 100 psi)]	L2W	L2W	0 ⁽⁹⁾	0 ⁽⁹⁾	0 ⁽⁹⁾	0	0	0	0	0 ⁽⁹⁾	0 ⁽⁹⁾

Πίνακας 5.5 συνέχεια: Απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά σωληνώσεων από σύνθετο υλικό ανά λειτουργία και χώρο του πλοίου, American Bureau of Shipping 2015

<i>Locations</i>	<i>Abbreviations</i>
A Category A machinery spaces	L1 Fire endurance test in dry conditions, 60 minutes, in accordance with 4-6-3/13
B Other machinery spaces	L2 Fire endurance test in dry conditions, 30 minutes, in accordance with 4-6-3/13
C Cargo pump rooms	L3 Fire endurance test in wet conditions, 30 minutes, in accordance with 4-6-3/15
D Ro-ro cargo holds	0 No fire endurance test required
E Other dry cargo holds	NA Not applicable
F Cargo tanks	X Metallic materials having a melting point greater than 925°C (1700°F).
G Fuel oil tanks	
H Ballast water tanks	
I Cofferdams, void spaces, pipe tunnels and ducts	
J Accommodation, service and control spaces	
K Open decks	

Notes:

- 1 Where non-metallic piping is used, remotely controlled valves are to be provided at the vessel's side. These valves are to be controlled from outside the space.
- 2 Remote closing valves are to be provided at the cargo tanks.
- 3 When cargo tanks contain flammable liquids with a flash point greater than 60°C (140°F), "0" may replace "NA" or "X".
- 4 (2015) For drains serving only the space concerned, "0" may replace "L1W".
- 5 When controlling functions are not required by statutory requirements, "0" may replace "L1".
- 6 For pipe between machinery space and deck water seal, "0" may replace "L1".
- 7 For passenger vessels, "X" is to replace "L1".
- 8 Scuppers serving open decks in positions 1 and 2, as defined in Regulation 13 of the International Convention on Load Lines, 1966, are to be "X" throughout unless fitted at the upper end with the means of closing capable of being operated from a position above the freeboard deck in order to prevent downflooding.
- 9 For essential services, such as fuel oil tank heating and ship's whistle, "X" is to replace "0".
- 10 For tankers where compliance with Regulation 19.3.6 of Annex I of MARPOL 73/78 is required, "NA" is to

Πίνακας 5.6: Επεξηγήσεις και παραπομπές για τις τοποθεσίες που αναφέρονται στον πίνακα 5.5, Det Norske Veritas 2014

<i>Location</i>	<i>Definition</i>
<i>A - Machinery spaces of category A</i>	Machinery spaces of category A as defined in SOLAS 1974, as amended, regulation II-2/3.19.
<i>B - Other machinery spaces and pump rooms</i>	Spaces, other than category A machinery spaces and cargo pump rooms, containing propulsion machinery, boilers, steam and internal combustion engines, generators and major electrical machinery, pumps, oil filling stations, refrigerating, stabilizing, ventilation and air-conditioning machinery, and similar spaces, and trunks to such spaces.
<i>C - Cargo pump rooms</i>	Spaces containing cargo pumps and entrances and trunks to such spaces.
<i>D - Ro-ro cargo holds</i>	Ro-ro cargo holds are ro-ro cargo spaces and special category spaces and special category spaces as defined in SOLAS 1974, as amended, regulation II-2/3.14 and 3.18.
<i>E - Other dry cargo holds</i>	All spaces other than ro-ro cargo holds used for non-liquid cargo and trunks to such spaces.
<i>F - Cargo tanks</i>	All spaces used for liquid cargo and trunks to such spaces.
<i>G - Fuel oil tanks</i>	All spaces used for fuel oil (excluding cargo tanks) and trunks to such spaces.
<i>H - Ballast water tanks</i>	All spaces used for ballast water and trunks to such spaces.
<i>I - Cofferdams, voids spaces, pipe tunnel and ducts</i>	Cofferdams and voids are those empty spaces between two bulkheads separating two adjacent compartments.
<i>J - Accommodation, service and control spaces</i>	Accommodation spaces, service spaces and control stations as defined in SOLAS 1974, as amended, regulation II-2/3.10, 3.12, 3.22.
<i>K - Open decks</i>	Open deck spaces as defined in SOLAS 1974, as amended, regulation II-2/26.2.2(5).

Στον πίνακα 5.7 δίνονται οι απαιτήσεις για σωληνώσεις από σύνθετο υλικό σε θαλάσσιες εφαρμογές γιατί παρουσιάζει κάποιες διαφορές και ως προς τους χώρους που εξετάζει και ως προς τις απαιτήσεις.

Πίνακας 5.7: Απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά σωληνώσεων από σύνθετο υλικό ανά λειτουργία και χώρο σε θαλάσσιες εφαρμογές, Det Norske Veritas 2014

<i>Piping systems</i>		<i>Location</i>									
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>J</i>
		<i>Machinery spaces of category A</i>	<i>Other machinery spaces</i>	<i>Cargo pump rooms</i>	<i>Other dry cargo holds</i>	<i>Cargo tanks</i>	<i>Fuel oil tanks</i>	<i>Ballast water tanks</i>	<i>Cofferdams, void spaces, pipe tunnel and ducts</i>	<i>Accommodation service and control spaces</i>	<i>Open decks</i>
CARGO Flammable fluids or liquids (flash point ≤ 60°C)											
1	Crude or oil product lines	NA	NA	L1	NA	0	NA	0 ⁹⁾	0	NA	L1 ²⁾
2	Crude oil washing lines	NA	NA	L1	NA	0	NA	0 ⁹⁾	0	NA	L1 ²⁾
3	Vent lines	NA	NA	NA	NA	0	NA	0 ⁹⁾	0	NA	X
INERT GAS											
4	Water seal effluent line	NA	NA	0 ¹⁾	NA	0 ¹⁾	0 ¹⁾	0 ¹⁾	0 ¹⁾	NA	0
5	Scrubber effluent line	0 ¹⁾	0 ¹⁾	NA	NA	NA	NA	0 ¹⁾	0 ¹⁾	NA	0
6	Main line	0	0	L1	NA	NA	NA	NA	0	NA	L1 ⁶⁾
7	Distribution lines	NA	NA	L1	NA	0	NA	NA	0	NA	L1 ²⁾
FLAMMABLE LIQUIDS (flash point > 60°C)											
8	Crude or oil product lines	X	X	L1	X	NA ³⁾	0	0 ⁹⁾	0	NA	L1
9	Fuel oil	X	X	L1	X	NA ³⁾	0	0	0	L1	L1
10	Lubricating oil	X	X	L1	X	NA	NA	NA	0	L1	L1
11	Hydraulic oil	X	X	L1	X	0	0	0	0	L1	L1
SEAWATER ¹⁾											
12	Bilge main and branches	L1	L1	L1	X	0	0	0	0	NA	L1
13	Fire main and water spray	L1	L1	L1	NA	NA	NA	0	0	X	L1
14	Foam system	L1	L1	L1	NA	NA	NA	NA	0	L1	L1
15	Sprinkler system	L1	L1	L3	NA	NA	NA	0	0	L3	L3
16	Ballast	L3	L3	L3	X	0 ⁹⁾	0	0	0	L2	L2
17	Cooling water, essential services	L3	L3	NA	NA	NA	NA	0	0	NA	L2
18	Tank cleaning services, fixed machines	NA	NA	L3	NA	0	NA	0	0	NA	L3 ²⁾
19	Non-essential systems	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0
FRESHWATER											
20	Cooling water, essential services	L3	L3	NA	NA	NA	0	0	0	L3	L3
21	Condensate return	L3	L3	L3	0	NA	NA	NA	0	0	0
22	Non-essential systems	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0
SANITARY OR DRAINS OR SCUPPERS											
23	Deck drains (internal)	L1 ⁴⁾	L1 ⁴⁾	NA	0	NA	0	0	0	0	0
24	Sanitary drains (internal)	0	0	NA	0	NA	0	0	0	0	0
25	Scuppers and discharges (overboard)	0 ^{1) 7)}	0 ^{1) 7)}	0 ^{1) 7)}	0 ^{1) 7)}	0	0	0	0	0 ^{1) 7)}	0
SOUNDING OR AIR											
26	Water tanks/dry spaces	0	0	0	0	0 ⁹⁾	0	0	0	0	0
27	Oil tanks (flash point > 60°C)	X	X	X		X ³⁾	0	0 ⁹⁾	0	X	X

Πίνακας 5.7 συνέχεια: Απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά σωληνώσεων από σύνθετο υλικό ανά λειτουργία και χώρο σε θαλάσσιες εφαρμογές, Det Norske Veritas 2014

<i>Piping systems</i>		<i>Location</i>									
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>J</i>
		<i>Machinery spaces of category A</i>	<i>Other machinery spaces</i>	<i>Cargo pump rooms</i>	<i>Other dry cargo holds</i>	<i>Cargo tanks</i>	<i>Fuel oil tanks</i>	<i>Ballast water tanks</i>	<i>Cofferdams, void spaces, pipe tunnel and ducts</i>	<i>Accommodation service and control spaces</i>	<i>Open decks</i>
MISCELLANEOUS											
28	Control air	L1 ⁵⁾	L1 ⁵⁾	L1 ⁵⁾	L1 ⁵⁾	NA	0	0	0	L1 ⁵⁾	L1 ⁵⁾
29	Service air (non-essential)	0	0	0	0	NA	0	0	0	0	0
30	Brine	0	0	NA	0		NA	NA	0	0	0
31	Auxiliary low pressure steam (≤ 7 bar)	L2	L2	0 ⁸⁾	0 ⁸⁾	0	0	0	0	0 ⁸⁾	0 ⁸⁾
<i>Abbreviations used</i>											
L1	Fire endurance test in dry conditions, 60 minutes Appendix 1 of IMO Res. A.753(18)										
L2	Fire endurance test in dry conditions, 30 minutes Appendix 1 of IMO Res. A.753(18)										
L3	Fire endurance test in wet conditions, 30 minutes Appendix 2 of IMO Res. A.753(18)										
0	No fire endurance test required										
NA	Not applicable										
X	Metallic materials having a melting point greater than 925°C.										
<i>Notes:</i>											
1) Where non-metallic piping is used, remotely controlled valves to be provided at unit's side (valve shall be controlled from outside space).											
2) Remote closing valves to be provided at the storage tanks.											
3) When storage tanks contain flammable liquids with flash point > 60°C, «0» may replace «NA» or «X».											
4) For drains serving only the space concerned, «0» may replace «L1».											
5) When controlling functions are not required by statutory requirements or guidelines, «0» may replace «L1».											
6) For pipe between machinery space and deck water seal, «0» may replace «L1».											
7) Scuppers serving open decks in positions 1 and 2, as defined in regulation 13 of the International Convention on Load Lines, 1966, should be «X» throughout unless fitted at the upper end with the means of closing capable of being operated from a position above the freeboard deck in order to prevent downflooding.											
8) For essential services, such as fuel oil tank heating and unit's whistle, «X» is to replace «0».											
9) For storage units where compliance with paragraph 3(f) of regulation 13F of Annex I of MARPOL 73/78 is required, «NA» is to replace «0».											

Τα διάφορα επίπεδα αντοχής σε φωτιά της σωλήνωσης από σύνθετο υλικό προσδιορίζονται ως εξής:

Σωληνώσεις επιπέδου 1 (L1) , διασφαλίζουν την ακεραιότητα ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας πλήρους κλίμακας φωτιάς υδρογονανθράκων και απαιτούνται κυρίως σε συστήματα σωληνώσεων όπου η απώλεια της ακεραιότητας μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή εύφλεκτων υγρών που θα χειροτερεύσουν την φωτιά. Οι σωληνώσεις που έχουν περάσει το τεστ που αναφέρεται παρακάτω (αφορά το επίπεδο 1 και 2) για διάρκεια τουλάχιστον μιας ώρας χωρίς απώλεια της ακεραιότητας της σωλήνωσης στην ξηρή κατάσταση θεωρείται ότι πληρούν τις προϋποθέσεις του επιπέδου 1.

Σωληνώσεις επιπέδου 1W (L1W) , έχουν όμοιες απαιτήσεις με το επίπεδο 1, εκτός από το γεγονός ότι μια διαρροή 5% λόγω φωτιάς θεωρείται αποδεκτή και δεν μεταφέρουν εύφλεκτα

υγρά. Η διαρροή πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την διαστασιολόγηση του συστήματος της σωλήνωσης.

Σωληνώσεις επιπέδου 2 (L2), διασφαλίζουν την διαθεσιμότητα των συστημάτων που είναι απαραίτητα για την ασφαλή λειτουργία του πλοίου μετά από μια φωτιά μικρής διάρκειας και επιτρέπουν την αποκατάσταση αυτών των συστημάτων μετά την φωτιά. Οι σωληνώσεις που έχουν περάσει το τεστ (που αφορά τα επίπεδα 1 και 2), για διάρκεια τουλάχιστον μισής ώρας χωρίς απώλεια της ακεραιότητας της σωλήνωσης στην ξηρή κατάσταση θεωρείται ότι πληρούν τις προϋποθέσεις του επιπέδου 2.

Σωληνώσεις επιπέδου 2W (L2W) , έχουν όμοιες απαιτήσεις με το επίπεδο 2, εκτός από το γεγονός ότι μια διαρροή 5% λόγω φωτιάς θεωρείται αποδεκτή. Η διαρροή πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την διαστασιολόγηση του συστήματος της σωλήνωσης.

Σωληνώσεις επιπέδου 3 (L3) , προσφέρουν την απαραίτητη αντοχή σε φωτιά για σωληνώσεις που είναι γεμάτες με νερό, ώστε να επιβιώσουν από μια τοπική φωτιά μικρής διάρκειας. Οι λειτουργίες της σωλήνωσης πρέπει να μπορούν να αποκατασταθούν μετά το τέλος της φωτιάς. Οι σωληνώσεις που έχουν περάσει το τεστ (που αφορά το επίπεδο 3), για διάρκεια τουλάχιστον μισής ώρας χωρίς απώλεια της ακεραιότητας της σωλήνωσης στην υγρή κατάσταση θεωρείται ότι πληρούν τις προϋποθέσεις του επιπέδου 3.

Στη συνέχεια θα αναφέρουμε τα βασικά στοιχεία των τεστ τα οποία χαρακτηρίζουν τα επίπεδα των σωληνώσεων αναφορικά με την αντοχή τους σε φωτιά.

1. Τεστ αντοχής σε φωτιά σωλήνωσης από σύνθετο υλικό στην ξηρή κατάσταση (για επίπεδο 1 και 2)

Η θερμοκρασία του δοκιμίου στον φούρνο πρέπει να αυξάνεται όμοια με την αύξηση σε μια πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά υγρού υδρογονάνθρακα. Συγκεκριμένα η αύξηση της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου θα πρέπει να είναι όπως φαίνεται στον πίνακα 5.8. Τα δοκίμια που θα υποβληθούν σε δοκιμή πρέπει να περιλαμβάνουν ενδεικτικά πέρα από τμήματα σωλήνωσης και τις ενώσεις και τα εξαρτήματα που υπάρχουν στο σύστημα της σωλήνωσης. Επίσης τα άκρα της σωλήνωσης μπορούν να βρίσκονται εκτός του φούρνου, η γενική διεύθυνση της σωλήνωσης πρέπει να είναι οριζόντια με μια αγκυρωμένη στήριξη, το μήκος μεταξύ των στηρίξεων δεν πρέπει να είναι μικρότερο από την τιμή που δίνει η διάμετρος της σωλήνωσης επί 8. Επιτρέπεται να υπάρχει θερμική μόνωση στις σωληνώσεις. Στην περίπτωση που η μόνωση της σωλήνωσης μπορεί να απορροφάει υγρασία, η δοκιμή γίνεται μόνο όταν υπάρχει κατάσταση ξηρού αέρα (50% σχετική υγρασία σε ένα θερμοκρασιακό εύρος 15-25 °C). Κατά την διάρκεια της δοκιμής η πίεση πρέπει να διατηρείται σε ένα εύρος 8.5-11.5 psi με την χρήση αζώτου, ενώ θα πρέπει να υπάρχουν και μετρητικές συσκευές για να εντοπίζουν τυχόν διαρροή.

Τα κριτήρια αποδοχής είναι κατά την διάρκεια της δοκιμής να μην υπάρχει διαρροή αζώτου, μετά την δοκιμή και αφού κρυώσει το δοκίμιο θα πρέπει να μην εμφανίσει διαρροή σε δοκιμή μέγιστης επιτρεπτής πίεσης διάρκειας 15 λεπτών.

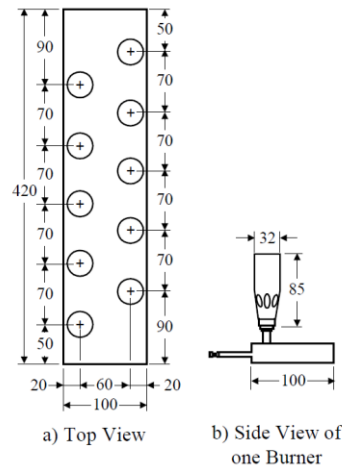
Πίνακας 5.8: αύξηση της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου σε φωτιά υγρών υδρογονανθράκων, American Bureau of Shipping 2015

At the end of 5 minutes	945°C	(1733°F)
At the end of 10 minutes	1033°C	(1891°F)
At the end of 15 minutes	1071°C	(1960°F)
At the end of 30 minutes	1098°C	(2008°F)
At the end of 60 minutes	1100°C	(2012°F)

2. Τεστ αντοχής σε φωτιά σωλήνωσης από σύνθετο υλικό που διαρρέεται από νερό (για επίπεδο 3)

Συνοπτικά αναφέρουμε ότι σε αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιείται καυστήρας προπανίου (καθαρότητας τουλάχιστον 95%) και υπάρχει τοπικά γρήγορη αύξηση θερμοκρασίας. Για σωληνώσεις μέχρι 152 mm εξωτερική διάμετρο χρησιμοποιούνται 2 σειρές από 5 καυστήρες η καθεμία, που παράγουν σταθερά μια ροή θερμότητας 113.6 kW/m² με επιτρεπτή απόκλιση 10%. Για σωληνώσεις εξωτερικής διαμέτρου μεγαλύτερης από 152 mm χρησιμοποιείται μια παραπάνω σειρά από 5 καυστήρες για κάθε 50 mm αύξηση της εξωτερικής διαμέτρου. Οι καυστήρες σε κάθε περίπτωση πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένοι κάτω από το δοκίμιο σε μια απόσταση 11.5-13.5 mm, μια εικόνα της διάταξης των καυστήρων δίνεται στο σχήμα 5.1. Το μήκος του δοκιμίου πρέπει να είναι περίπου 1.5 m, όμοια με την δοκιμή για το επίπεδο 1 και 2 τα δοκίμια που θα υποβληθούν σε δοκιμή πρέπει να περιλαμβάνουν ενδεικτικά πέρα από τμήματα σωλήνωσης και τις ενώσεις και τα εξαρτήματα που υπάρχουν στο σύστημα της σωλήνωσης και ισχύουν οι ίδιες προβλέψεις για την περίπτωση που η μόνωση της σωλήνωσης απορροφάει υγρασία. Η διεύθυνση της σωλήνωσης πρέπει να είναι οριζόντια και θα πρέπει να στηρίζεται σε δύο σημεία όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1. Η δοκιμή θα πρέπει να γίνεται σε στεγασμένο χώρο για να περιορίζονται οι παράγοντες επηρεασμού της, ενώ κατά την διάρκεια της δοκιμής η σωλήνωση θα πρέπει να είναι γεμάτη με απαεριωμένο νερό θερμοκρασίας ίσης ή μεγαλύτερης των 15 °C και η πίεση θα πρέπει να διατηρείται μεταξύ 36.25 - 50.75 psi.

Τα κριτήρια αποδοχής είναι: κατά την διάρκεια της δοκιμής να μην υπάρχει διαρροή εκτός αν αφορά ασήμαντη διαρροή (weeping) μέσω του τοιχώματος της σωλήνας, μετά την δοκιμή και αφού κρυώσει το δοκίμιο θα πρέπει να μην εμφανίσει διαρροή σε δοκιμή μέγιστης επιτρεπτής πίεσης διάρκειας 15 λεπτών.



Σχήμα 5.1: Καυστήρας δοκιμής φωτιάς για επίπεδο 3, American Bureau of Shipping 2015

Εξάπλωση φωτιάς

Όλες οι σωληνώσεις από σύνθετο υλικό θα πρέπει να έχουν χαρακτηριστικά χαμηλής εξάπλωσης φωτιάς, εξαιρούνται από αυτή την απαίτηση οι σωληνώσεις που βρίσκονται σε ανοιχτά καταστρώματα, μέσα σε δεξαμενές, σε φρεάτια, μέσα σε τούνελ ή αγωγούς. Οι διαδικασίες δοκιμών που ακολουθούνται σε IMO Resolution A.653 (16) με κάποιες τροποποιήσεις για σωληνώσεις από σύνθετο υλικό, χρησιμοποιούνται για να τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών εξάπλωσης φωτιάς. Τα υλικά σωληνώσεων που δίνουν μέση τιμή για όλα τα κριτήρια επιφανειακής ευφλεκτότητας που δεν υπερβαίνει τις τιμές του πίνακα 5.9 θεωρούνται ότι πληρούν τις απαιτήσεις για χαμηλή εξάπλωση φωτιάς.

Πίνακας 5.9: Κριτήρια επιφανειακής ευφλεκτότητας, IMO Resolution A.653 (16)

Bulkhead, wall and ceiling linings				Floor coverings			
CFE kW/m ²	Q _{sb} MJ/m ²	Q _t MJ	Q _p kW	CFE kW/m ²	Q _{sb} MJ/m ²	Q _t MJ	Q _p kW
≥20.0	≥1.5	≤0.7	≤4.0	≥7.0	≥0.25	≤1.5	≤10.0

Where CFE = Critical flux at extinguishment
 Q_{sb} = Heat for sustained burning
 Q_t = Total heat release
 Q_p = Peak heat release rate

Οι τροποποιήσεις στον IMO Resolution A.653 (16) για σωληνώσεις από σύνθετο υλικό είναι οι εξής σύμφωνα με τον ABS:

- 1) Οι δοκιμές πρέπει να γίνονται για κάθε υλικό και μέγεθος σωλήνωσης
- 2) Το δοκίμιο θα κατασκευάζεται κόβοντας την σωλήνωση στο διάμηκες σε λωρίδες που στην συνέχεια θα ενώνονται (τουλάχιστον 2) για να δημιουργηθεί μια κατά προσέγγιση επίπεδη επιφάνεια. Το δοκίμιο θα πρέπει να έχει τουλάχιστον 800 mm μήκος με μια επιτρεπτή απόκλιση 5 mm.
- 3) Ως πλάτος της επιφάνειας του δοκιμίου που θα σχηματίσουν οι λωρίδες της σωλήνας θεωρείται το πλάτος της επιφάνειας που είναι εκτεθειμένη στην ροή θερμότητας και πρέπει να είναι μεταξύ 155 – 180 mm, αυτό το πλάτος καθορίζει και τον αριθμό των λωρίδων που θα ενωθούν.
- 4) Το συναρμολογημένο δοκίμιο δεν πρέπει να έχει κενά μεταξύ των λωρίδων που το αποτελούν.
- 5) Το συναρμολογημένο δοκίμιο πρέπει να είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε τα άκρα δύο λωρίδων που εφάπτονται να συμπίπτουν με την γραμμή που περνάει από το μέσο του πλαισίου συγκράτησης του δοκιμίου.
- 6) Τα επιμέρους τμήματα της δοκιμής πρέπει να προσδένονται στην υποστηρικτική πλάκα από πυριτικό ασβέστιο χρησιμοποιώντας σύρμα (No 18 συνιστάται) ανά 50 mm.
- 7) Τα επιμέρους τμήματα του σωλήνα θα πρέπει να τοποθετηθούν έτσι ώστε το υψηλότερο σημείο της εκτεθειμένης επιφάνειας είναι στο ίδιο επίπεδο με την εκτεθειμένη επίπεδη επιφάνεια μιας κανονικής επιφάνειας.
- 8) Ο χώρος μεταξύ της κοίλης μη εκτεθειμένης επιφάνειας του δοκιμίου και της επιφάνειας της υποστηρικτικής πλάκας από πυριτικό ασβέστιο πρέπει να αφεθεί κενός.
- 9) Αν το πλάτος των λωρίδων σωλήνων εκτείνονται κάτω από τις πλευρικές ακμές του πλαισίου συγκράτησης τότε ο κενός χώρος μεταξύ της κορυφής της εκτεθειμένης επιφάνειας του δοκιμίου και του κάτω άκρου του πλαισίου συγκράτησης πρέπει να γεμίσει με ένα μάλλινο μονωτικό υλικό υψηλών θερμοκρασιών.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Σωλήνωση μεταφοράς υγρών που έχουν αγωγιμότητα μικρότερη από 1000 pico-Siemens ανά μέτρο, πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγήμη. Αν σωλήνωση από σύνθετο υλικό περνάει από επικίνδυνους χώρους τότε πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγήμη ανεξαρτήτως του υγρού που μεταφέρει. Όταν απαιτείται ηλεκτρικά αγωγήμη σωλήνωση, τότε η ηλεκτρική αντίσταση ανά μονάδα μήκους της σωλήνωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει το $1 \times 10^5 \Omega/m$. Οι σωληνώσεις με διάφορα στρώματα (επικαλύψεις, ενισχύσεις) που έχουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αγωγιμότητες πρέπει να προστατεύονται από την πιθανότητα βλάβης από σπινθήρα στα τοιχώματα της σωλήνωσης.

Παραθέτουμε στην συνέχεια στον πίνακα 5.10 τα πρότυπα που ορίζουν τις τυπικές απαιτήσεις σχεδίασης για όλα τα συστήματα σωληνώσεων από σύνθετο υλικό σε πλοίο. Στον πίνακα 5.10 όπου υπάρχουν αριθμοί (για παράδειγμα 4-6-3/5.1) στην στήλη του πίνακα που

αναφέρεται στα πρότυπα (typical standard) αποτελούν παραπομπή στα αντίστοιχα πρότυπα και απαιτήσεις του ABS που αναφέραμε σε αυτό το κεφάλαιο.

Πίνακας 5.10: πρότυπα και τυπικές απαιτήσεις για όλες τις σωληνώσεις από σύνθετο υλικό, American Bureau of Shipping 2015

	<i>Test</i>	<i>Typical Standard</i>	<i>Notes</i>
1	Internal pressure ⁽¹⁾	4-6-3/5.1 ASTM D 1599, ASTM D 2992 ISO 15493 or equivalent	Top, Middle, Bottom (of each pressure range) Tests are to be carried out on pipe spools made of different pipe sizes, fittings and pipe connections.
2	External pressure ⁽¹⁾	4-6-3/5.3 ISO 15493 or equivalent	As above, for straight pipes only.
3	Axial strength ⁽¹⁾	4-6-3/5.5	As above.
4	Load deformation	ASTM D 2412 or equivalent	Top, Middle, Bottom (of each pressure range)
5	Temperature limitations ⁽¹⁾	4-6-3/5.7 ISO 75 Method A GRP piping system: HDT test on each type of resin acc. to ISO 75 method A. Thermoplastic piping systems: ISO 75 Method AISO 306 Plastics - Thermoplastic materials - Determination of Vicat softening temperature (VST) VICAT test according to ISO 2507 Polyesters with an HDT below 80°C should not be used.	Each type of resin
6	Impact resistance ⁽¹⁾	4-6-3/5.9 ISO 9854: 1994, ISO 9653: 1991 ISO 15493 ASTM D 2444, or equivalent	Representative sample of each type of construction
7	Ageing	Manufacturer's standard ISO 9142:1990	Each type of construction
8	Fatigue	Manufacturer's standard or service experience.	Each type of construction
9	Fluid absorption	ISO 8361:1991	
10	Material compatibility ⁽²⁾	ASTM C581 Manufacturer's standard	

Notes:

- 1 Where the manufacturer does not have a certified quality system, test to be witnessed by the Surveyor. See 4-6-3/9.
- 2 If applicable.

Πίνακας 5.11: επιπλέον απαιτήσεις για σωληνώσεις από σύνθετο υλικό ανάλογα με την λειτουργία και την τοποθεσία της σωλήνωσης, American Bureau of Shipping 2015

	<i>Test</i>	<i>Typical Standard</i>	<i>Notes</i>
1	Fire endurance ^(1,2)	4-6-3/5.11	Representative samples of each type of construction and type of pipe connection.
2	Flame spread ^(1,2)	(4-6-3/5.13)	Representative samples of each type of construction.
3	Smoke generation ⁽²⁾	IMO Fire Test Procedures Code	Representative samples of each type of construction.
4	Toxicity ⁽²⁾	IMO Fire Test Procedures Code	Representative samples of each type of construction.
5	Electrical conductivity ^(1,2)	4-6-3/5.15 ASTM F1173-95 or ASTM D 257, NS 6126/ 11.2 or equivalent	Representative samples of each type of construction

Notes:

- 1 Where the manufacturer does not have a certified quality system, test to be witnessed by the Surveyor. See 4-6-3/9.
- 2 If applicable.

5.4 Απαιτήσεις εγκατάστασης σωληνώσεων από σύνθετο υλικό

Στηρίξεις

Η επιλογή των στηρίξεων και της απόστασης μεταξύ των στηρίξεων σε σωλήνωση πλοίου πρέπει να λαμβάνει υπόψιν τις διαστάσεις, το μήκος, τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού, την εξωτερική και εσωτερική πίεση, την θερμοκρασία λειτουργίας, φορτία λόγω εξωτερικών δυνάμεων, αξονικές δυνάμεις ώσης, το υδραυλικό πλήγμα και κραδασμούς, καθώς και τον συνδυασμό των παραπάνω φορτίσεων στα οποία μπορεί να υποβληθεί η σωλήνωση. Η απόσταση των στηρίξεων κατά την εγκατάσταση δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που συνιστά ο κατασκευαστής. Κάθε στήριξη πρέπει να διανέμει ομοιόμορφα το φορτίο από την σωλήνωση σε όλο το πλάτος της στήριξης. Μέτρα πρέπει να ληφθούν για την ελαχιστοποίηση της φθοράς των σωλήνων στα σημεία επαφής με τις στηρίξεις. Εξαρτήματα μεγάλου βάρους όπως βαλβίδες και αρμοί διαστολής πρέπει να έχουν δικιά τους στήριξη. Επίσης οι στηρίξεις πρέπει να επιτρέπουν την σχετική κίνηση μεταξύ των σωληνώσεων και του πλοίου, που προκύπτει από τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής και τις παραμορφώσεις της γάστρας.

Εξωτερικές φορτίσεις

Θα πρέπει να έχει προβλεφθεί ότι κατά την εγκατάσταση της σωλήνωσης θα υπάρχουν σημειακά εξωτερικά φορτία τουλάχιστον 980 N, ενδιάμεσα των στηρίξεων της σωλήνωσης. Αυτή η πρόβλεψη αφορά σωλήνες ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης των 100 mm. Οι σωληνώσεις πρέπει να προστατεύονται από μηχανικές βλάβες όπου είναι απαραίτητο.

Ενώσεις τεμαχίων σωλήνωσης

Οι παρακάτω γενικές αρχές εφαρμόζονται σε όλες τις συνδέσεις σωληνώσεων:

1. Η αντοχή των εξαρτημάτων και των συνδέσμων δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την σωλήνωση που συνδέουν.
2. Οι σωληνώσεις μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας κόλληση, περιτύλιξη, φλάντζες ή άλλο τύπο συνδέσμου.
3. Η σύσφιξη των φλάντζών ή της μηχανικής σύζευξης γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή
4. Όταν χρησιμοποιούνται κολλητικά μέσα (adhesives) για την συναρμολόγηση της σωλήνας θα πρέπει να διασφαλίζουν μόνιμο σφράγισμα μεταξύ σωλήνας και των εξαρτημάτων σε όλο το εύρος θερμοκρασίας και πίεσης της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Οι τεχνικές σύνδεσης πρέπει να είναι σύμφωνες με τις οδηγίες του κατασκευαστή, το προσωπικό που διενεργεί την συναρμολόγηση πρέπει να είναι καταρτισμένο και οι διαδικασίες σύνδεσης να είναι αποδεκτές σύμφωνα με την παρακάτω δοκιμή.

Η ένωση που κατασκευάζουμε πρέπει να έχει γίνει με την διαδικασία που θέλουμε να ελέγξουμε και πρέπει να αποτελείται τουλάχιστον από ένα σύνδεσμο που να ενώνει σωλήνα με σωλήνα και ένα σύνδεσμο που να ενώνει σωλήνα με εξάρτημα. Αν η μεγαλύτερη ονομαστική εξωτερική διάμετρο της σωλήνωσης είναι μέχρι 200 mm τότε αυτή επιλέγεται να είναι και του δοκιμίου, αλλιώς επιλέγεται η μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρος εκ των δύο: 200mm ή το 25% της μεγαλύτερης εξωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης.

Η δοκιμή είναι η εφαρμογή για τουλάχιστον μια ώρα, μιας υδροστατικής πίεσης που διαφέρει από την πίεση σχεδίασης κατά ένα συντελεστή ασφαλείας 2.5 και γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι σύνδεσμοι να δέχονται φορτία και στην αξονική και στην περιφερειακή διεύθυνση. Η δοκιμή είναι επιτυχής και η διαδικασία σύνδεσης αποδεκτή αν δεν παρατηρηθούν διαρροές και αποχωρισμός των συνδέσμων από τις σωλήνες.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Όπου απαιτείται ηλεκτρικά αγώγιμος σωλήνας, η εγκατάσταση της σωλήνωσης θα πρέπει να πληροί τα παρακάτω. Η αντίσταση προς τη γη (έδαφος) από οποιοδήποτε σημείο του συστήματος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 ΜΩ. Η αντίσταση πρέπει να ελέγχεται με την παρουσία του Επιθεωρητή. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται καλώδια γείωσης πρέπει να είναι προσιτά για επιθεώρηση και ο Επιθεωρητής πρέπει να επιβεβαιώσει ότι βρίσκονται σε εμφανή σημεία.

Συνδέσεις περιβλήματος (shell connections)

Όπου επιτρέπονται οι σωληνώσεις από σύνθετο υλικό να χρησιμοποιούνται σε συστήματα που συνδέονται με το περίβλημα του πλοίου, θα πρέπει οι βαλβίδες που είναι εγκατεστημένες στο περίβλημα και η σύνδεση της σωλήνωσης με το περίβλημα να είναι μεταλλικές.

Δίοδοι μέσα από φρακτές και καταστρώματα

Όπου σωληνώσεις από σύνθετο υλικό περνούν μέσα από φρακτές ή καταστρώματα ισχύουν οι παρακάτω γενικές αρχές:

1. Η ακεραιότητα των στεγανών διαφραγμάτων και των καταστρωμάτων πρέπει να διατηρείται όταν σωλήνες από σύνθετο υλικό περνούν από μέσα τους.
2. Όπου οι σωληνώσεις από σύνθετο υλικό περνούν μέσα από χώρους με κλάση A ή B αναφορικά με την διάδοση καπνού και φωτιάς, θα πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες για να μην μειωθεί η αντοχή σε φωτιά. Οι όποιες αλλαγές θα πρέπει να δοκιμαστούν σύμφωνα με IMO Resolution A.754(18).

Εφαρμογή επικαλύψεων για προστασία από φωτιά

Οι επικαλύψεις για προστασία από φωτιά εφαρμόζονται στους συνδέσμους όπου είναι απαραίτητο για να επιτευχθεί η απαραίτητη αντοχή στη φωτιά και αφότου έχουν γίνει οι δοκιμές υδροστατικής πίεσης. Η εφαρμογή των επικαλύψεων γίνεται σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή.

Δοκιμές στο πλοίο μετά την εγκατάσταση

Οι σωληνώσεις πρέπει να υποβάλλονται σε υδροστατική δοκιμή πίεσης που να μην είναι λιγότερη από 1.5 φορές την πίεση σχεδίασης και αν απαιτείται ηλεκτρική αγωγιμότητα πρέπει να ελέγχεται η αγωγιμότητα και να γίνεται τυχαία δοκιμή αντίστασης από τον Επιθεωρητή.

Οπτική επιθεώρηση

Όπως αναφέρεται και σε American Bureau of Shipping 2015 Offshore Installation, πρέπει να γίνει οπτική επιθεώρηση και επιδιορθώσεις στις σωληνώσεις από σύνθετο υλικό σύμφωνα με τον πίνακα 5.12. Αν προκύψουν διαφωνίες σχετικά με τις οπτικές απαιτήσεις επιθεώρησης, ένα ανεξάρτητο τρίτο μέρος που είναι αποδεκτό από τον Επιθεωρητή εκτελεί μια δεύτερη επιθεώρηση και συστήνει μια διορθωτική ενέργεια.

Πίνακας 5.12: Κριτήρια αποδοχής ατελειών και διορθωτικές ενέργειες, American Bureau of Shipping 2015 Offshore Installation

<i>Name</i>	<i>Definition</i>	<i>Criteria</i>	<i>Corrective Action</i>
Air bubble	Air entrapment within and between the plies of reinforcement, usually spherical in shape. Normally found at or near the inner surface of the laminate.	Diameter of bubble is to be less than or equal to 1.5 mm ($1/16$ in.). If it is larger than 1.5 mm ($1/16$ in.), no more than 2 bubbles per square inch are allowed.	Bubbles $1/16$ in. diameter or smaller may be accepted as-is. Larger bubbles shall be rejected or repaired.
Burn (delamination)	Thermal decomposition evidenced by distortion or discoloration of the laminate.	Acceptable if burn is not in the structural layer.	If burn is not in the structural layer, then either accept as-is or resin-coat the area. If burn is in the structural layer, then either remove (by grinding) the damaged area or reapply a laminate to maintain structural integrity or reject the part.
Chip	A small piece broken off an edge or surface. If reinforcing fibers are broken, then refer to a "crack".	Area of damage must be less than 10×10 mm ($3/8$ in. \times $3/8$ in.).	Either resin coat area or lightly grind area and then reapply CSM and/or veil.
Crack	An actual separation of the laminate visible on opposite surfaces and extending through the thickness.	Acceptable if crack is only a surface crack and does not extend below the surface coating.	For surface cracks, either accept as-is or re-coat. For deeper cracks, cracks should be filled with adhesive. If structural integrity is in question (crack extends to depth of filament winding or woven roving), part should be rejected.
Crazing	Fine hairline cracks, normally at or underneath the surface.	Acceptable up to 25 mm (1 in.) in length.	Accept as-is for cracks up to 25 mm (1 in.) in length. For longer cracks, lightly grind the surface to remove the crack and re-surface with veil and/or resin.
Dry spot	Area of incomplete surface film where the reinforcement has not been wetted with resin, leaving exposed glass reinforcement	None permitted.	Dry spot may be resin coated, but must be visually inspected after cure.
Fracture	Rupture of laminate surface with or without complete penetration. Majority of fibers broken.	None permitted.	Damaged area to be removed by grinding and a laminate to be reapplied to maintain structural integrity. Fractures discovered as a result of hydrotesting that cannot be repaired shall be rejected.
Impact Damage	Light area with or without broken fibers.	Areas larger than 10 mm ($3/8$ in.) diameter are not permitted.	Resin coat area or lightly grind area and reapply CSM ⁽¹⁾ and/or veil. Larger areas of damage may be surface prepped and wrapped with a laminate of CSM ⁽¹⁾ (and WR ⁽²⁾ if necessary).
Incorrect Laminate Sequence	Laminate sequence of part does not match the specification.	Laminate sequence must meet or exceed the required minimum for the application.	Laminate sequence that is deemed inadequate for the application shall either be reinforced with the necessary additional plies or shall be removed and replaced.
Incorrect Spool Dimensions	Incorrect dimensions or misaligned components.	Overall system dimensions must be maintained. Misaligned parts must not be overstressed.	If possible, make up difference elsewhere in the system. Otherwise, components may have to be removed and re-welded.

Πίνακας 5.13 συνέχεια: Κριτήρια αποδοχής ατελειών και διορθωτικές ενέργειες, American Bureau of Shipping 2015 Offshore Installation

<i>Name</i>	<i>Definition</i>	<i>Criteria</i>	<i>Corrective Action</i>
Lack of Adhesive	Bonded area has lack of adhesive which creates a dis-bondment between the parts being joined.	Bond area must be adequate for the design conditions.	When the de-bonded area is greater than 30% of the total bond area, the part is to be rejected. Smaller de-bonded areas may be evaluated for overall integrity and either accepted or rejected.
Low Barcol Hardness	Barcol hardness reading below the required minimum.	Barcol hardness must be at or above the required minimum.	If after 24 hours Barcol hardness is not achieved, the part may be allowed to cure at ambient temperature for another 24 hours or may be post-cured to accelerate the cure. If after 48 hours Barcol hardness is not achieved, the part shall be rejected.
Pit (Pinhole)	Small crater in the inner surface of a laminate, with its width approximately of the same order of magnitude as its depth.	Diameter of pits to be less than 0.8 mm ($1/32$ in.) and depth to be less than the thickness of the liner.	If there are no damaged fibers and pits meet the criteria, then accept as-is. Otherwise, part may need to be rejected.
Restriction (Excess Adhesive)	Excess adhesive on the internal wall of a pipe/fitting causing a restriction.	Any obstruction shall be less than 5% of the inside diameter and no more than 10 mm in height.	If accessible, excess adhesive is to be carefully ground. If not accessible, part is to be removed and replaced.
Scratch	Small mark caused by improper handling, storage, and/or transportation. If reinforcing fibers are broken, then damage is considered a "Crack".	Area of damage shall not affect the fibers and shall not be larger than 10×10 mm ($3/8$ in. \times $3/8$ in.)	If damaged area is $3/8$ in. \times $3/8$ in. or smaller, then accept as-is. Larger areas with only surface damage (no fiber damage) shall be resin coated if coating has been damaged. Larger areas with fiber damage shall be lightly ground and reapplied with CSM ⁽¹⁾ and/or WR ⁽²⁾ .
Uneven Wall Thickness for Adhesive Bond	After surface preparation, parts to be bonded have an uneven wall thickness possibly causing air voids in the bond.	Allowable eccentricity is $0.002 \times ID$, but no more than 0.3 mm	Part shall be rejected and replaced.
Weeping	Minor liquid penetration through the laminate during pressure testing.	None permitted.	Area shall either be lightly ground and then reapplied with a laminate of CSM ⁽¹⁾ and WR or damaged part shall be removed and replaced.
Weld Sparks	Minor breakdown of outer surface due to effects of close-proximity welding.	See "Scratch".	See "Scratch".

Notes:

- 1 CSM – Chopped Strand Mat
- 2 WR – Woven Roving
- 3 For defects such as cracks, pits, and scratches, if a number of these defects occur in a small area, the corrective action may be modified to the satisfaction of the Surveyor to take this into account.

Κεφάλαιο 6

Αντικατάσταση χαλύβδινων σωληνώσεων πλοίου με FRP

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιλέξουμε το δίκτυο σωλήνωσης πλοίου όπου θα αντικαταστήσουμε τον χάλυβα με FRP και στην συνέχεια θα υπολογίσουμε και θα συγκρίνουμε το κόστος στη διάρκεια ζωής αλλά και το βάρος της σωλήνωσης που αντιστοιχεί σε κάθε υλικό. Το κριτήριο για την επιλογή του δικτύου σωλήνωσης είναι η μεγαλύτερη δυνατή αντικατάσταση του χάλυβα με FRP σύμφωνα με τους περιορισμούς των Νηογνομώνων. Αφού επιλέγουμε να κάνουμε την σύγκριση FRP χάλυβα σε δίκτυα σωληνώσεων πραγματικών πλοίων, αντλούμε από τα σχέδια των πλοίων όλες τις απαραίτητες πληροφορίες του συγκεκριμένου δικτύου (εσωτερική διάμετρος και πάχος σωλήνωσης, πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας, παροχή, βάρος και υλικό σωλήνωσης). Όπου οι πληροφορίες των σχεδίων δεν επαρκούν, περιγράφεται αναλυτικά η προσέγγιση που θεωρήσαμε για να αποκτήσουμε τα απαραίτητα στοιχεία.

Συνοψίζοντας τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 αναφορικά με την χρήση FRP σε σωληνώσεις πλοίων μπορούμε να τους χωρίσουμε σε 2 βασικές κατηγορίες. Η πρώτη και σημαντικότερη κατηγορία περιορισμών είναι οι απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά των Νηογνομώνων (πίνακας 4.3), όπου φαίνεται ανάλογα με το είδος του δικτύου σωλήνωσης και των χώρων του πλοίου που επιτρέπεται να γίνει χρήση FRP και η απαίτηση αντοχής σε φωτιά (L1, L1W, L2, L2W, L3). Η δεύτερη κατηγορία περιορισμών είναι το γεγονός ότι όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι σωληνώσεις από σύνθετο υλικό και τα εξαρτήματά τους γενικά γίνονται αποδεκτά σε σωληνώσεις 3^{ης} κλάσης (Lloyd's Register 2014), ενώ η χρήση σύνθετου υλικού σε σωληνώσεις που απαιτούν 2^η και 1^η κλάση εξετάζεται ανά περίπτωση από τους Νηογνομόνες. Υπευθυμίζουμε ότι για σωληνώσεις 3^{ης} κλάσης τα όρια πίεσης και θερμοκρασίας κυμαίνονται μεταξύ 7 bar και 60 °C (για δίκτυα καυσίμου, λιπαντικών) έως και 16 bar και 200 °C (για δίκτυα νερού, αέρα). Συνεπώς αυτά είναι και τα ανώτατα όρια πίεσης και θερμοκρασίας λειτουργίας μέσα στα οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε FRP σε μια σωλήνωση πλοίου.

Το συνολικό κόστος μιας σωλήνωσης στη διάρκεια ζωής του πλοίου αποτελείται από τα κόστη που αναφέρονται παρακάτω.

1. Το κόστος αγοράς των σωληνώσεων
2. Το κόστος εγκατάστασης του εκάστοτε δικτύου σωληνώσεων. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το κόστος εγκατάστασης της σωλήνωσης FRP είναι μικρότερο κατά 30-40% σε σχέση με τις χαλύβδινες σωληνώσεις (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012)
3. Το κόστος αντικατάστασης σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο σωληνώσεων δεδομένου του υλικού του και της διάρκειας ζωής του πλοίου. Το κόστος αντικατάστασης θα προκύψει

στη βάση μιας εκτίμησης για τις φθορές από την λειτουργία της σωλήνωσης στην διάρκεια ζωής του πλοίου που αντιστοιχούν σε έναν ρυθμό αντικατάστασης των σωληνώσεων από χάλυβα και FRP

4. Το κόστος λειτουργίας στην διάρκεια ζωής του πλοίου στις δύο σωληνώσεις λόγω των διαφορετικών απωλειών τριβής που προκαλεί η διαφορετική τραχύτητα στον χάλυβα και στο FRP
5. Το κόστος συντήρησης (βαφές, επισκευές) της σωλήνωσης για χάλυβα και FRP. Ειδικά για τις σωληνώσεις FRP μπορούμε να υποθέσουμε αμελητέα έξοδα συντήρησης λόγω των αντιδιαβρωτικών ιδιοτήτων τους.

Η μελέτη κόστους για σωληνώσεις από χάλυβα και FRP δεν περιλαμβάνει τον υπολογισμό του κόστους των διάφορων εξαρτημάτων της σωλήνωσης (γωνιές, φλάντζες, βαλβίδες) και των στηρίξεων της. Ένα μεγάλο μέρος αυτών των στοιχείων άλλωστε θα είναι από χάλυβα και στην σωλήνωση από FRP.

Όσον αφορά την σύγκριση βάρους των σωληνώσεων από FRP και χάλυβα, υπολογίζουμε από την σχέση 3.2 το βάρος της σωλήνωσης ανά μέτρο για δεδομένη διάμετρο, πάχος και πυκνότητα υλικού και πολλαπλασιάζουμε με το μήκος που αντιστοιχεί. Σε κάποιες από τις χαλύβδινες σωληνώσεις τα βάρη τους είναι ήδη υπολογισμένα στα σχέδια των πλοίων.

Όσον αφορά τα μήκη του δικτύου σωληνώσεων που επιλέξαμε είτε δίνονται απευθείας από τα σχέδια είτε γίνεται εκτίμηση μήκους συγκρίνοντας τα διαγραμματικά σχέδια των σωληνώσεων με το GA ή το Capacity plan για κάθε πλοίο. Για λόγους που θα εξηγήσουμε παρακάτω παρουσιάζονται διακριτά οι σωληνώσεις στο μηχανοστάσιο και στο υπόλοιπο πλοίο (hull part).

6.2 Καθορισμός και στοιχεία δικτύου σωλήνωσης και πλοίων

Επιλέγουμε δίκτυο έρματος γιατί είναι το μόνο σημαντικό δίκτυο σωληνώσεων του πλοίου που επιτρέπεται από τους κανονισμούς των νηογνομόνων για αντοχή σε φωτιά η χρησιμοποίηση FRP παντού. Ο περιορισμός για τους χώρους τύπου E (other dry cargo holds) στους κανονισμούς των Νηογνομόνων δεν λαμβάνεται υπόψιν καθώς δεν υπάρχουν τέτοιοι χώροι στα πλοία που θα μελετήσουμε (bulkcarrier και crude oil tanker). Επίσης οι απαιτήσεις του δικτύου έρματος δεν υπερβαίνουν τις απαιτήσεις για πίεση και θερμοκρασία που θέτει η 3^η κλάση των κανονισμών των Νηογνομόνων και άρα δεν απαιτείται ειδική έγκριση από τους Νηογνομόνες. Επίσης αναφορικά με τις απαιτήσεις σε φωτιά σε δίκτυο σωληνώσεων έρματος, στους περισσότερους χώρους οι απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά είναι επιπέδου 3 (L3), σε κάποιους χώρους δεν υπάρχουν καθόλου απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά, ενώ σε δύο κατηγορίες χώρων (Accommodation service and control spaces, Open decks) οι απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά είναι επιπέδου 2W (L2W). Για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών κόστους θα θεωρήσουμε ισοδύναμα ότι σε όλους τους χώρους από όπου διέρχεται η σωλήνωση έρματος οι απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά είναι επιπέδου 3 (L3).

Τα πλοία στα οποία συγκρίνουμε το δίκτυο έρματος είναι δύο φορτηγά πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carrier) και δύο δεξαμενόπλοια (crude oil carrier). Τα στοιχεία τους δίνονται παρακάτω. Τα μήκη των σωληνώσεων έρματος προσδιορίστηκαν ως εξής:

- για το πλοίο 1 τα μήκη των σωληνώσεων έρματος για το μηχανοστάσιο (engine room) και το υπόλοιπο πλοίο (hull part) δίνονταν αναλυτικά από τα σχέδια
- για τα υπόλοιπα 3 πλοία έγινε εκτίμηση μήκους συγκρίνοντας τα διαγραμματικά σχέδια των σωληνώσεων με το GA ή το Capacity plan (για τις σωληνώσεις έρματος που βρίσκονται στο hull part).
- Όσον αφορά τις σωληνώσεις έρματος αυτών των 3 πλοίων που είναι στο μηχανοστάσιο έγινε μια πρώτη εκτίμηση μήκους συγκρίνοντας τα διαγραμματικά σχέδια των σωληνώσεων με το GA ή το Capacity plan (όπως και για το hull part) που στη συνέχεια διορθώθηκε για να προκύπτει ένα ποσοστό των σωληνώσεων έρματος στο μηχανοστάσιο επί του συνολικού μήκους των σωληνώσεων έρματος που να προσεγγίζει το αντίστοιχο ποσοστό που γνωρίζουμε για το πλοίο 1 (13% με μια επιτρεπτή απόκλιση 3%). Αυτή η διόρθωση έγινε λόγω της αδυναμίας καλής εκτίμησης του μήκους των σωληνώσεων έρματος στο μηχανοστάσιο από τα δοσμένα σχέδια. Για αυτό το λόγο και επειδή το κόστος αντικατάστασης των χαλύβδινων σωληνώσεων αφορά το μηχανοστάσιο (όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω), θα γίνεται διάκριση στην παρουσίαση των στοιχείων των σωληνώσεων ανάλογα με τον αν βρίσκονται στο hull part ή στο μηχανοστάσιο.

Το γεγονός ότι το πλοίο 4 έχει μικρότερο μήκος σωληνώσεων έρματος από το πλοίο 3, ενώ έχει μεγαλύτερο μήκος και DWT, οφείλεται στην διαφορετική σχεδίαση των σωληνώσεων έρματος στο hull part, όπου υπάρχει μία αντί για δύο κεντρικές σωληνώσεις έρματος που διασχίζουν όλο το πλοίο.

Οι παρακάτω ονομασίες που αναφέρονται στην κατεργασία της χαλύβδινης σωλήνωσης σημαίνουν:

- ERW & LSAW (Electric Resistant Welded & Longitudinal Submerged Arc Welded) που εννοείται ότι η δεδομένη σωλήνωση έχει ραφή υποδηλώνονται τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης
- Seamless είναι η σωλήνωση χάλυβα χωρίς ραφή (χωρίς συγκόλληση)
- SCH είναι πρότυπο που αντιστοιχεί σε τυποποίηση παχών (SCH 40, SCH 80, SCH 160)
- galv. ή galvanized σημαίνει ότι η σωλήνωση έχει υποστεί γαλβανισμό

Ο υπολογισμός βάρους των χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος του πλοίου 1 έγινε ως εξής: με δεδομένο ότι δίνονταν από τα σχέδια τα βάρη των σωληνώσεων στην γάστρα (hull part), υπολογίστηκε από την σχέση 6.1 η πυκνότητα του χάλυβα (ρ).

$$\text{Pipe Weight} = \pi/4 * (\text{OD}^2 - \text{ID}^2) * \rho * L \quad (6.1)$$

Όπου OD η εξωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε m, ID η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης σε m, ρ η πυκνότητα του υλικού σε kg/m³, L το μήκος της σωλήνωσης. Στην

συνέχεια με γνωστή την πυκνότητα του χάλυβα υπολογίστηκαν και τα βάρη των σωληνώσεων χάλυβα στο μηχανοστάσιο που δεν δίνονταν. Με παρόμοιο τρόπο υπολογίστηκαν τα βάρη των χαλύβδινων σωληνώσεων στα υπόλοιπα 3 πλοία.

Όσον αφορά την θερμοκρασία λειτουργίας που δεν δίνεται στα σχέδια των σωληνώσεων έρματος των ορισμένων πλοίων (1,2,4), μπορούμε με ασφάλεια να την υποθέσουμε στους 32 C όπως είναι στο πλοίο 3. Σε κάθε περίπτωση είμαστε εξασφαλισμένοι αναφορικά με τους κανονισμούς των Νηογνομόνων καθώς η κλάση 3 σωληνώσεων για την οποία προδιαγράφονται οι σωληνώσεις FRP σε πλοία έχει άνω όριο τους 200 C για δίκτυα νερού.

6.2.1 Στοιχεία σωληνώσεων έρματος πλοίου 1

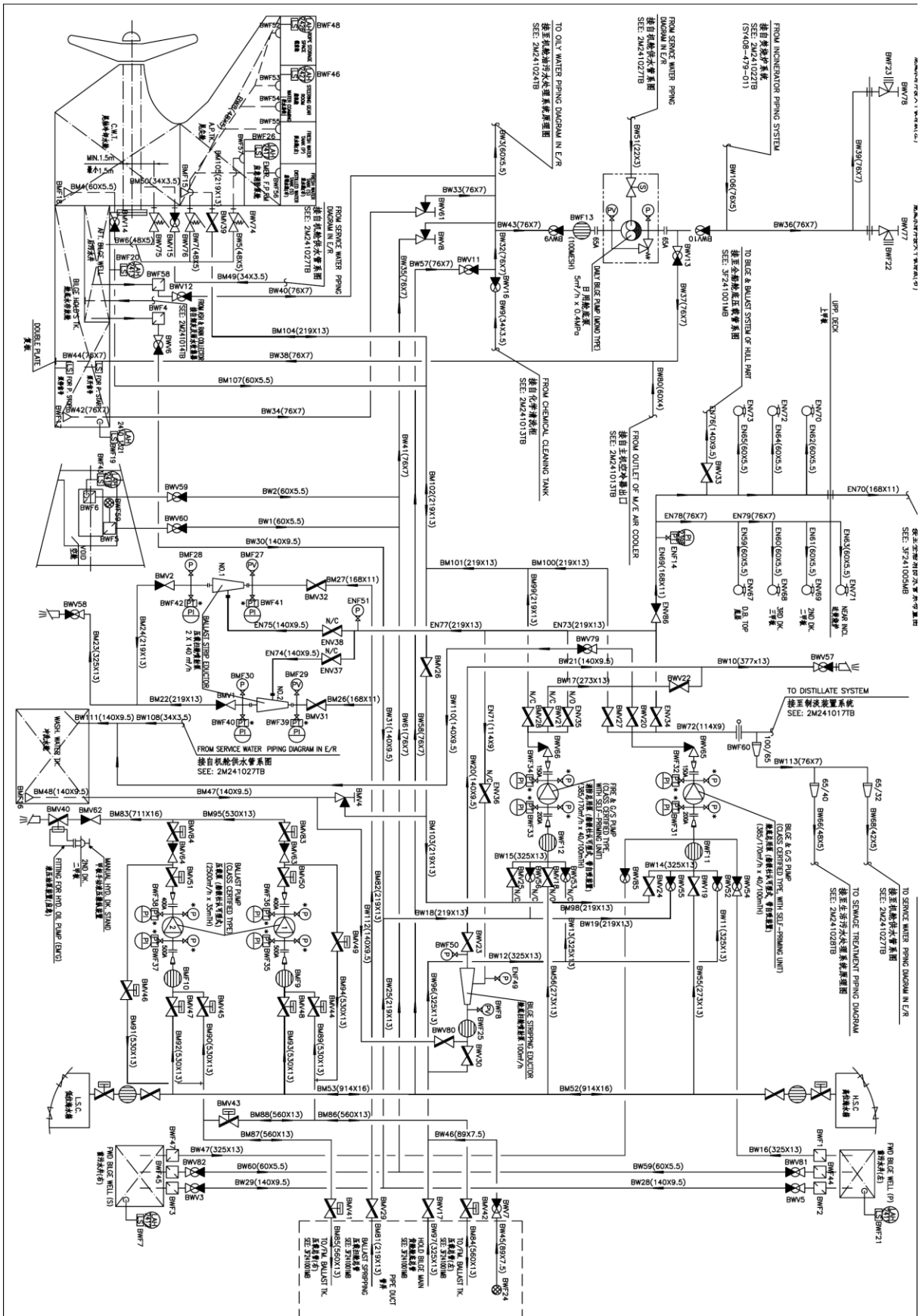
Επισυνάπτονται οι πίνακες με τα γενικά στοιχεία του πλοίου 1 (6.1) και με την πίεση λειτουργίας των σωληνώσεων έρματος του πλοίου 1 (6.2). Επίσης επισυνάπτονται στα σχήματα 6.1 και 6.2 τα διαγραμματικά σχέδια των σωληνώσεων έρματος του πλοίου 1 εκτός μηχανοστασίου (hull part) και στο μηχανοστάσιο αντίστοιχα, καθώς και τα στοιχεία των χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος του πλοίου 1 (πίνακας 6.3) όπως αυτά δίνονταν στα σχέδια ή όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με το παραπάνω εδάφιο.

Πίνακας 6.1: Γενικά στοιχεία πλοίου 1

LENGTH B.P.	282	m
BREADTH (MLD)	45	m
DEPTH (MLD)	24.8	m
DESIGN DRAFT (MLD)	16.5	m
SCANT.DRAFT (MLD)	18.3	m
DWT	176000	t
Τύπος πλοίου	Bulk Carrier	

Πίνακας 6.2: Πίεση λειτουργίας σωληνώσεων έρματος πλοίου 1

Ballast Pipe in engine room	0.33	MPa
Ballast system of hull part	0.4	MPa



Σχίσμα 6.2 Σχέδιο σωληνώσεων έρματος και υδροσυλλεκών πλοίου 1 στο μηχανοστάσιο

Πίνακας 6.3: Στοιχεία χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος πλοίου 1

Σωληνώσεις Έρματος	Ον. Διάμετρος	Εξ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Βάρος	Υλικό και κατεργασία σωλήνωσης
in Engine Room	DN (mm)	O.D. (mm)	THK (mm)	length (m)	w (kg)	material
	200	219	13	25	1640	seamless steel SCH. 80
	150	168	11	5	212	seamless steel SCH. 80
	700	711	16	25	6796	ERW & LSAW steel SCH. 160
	550	560	13	25	4346	ERW & LSAW steel SCH. 80
	500	530	13	10	1643	ERW & LSAW steel SCH. 80
	50	60	5.5	5	37	galv. seamless steel SCH. 80
	200	219	13	15	984	seamless steel SCH. 80
hull part						
	550	560	10	400	53785	ERW & LSAW steel SCH. 40
	500	530	10	35	4715	ERW & LSAW steel SCH. 40
	400	426	10	110	11208	ERW & LSAW steel SCH. 40
	200	219	8	190	7856	seamless steel SCH. 40
				Συνολικό μήκος	συν.βάρος	
				845	93220	

Μήκος Σωλ. HULL	735	m
Μήκος Σωλ. E. R.	110	m
Ποσ.μήκους σωλ. E.R.	13	%
Ποσ.μήκους σωλ. HULL	87	%

6.2.2 Στοιχεία σωληνώσεων έρματος πλοίου 2

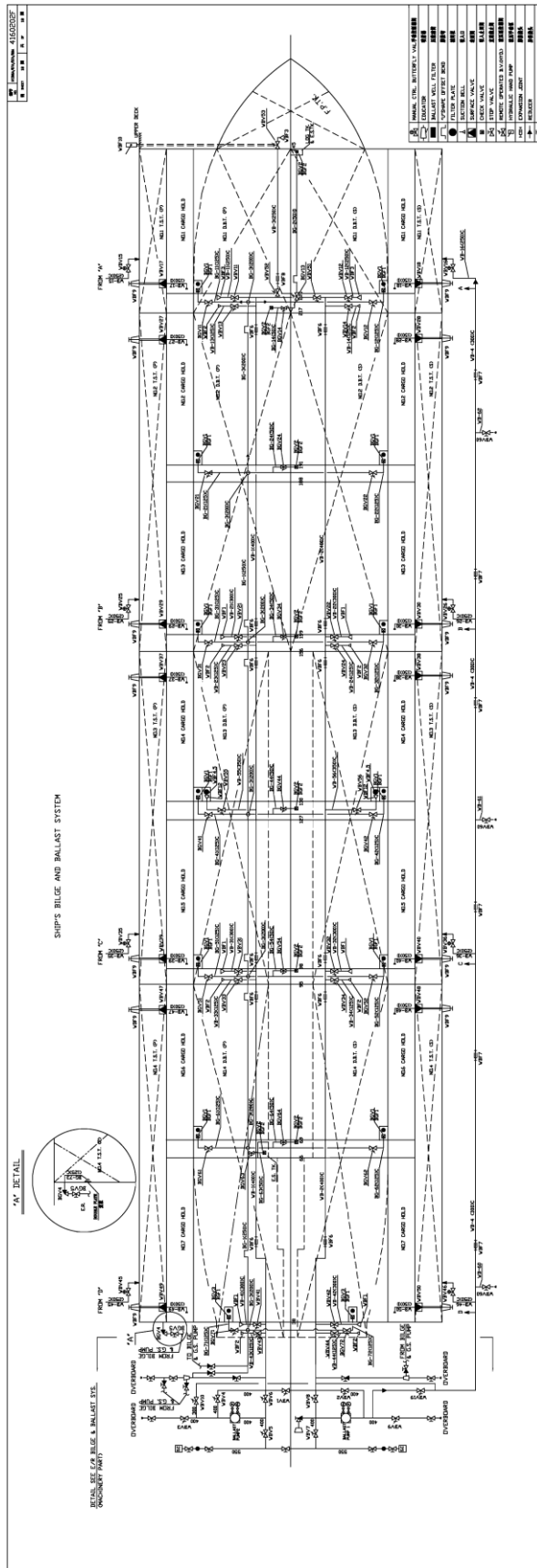
Επισυνάπτονται οι πίνακες με τα γενικά στοιχεία του πλοίου 2 (6.4) και με την πίεση λειτουργίας των σωληνώσεων έρματος του πλοίου 2 (6.5). Επίσης επισυνάπτεται στο σχήμα 6.3 το διαγραμματικό σχέδιο των σωληνώσεων έρματος του πλοίου 2, καθώς και τα στοιχεία των χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος του πλοίου 2 (πίνακας 6.6) όπως αυτά δίνονταν στα σχέδια ή όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με το παραπάνω εδάφιο.

Πίνακας 6.4: Γενικά στοιχεία πλοίου 2

LENGTH B.P.	217	m
BREADTH (MLD)	32.26	m
DEPTH (MLD)	19.6	m
DESIGN DRAFT (MLD)	12.5	m
SCANT.DRAFT (MLD)	14.2	m
DWT	75000	t
Τύπος πλοίου	Bulk Carrier	

Πίνακας 6.5: Πίεση λειτουργίας σωληνώσεων έρματος πλοίου 2

Ballast Pipe in engine room	0.5	MPa
Ballast system of hull part	0.5	MPa



Σχίμα 6.3 Σχέδιο σωληνώσεων έρματος και υδροσυλλεκτών πλοίου 2

Πίνακας 6.6: Στοιχεία χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος πλοίου 2

Σωληνώσεις Έρματος	Ον. Διάμετρος	Εξ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Βάρος	Υλικό και κατεργασία σωλήνωσης
hull part	DN (mm)	OD (mm)	THK (mm)	L (m)	(kg)	material
	400	426	13	270	35509	20# seameless steel pipe (GALV)
	300	325	13	140	13909	20# seameless steel pipe (GALV)
	250	273	13	95	7865	20# seameless steel pipe (GALV)
	350	351	13	15	1614	20# seameless steel pipe (GALV)
	150	168	16	85	5064	20# seameless steel pipe (GALV)
	125	140	10	25	796	20# seameless steel pipe (GALV)
	20	27	4	5	11	20# seameless steel pipe (GALV)
Μήκος σωλ. Έρματος στο Hull in Engine Room				635		
	300	325	13	10	994	20# seameless steel pipe (GALV)
	125	140	10	10	318	20# seameless steel pipe (GALV)
	300	325	13	25	2484	20# seameless steel pipe (GALV)
	400	426	13	40	5261	20# seameless steel pipe (GALV)
Μήκος σωλ. Έρματος E.R.				85	συν βάρος	
Συνολικό μήκος σωλ. Έρματος				720	73825	

ποσοστό σωλ. Hull επι συνολικού	88	%
ποσοστό σωλ. ER επι συνολικού	12	%

6.2.3 Στοιχεία σωληνώσεων έρματος πλοίου 3

Επισυνάπτονται οι πίνακες με τα γενικά στοιχεία του πλοίου 3 (6.7) και με την πίεση λειτουργίας των σωληνώσεων έρματος του πλοίου 3 (6.8). Επίσης επισυνάπτεται στο σχήμα 6.4 το διαγραμματικό σχέδιο των σωληνώσεων έρματος του πλοίου 3, καθώς και τα στοιχεία των χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος του πλοίου 3 (πίνακας 6.9) όπως αυτά δίνονταν στα σχέδια ή όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με το παραπάνω εδάφιο.

Πίνακας 6.7: Γενικά στοιχεία πλοίου 3

LENGTH B.P.	233	m
BREADTH (MLD)	42	m
DEPTH (MLD)	21.4	m
DESIGN DRAFT (MLD)	13.5	m
SCANT.DRAFT (MLD)	15.1	m
DWT	105000	t
Τύπος πλοίου	Crude Oil Carrier	

Πίνακας 6.8: Πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας σωληνώσεων έρματος πλοίου 3

Πίεση λειτουργίας σωλήνωσης έρματος	0.25	MPa
Θερμοκρασία λειτουργίας σωλήνωσης έρματος	32	C

Πίνακας 6.9: Στοιχεία χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος πλοίου 3

Σωληνώσεις Έρματος	Ον. Διάμετρος	Εξ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Βάρος	Υλικό και κατεργασία σωλήνωσης
hull part	DN (mm)	OD (mm)	THK (mm)	L (m)	(kg)	material
	450	457	13	290	40923	carbon steel ERW SCH80
	400	406	13	45	5621	carbon steel ERW SCH80
	300	325	13	290	28756	carbon steel ERW SCH80
	150	168	11	120	5076	carbon steel Seamless SCH 80
Μήκος σωλ. Έρματος στο Hull in Engine Room				745		
	450	457	13	20	2822	carbon steel ERW SCH80
	400	406	13	25	3123	carbon steel ERW SCH80
	550	560	13	20	3477	carbon steel ERW SCH80
	300	325	13	10	992	carbon steel ERW SCH80
	250	273	13	25	2066	carbon steel ERW SCH80
	100	114	9	5	116	carbon steel Seamless SCH 80
Μήκος σωλ. Έρματος E.R.				105	συν.βάρος	
Συνολικό μήκος σωλ. Έρματος				850	92972	

ποσοστό σωλ. Hull επι συνολικού	88	%
ποσοστό σωλ. ER επι συνολικού	12	%

6.2.4 Στοιχεία σωληνώσεων έρματος πλοίου 4

Επισυνάπτονται οι πίνακες με τα γενικά στοιχεία του πλοίου 4 (6.10) και με την πίεση λειτουργίας των σωληνώσεων έρματος του πλοίου 4 (6.11). Επίσης επισυνάπτεται στο σχήμα 6.5 το διαγραμματικό σχέδιο των σωληνώσεων έρματος του πλοίου 4, καθώς και τα στοιχεία των χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος του πλοίου 4 (πίνακας 6.12) όπως αυτά δίνονταν στα σχέδια ή όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με το παραπάνω εδάφιο.

Πίνακας 6.10: Γενικά στοιχεία πλοίου 4

LENGTH B.P.	258	m
BREADTH (MLD)	46	m
DEPTH (MLD)	24.4	m
DESIGN DRAFT (MLD)	16.2	m
SCANT.DRAFT (MLD)	17.5	m
DWT	153000	t
Τύπος πλοίου	Crude Oil Carrier	

Πίνακας 6.11: Πίεση λειτουργίας σωληνώσεων έρματος πλοίου 4

Πίεση σχεδίασης σωλήνωσης έρματος	0.34	MPa
-----------------------------------	------	-----

Πίνακας 6.12: Στοιχεία χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος πλοίου 4

Σωληνώσεις Έρματος	Ον. Διάμετρος	Εξ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Βάρος	Υλικό
Hull part	DN (mm)	OD (mm)	THK (mm)	L (m)	(kg)	material
	650	660.4	17	190	51300	cast steel (KCP)
	350	355.6	13	285	31350	cast steel (KCP)
	150	165.2	11	225	9450	cast steel (KCP)
Μήκος σωλ. Έρματος στο Hull in Engine Room				700		
	650	660.4	17	20	5400	cast steel (KCP)
	600	609.6	17	55	13695	cast steel (KCP)
	550	558.8	15	10	2010	cast steel (KCP)
	450	457.2	14	5	765	cast steel (KCP)
	200	216.3	13	18	1170	cast steel (KCP)
	150	165.2	11	5	210	cast steel (KCP)
Μήκος σωλ. Έρματος E.R.				113	συν.βάρος	
Συνολικό μήκος σωλ. Έρματος				813	115350	

ποσοστό σωλ. Hull επι συνολικού	86 %
ποσοστό σωλ. ER επι συνολικού	14 %

6.3 Υπολογισμός στοιχείων σωλήνωσης από FRP

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στο 3^ο κεφάλαιο, ο σχεδιαστής ενός συστήματος της σωλήνωσης από FRP μπορεί να επιλέξει μεταξύ της διατήρησης της ίδιας διαμέτρου (με αυτήν της χαλύβδινης σωλήνωσης για την ίδια εφαρμογή) ώστε να αξιοποιήσει το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και της μείωσης της εσωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης ώστε να μειώσει το αρχικό κόστος των σωληνώσεων. Συγκεκριμένα αναφέρεται σε Ιωαννίδη (1984) ότι λόγω της μικρότερης τραχύτητας των σωληνώσεων από σύνθετα υλικά, η διάμετρός τους μπορεί να είναι 20% μικρότερη από ότι σε μεταλλικούς σωλήνες για την ίδια απώλεια πίεσης. Επομένως επιλέγουμε να θεωρήσουμε την διάμετρο των σωληνώσεων FRP 20% μικρότερη σε σχέση με

τις χαλύβδινες σωληνώσεις του δικτύου έρματος για τα τέσσερα πλοία ώστε να εξισωθεί το κόστος λειτουργίας. Για να καθορίσουμε την σωλήνωση FRP πρέπει να ορίσουμε και το πάχος της, χρησιμοποιούμε την σχέση που αναφέραμε στο κεφάλαιο 3 που συσχετίζει εσωτερική πίεση σωλήνωσης, πάχος, επιτρεπτή περιφερειακή τάση και εξωτερική διάμετρο, λυμένη ως προς πάχος (σχέση 6.2).

$$t = P_i \cdot OD / (2 \cdot s + P_i) \quad (6.2)$$

Όπου P_i είναι η εσωτερική πίεση σχεδίασης (psi ή kg/cm^2), s η επιτρεπτή περιφερειακή τάση (psi ή kg/cm^2), OD η ελάχιστη εξωτερική διάμετρος της σωλήνας (in ή cm), t το ελάχιστο ενισχυμένο πάχος τοιχώματος που ισούται με το ελάχιστο πάχος τοιχώματος μείον το πάχος τυχόν προστατευτικής επένδυσης (in ή cm).

Επειδή όπως έχουμε ήδη αναφέρει το πάχος σωλήνωσης FRP προσαρμόζεται με έναν συντελεστή ασφαλείας 10 (Lewandowski and Britt 2004), έχουμε θεωρήσει στους υπολογισμούς μας μια εσωτερική πίεση δεκαπλάσια της πίεσης λειτουργίας σε κάθε δίκτυο έρματος ώστε το πάχος που βρίσκουμε να έχει ενσωματωμένο τον συντελεστή ασφαλείας. Την τιμή της επιτρεπτής περιφερειακής τάσης (s) την θεωρήσαμε ίση με 41.37 MPa που είναι η τιμή της επιτρεπτής περιφερειακής τάσης των σωληνώσεων Bondstrand για θαλάσσιες εφαρμογές (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012). Υπενθυμίζουμε ότι το υλικό FRP που έχουμε επιλέξει είναι ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη (GRE).

Ο υπολογισμός βάρους των FRP σωληνώσεων έγινε χρησιμοποιώντας την σχέση 6.1 και θεωρώντας μια συνηθισμένη τιμή πυκνότητας FRP υλικού ($\rho = 1743.8 \text{ kg/m}^3$). Στην συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες (6.13, 6.14, 6.15, 6.16) με τα στοιχεία των σωληνώσεων από FRP για κάθε πλοίο.

Πίνακας 6.13: Στοιχεία FRP σωληνώσεων έρματος πλοίου 1

Σωληνώσεις Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Βάρος	Υλικό και κατεργασία σωλήνωσης
in Engine Room	ID (mm)	THK (mm)	length (m)	w (kg)	material
	150	7	25	150	GRE
	120	5	5	17	GRE
	540	23	25	1773	GRE
	430	18	25	1104	GRE
	400	17	10	388	GRE
	40	2	5	2	GRE
	150	7	15	90	GRE
hull part					
	430	22	400	21780	GRE
	410	21	35	1735	GRE
	320	17	110	3451	GRE
	160	9	190	1582	GRE
				συν.βάρος	GRE
				32072	GRE

Πίνακας 6.14: Στοιχεία FRP σωληνώσεων έρματος πλοίου 2

Σωληνώσεις Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Βάρος	Υλικό και κατεργασία σωλήνωσης
hull part	ID (mm)	THK (mm)	length (m)	w (kg)	material
	320	21	270	10587	GRE
	240	16	140	3140	GRE
	200	13	95	1440	GRE
	260	17	15	387	GRE
	110	8	85	439	GRE
	100	7	25	103	GRE
	20	2	5	1	GRE
in Engine Room					GRE
	240	16	10	224	GRE
	100	7	10	41	GRE
	240	16	25	561	GRE
	320	21	40	1568	GRE
				συν.βάρος	
				18491	

Πίνακας 6.15: Στοιχεία FRP σωληνώσεων έρματος πλοίου 3

Σωληνώσεις Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Βάρος	Υλικό και κατεργασία σωλήνωσης
hull part	ID (mm)	THK (mm)	length (m)	w (kg)	material
	340	11	290	6131	GRE
	300	10	45	764	GRE
	240	8	290	3150	GRE
	120	4	120	326	GRE
in Engine Room					
	340	11	20	423	GRE
	300	10	25	424	GRE
	430	14	20	681	GRE
	240	8	10	109	GRE
	200	7	25	198	GRE
	80	3	5	7	GRE
				συν.βάρος	
				12213	

Πίνακας 6.16: Στοιχεία FRP σωληνώσεων έρματος πλοίου 4

Σωληνώσεις Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Βάρος	Υλικό και κατεργασία σωλήνωσης
hull part	ID (mm)	THK (mm)	length (m)	w (kg)	material
	500	22	190	11948	GRE
	260	12	285	5094	GRE
	110	5	225	708	GRE
in Engine Room					
	500	22	20	1258	GRE
	460	20	55	2891	GRE
	420	18	10	432	GRE
	340	15	5	146	GRE
	150	7	18	108	GRE
	110	5	5	16	GRE
				συν.βάρος	
				22601	

Από τα παραπάνω στοιχεία μπορούμε να υπολογίσουμε και την μείωση του βάρους που δημιουργεί η χρήση σωληνώσεων έρματος από FRP σε σχέση με το χάλυβα για κάθε πλοίο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.17.

Πίνακας 6.17: Μείωση βάρους δικτύου έρματος από την χρήση FRP

	Μείωση βάρους λόγω FRP (tons)	Ποσοστό μείωσης βάρους λόγω FRP (%)
πλοίο 1	61.148	65.6
πλοίο 2	55.334	75
πλοίο 3	80.759	86.9
πλοίο 4	92.749	80.4

6.4 Σύγκριση κόστους σωληνώσεων χάλυβα και FRP

Για να δούμε αν συμφέρει η αντικατάσταση του χάλυβα με FRP θα πρέπει να εξετάσουμε την διαφορά μεταξύ του συνολικού κόστους τους στην διάρκεια ζωής ενός πλοίου (30 χρόνια).

Όσον αφορά το κόστος αγοράς των χαλύβδινων σωληνώσεων τα στοιχεία προέρχονται από τιμοκαταλόγους δύο επιχειρήσεων της ναυπηγο-επισκευαστικής ζώνης Περάματος για χαλύβδινους σωλήνες με ραφή. Επειδή οι τιμές που δίνονται στον τιμοκατάλογο της επιχείρησης 2 είναι κατά 20% χαμηλότερες από τις αντίστοιχες της επιχείρησης 1, επιλέγω να χρησιμοποιήσω στους υπολογισμούς κόστους τις τιμές που δίνονται από την επιχείρηση 1 μειωμένες κατά 10%. Αυτοί οι τιμοκατάλογοι όπως και άλλοι (από Ναυπηγεία της Κίνας και της Τουρκίας) καθώς και οι επεξηγήσεις που τους συνοδεύουν δίνονται στο Παράστημα Β. Σημειώνεται ότι για τον τιμοκατάλογο της επιχείρησης 1 ότι στην περίπτωση που το πάχος των σωληνώσεων είναι σύμφωνα με SCH 80 και όχι SCH 40 τότε υπάρχει μια προσαύξηση 20% επί των δοσμένων τιμών, ενώ αν οι σωλήνες χάλυβα είναι γαλβανισμένες τότε υπάρχει μια προσαύξηση 30% επί των δοσμένων τιμών. Για τις σωληνώσεις χάλυβα με μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο από την μέγιστη που δίνεται στον τιμοκατάλογο της επιχείρησης 1 (610 mm) εκτιμάμε μια λογική τιμή βάση των προηγούμενων τιμών του τιμοκαταλόγου. Τα δεδομένα από το κόστος αγοράς των FRP σωληνώσεων προέρχονται από εταιρεία παραγωγής προϊόντων από σύνθετα υλικά (Τιριακίδης 2016) με μια αύξηση 10% επί της τιμής ώστε να συνυπολογισθεί και η πιο ακριβή ρητίνη που αντιστοιχεί σε επίπεδο 3 αντοχής σε φωτιά.

Όσον αφορά το κόστος εγκατάστασης των σωληνώσεων χάλυβα (χωρίς να συμπεριλαμβάνουμε το κόστος των στηρίξεων-αγκυρώσεων) δίνεται στους τιμοκαταλόγους των δύο επιχειρήσεων της ναυπηγο-επισκευαστικής ζώνης Περάματος. Όμοια με παραπάνω επιλέγω να χρησιμοποιήσω στους υπολογισμούς κόστους τις τιμές που δίνονται από την επιχείρηση 1 μειωμένες κατά 10%. Όμως επειδή αυτό το κόστος περιλαμβάνει και την εξάρμωση των παλιών σωληνώσεων χάλυβα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όταν εγκαθίστανται για πρώτη φορά οι σωληνώσεις χάλυβα το κόστος είναι το 50% του κόστους εγκατάστασης που δίνεται, καθώς αφορά μόνο άρμωση και όχι εξάρμωση. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το κόστος εγκατάστασης της σωλήνωσης FRP είναι μικρότερο κατά 30-40% σε σχέση με τις χαλύβδινες σωληνώσεις (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, 2012). Επομένως κάνοντας μια συντηρητική εκτίμηση θεωρούμε ότι το κόστος εγκατάστασης των σωληνώσεων FRP θα είναι 30% μικρότερο από το κόστος εγκατάστασης του χάλυβα, όπως ορίστηκε παραπάνω.

Το κόστος αντικατάστασης μιας σωλήνωσης περιλαμβάνει το κόστος αγοράς των νέων σωλήνων και εγκατάστασης τους αφού αφαιρεθούν πρώτα οι φθαρμένες. Όσον αφορά τον ρυθμό αντικατάστασης των σωληνώσεων έρματος από χάλυβα έχει παρατηρηθεί εμπειρικά ότι αυξημένη φθορά παρουσιάζουν οι σωληνώσεις έρματος του μηχανοστασίου και όχι αυτές που βρίσκονται στην υπόλοιπη γάστρα (hull part). Πιο συγκεκριμένα, συνήθως οι αλλαγές σωληνώσεων χάλυβα στα δίκτυα έρματος αρχίζουν σταδιακά στα 3 χρόνια και αφορούν κυρίως σωληνώσεις του δικτύου ψύξης με έρμα. Στα 5 χρόνια οι αλλαγές μεγαλώνουν και γύρω στα 8 χρόνια σχεδόν τριπλασιάζονται σε σχέση με την ποσότητα που χρειάζεται αλλαγή στα 3

πρώτα χρόνια. Αυτή η εμπειρική παρατήρηση είναι λογική καθώς η πλειοψηφία των σωληνώσεων έρματος στο μέρος της γάστρας είναι ευθείες σωληνώσεις που διαρρέουν το πλοίο στο διάμηκες όπου δεν δημιουργούνται τα φαινόμενα σπηλαιώσης που δημιουργούνται στις σωληνώσεις έρματος του μηχανοστασίου με τις πολλές αλλαγές διεύθυνσης των σωληνώσεων. Λαμβάνοντας υπόψιν την παραπάνω εμπειρική παρατήρηση εκτιμάμε ότι στα 30 χρόνια λειτουργίας θα απαιτηθεί τουλάχιστον 2 φορές αντικατάσταση όλων των χαλύβδινων σωληνώσεων έρματος που βρίσκονται στο μηχανοστάσιο. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υπολογίσουμε σαν κόστος αντικατάστασης των σωληνώσεων χάλυβα δύο φορές το κόστος αγοράς των σωληνώσεων έρματος του μηχανοστασίου και δύο φορές το κόστος εγκαταστάσής τους. Όμοια με παραπάνω επιλέγω να χρησιμοποιήσω στους υπολογισμούς κόστους τις τιμές που δίνονται από την επιχείρηση 1 μειωμένες κατά 10%. Λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του FRP απέναντι στην διάβρωση, μπορούμε να έχουμε μια ασφαλή εκτίμηση ότι η σωλήνωση από FRP μπορεί να βρίσκεται σε λειτουργία χωρίς αντικατάσταση σε όλη την διάρκεια ζωής του πλοίου. Αυτή είναι και η εκτίμηση των μεγαλύτερων εταιρειών παραγωγής FRP σωληνώσεων (National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, Amiantit και άλλες). Συνεπώς δεν θα υπολογίσουμε κόστος αντικατάστασης στην περίπτωση της σωλήνωσης έρματος από FRP.

Το κόστος λειτουργίας στην διάρκεια ζωής του πλοίου για σωλήνωση χάλυβα και FRP μπορούμε να το θεωρήσουμε ίδιο λόγω της παραδοχής που έχουμε κάνει για 20% μικρότερη διάμετρο των σωληνώσεων FRP που οδηγούν σε ίδιες απώλειες πίεσης με τους σωλήνες χάλυβα. Όσον αφορά το κόστος συντήρησης (βαφές, επισκευές) ισχύει γενικά ότι για τις σωληνώσεις FRP μπορούμε να υποθέσουμε αμελητέα έξοδα συντήρησης ενώ οι χαλύβδινες σωληνώσεις έχουν αρκετά πιο μεγάλο κόστος συντήρησης (Composites & Metal Products). Ωστόσο στο βαθμό που δεν εντοπίσαμε κάποιο στοιχείο για το κόστος συντήρησης δεν θα λάβουμε υπόψιν μας στην σύγκριση κόστους σωληνώσεων χάλυβα και FRP.

Στην συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες με τους υπολογισμούς του συνολικού κόστους των σωληνώσεων έρματος των τεσσάρων πλοίων για χάλυβα και FRP στη διάρκεια ζωής του πλοίου.

Πίνακας 6.18: Κόστος σωλήνωσης έρματος από χάλυβα, πλοίο 1

Σωλ. Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Κόστος αγοράς και εγκατάστασης / μέτρο	Κόστος αγοράς	Κόστος εγκατάστασης	Κόστος αντικατάστασης
in Engine Room	ID (mm)	THK (mm)	length (m)	€/m	€	€	€
	193	13	25	286	3578	1789	14310
	146	11	5	255	637	318	2547
	679	16	25	1530	19125	9563	76500
	534	13	25	1107	13838	6919	55350
	504	13	10	995	4977	2489	19908
	49	5.5	5	77	194	97	774
	193	13	15	286	2147	1073	8586
Hull part							
	540	10	400	923	184500	92250	-
	510	10	35	830	14522	7261	-
	406	10	110	628	34551	17276	-
	203	8	190	239	22658	11329	-

Συνολικό κόστος αγοράς (€)	Συνολικό κόστος εγκατάστασης (€)	Συνολικό κόστος αντικατάστασης (€)
300724	150362	177975
Συνολικό κόστος σωληνώσεων χάλυβα στην διάρκεια ζωής του πλοίου (€)	629061	

Πίνακας 6.19: Κόστος σωλήνωσης έρματος από FRP, πλοίο 1

Σωληνώσεις Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Κόστος / μέτρο	Κόστος αγοράς	Κόστος εγκατάστασης
in Engine Room	ID (mm)	ΤΗΚ (mm)	€/m	€	€
	150	7	54	1359	1252
	120	5	51	253	223
	540	23	519	12964	6694
	430	18	348	8700	4843
	400	17	303	3034	1742
	40	2	31	156	68
	150	7	54	816	751
Hull part					
	430	22	405	161971	64575
	410	21	369	12926	5083
	320	17	232	25536	12093
	160	9	79	14965	7930

Συνολικό κόστος αγοράς (€)	Συνολικό κόστος εγκατάστασης (€)
242680	105253
Συνολικό κόστος σωληνώσεων FRP στην διάρκεια ζωής του πλοίου (€)	347934

Πίνακας 6.20: Κόστος σωλήνωσης έρματος από χάλυβα, πλοίο 2

Σωλ. Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Κόστος αγοράς και εγκατάστασης / μέτρο	Κόστος αγοράς	Κόστος εγκατάστασης	Κόστος αντικατάστασης
in Engine Room	ID (mm)	THK (mm)	length (m)	€/m	€	€	€
	400	13	270	817	110249	55125	-
	299	13	140	497	34808	17404	-
	247	13	95	406	19285	9642	-
	325	13	15	638	4782	2391	-
	136	16	85	276	11735	5868	-
	120	10	25	185	2311	1155	-
	19	4	5	37	94	47	-
in Engine Room							
	299	13	10	497	2486	1243	9945
	120	10	10	185	924	462	3697
	299	13	25	497	6216	3108	24863
	400	13	40	817	16333	8167	65333

Συνολικό κόστος αγοράς	Συνολικό κόστος εγκατάστασης	Συνολικό κόστος αντικατάστασης
209222	104611	103838
Συνολικό κόστος σωληνώσεων χάλυβα στην διάρκεια ζωής του πλοίου	417671	

Πίνακας 6.21: Κόστος σωλήνωσης έρματος από FRP, πλοίο 2

Σωληνώσεις Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Κόστος / μέτρο	Κόστος αγοράς	Κόστος εγκατάστασης
in Engine Room	ID (mm)	ΤΗΚ (mm)	€/m	€	€
	320	21	277	74792	38587
	240	16	187	26217	12183
	200	13	136	12946	6750
	260	17	198	2967	1674
	110	8	60	5103	4107
	100	7	50	1241	809
	20	2	25	124	33
in Engine Room				0	
	240	16	187	1873	870
	100	7	50	496	324
	240	16	187	4682	2175
	320	21	277	11080	5717

Συνολικό κόστος αγοράς	Συνολικό κόστος εγκατάστασης
141521	73228
Συνολικό κόστος σωληνώσεων FRP στην διάρκεια ζωής του πλοίου	214749

Πίνακας 6.22: Κόστος σωλήνωσης έρματος από χάλυβα, πλοίο 3

Σωλ. Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Κόστος αγοράς και εγκατάστασης / μέτρο	Κόστος αγοράς	Κόστος εγκατάστασης	Κόστος αντικατάστασης
in Engine Room	ID (mm)	THK (mm)	length (m)	€/m	€	€	€
	431	13	290	883	128099	64049	-
	380	13	45	754	16961	8481	-
	299	13	290	459	66555	33278	-
	146	11	120	255	15293	7646	-
in Engine Room							
	431	13	20	883	8834	4417	35338
	380	13	25	678	8481	4240	33923
	534	13	20	1107	11070	5535	44280
	299	13	10	413	2066	1033	8262
	247	13	25	375	4685	2342	18738
	96	9	5	138	346	173	1382

Συνολικό κόστος αγοράς	Συνολικό κόστος εγκατάστασης	Συνολικό κόστος αντικατάστασης
262389	131194	141923
Συνολικό κόστος σωληνώσεων χάλυβα στην διάρκεια ζωής του πλοίου	535506	

Πίνακας 6.23: Κόστος σωλήνωσης έρματος από FRP, πλοίο 3

Σωλ. Έρματος in Engine Room	Εσ. Διάμετρος ID (mm)	Πάχος ΤΗΚ (mm)	Κόστος / μέτρο €/m	Κόστος αγοράς €	Κόστος εγκατάστασης €
	340	11	173	50140	44835
	300	10	143	6455	5936
	240	8	100	29082	23294
	120	4	44	5323	5352
in Engine Room					
	340	11	173	3458	3092
	300	10	143	3586	2968
	430	14	267	5339	3875
	240	8	100	1003	723
	200	7	77	1917	1640
	80	3	36	179	121

Συνολικό κόστος αγοράς	Συνολικό κόστος εγκατάστασης
106482	91836
Συνολικό κόστος σωληνώσεων FRP στην διάρκεια ζωής του πλοίου	198318

Πίνακας 6.24: Κόστος σωλήνωσης έρματος από χάλυβα, πλοίο 4

Σωλ. Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Μήκος	Κόστος αγοράς και εγκατάστασης / μέτρο	Κόστος αγοράς	Κόστος εγκατάστασης	Κόστος αντικατάστασης
in Engine Room	ID (mm)	THK (mm)	length (m)	€/m	€	€	€
	626.4	17	190	1188	112860	56430	-
	329.6	13	285	491	69896	34948	-
	143.2	11	225	212	23895	11948	-
in Engine Room							
	626.4	17	20	1188	11880	5940	47520
	575.6	17	55	1098	30195	15098	120780
	528.8	15	10	923	4613	2306	18450
	429.2	14	5	736	1841	920	7362
	190.3	13	18	239	2147	1073	8586
	143.2	11	5	212	531	266	2124

Συνολικό κόστος αγοράς	Συνολικό κόστος εγκατάστασης	Συνολικό κόστος αντικατάστασης
257857	128928	204822
Συνολικό κόστος σωληνώσεων χάλυβα στην διάρκεια ζωής του πλοίου	591607	

Πίνακας 6.25: Κόστος σωλήνωσης έρματος από FRP, πλοίο 4

Σωλ. Έρματος	Εσ. Διάμετρος	Πάχος	Κόστος / μέτρο	Κόστος αγοράς	Κόστος εγκατάστασης
in Engine Room	ID (mm)	THK (mm)	€/m	€	€
	500	22	474	90094	39501
	260	12	148	42139	24464
	110	5	46	10424	8363
in Engine Room					
	500	22	474	9484	4158
	460	20	397	21849	10568
	420	18	343	3425	1614
	340	15	224	1118	644
	150	7	54	979	751
	110	5	46	232	186

Συνολικό κόστος αγοράς	Συνολικό κόστος εγκατάστασης
179743	90250
Συνολικό κόστος σωληνώσεων FRP στην διάρκεια ζωής του πλοίου	269993

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.26, η αντικατάσταση των σωληνώσεων χάλυβα με FRP δημιουργεί μία αρκετή σημαντική μείωση του κόστους των σωληνώσεων έρματος στην διάρκεια ζωής του πλοίου που κυμαίνεται περίπου από 44 έως 63 % του κόστους της σωλήνωσης έρματος από χάλυβα.

Πίνακας 6.26: Σύγκριση κόστους σωληνώσεων έρματος από χάλυβα και FRP τεσσάρων πλοίων

	Συνολικό κόστος σωλ. χάλυβα στην διάρκεια ζωής του πλοίου €	Συνολικό κόστος σωλ. FRP στην διάρκεια ζωής του πλοίου €	Μείωση κόστους από την χρήση FRP €	Ποσοστό μείωσης κόστους ως μέρος του κόστους των σωληνώσεων χάλυβα %
Πλοίο 1	629061	347934	281127	44.7
Πλοίο 2	417671	214749	202922	48.6
Πλοίο 3	535506	198318	337188	63.0
Πλοίο 4	591607	269993	321614	54.4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φάνηκε από την σύγκριση κόστους των σωληνώσεων έρματος από χάλυβα και FRP στην διάρκεια ζωής των τεσσάρων πλοίων (30 χρόνια), η εξοικονόμηση κόστους που προσφέρει η αντικατάσταση χάλυβα με FRP είναι πολύ μεγάλη. Επιπρόσθετα υπενθυμίζουμε ότι δεν λάβαμε υπόψιν το κόστος συντήρησης και επισκευών που είναι μεγαλύτερο στις σωληνώσεις από χάλυβα. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η αισθητά μεγαλύτερη μείωση του κόστους ως μέρους του κόστους χάλυβα που βρήκαμε (44 ως 63%) σε σχέση με παλιότερες έρευνες (15%) οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως:

- το γεγονός ότι εξετάσαμε τα κόστη για τις σωληνώσεις από τα δύο υλικά στην διάρκεια ζωής του πλοίου, οδήγησε στην αύξηση του κόστους των σωληνώσεων χάλυβα λόγω της φθοράς τους από την διάβρωση και την αντικατάστασή τους (αυτών που βρίσκονται στο μηχανοστάσιο)
- το γεγονός ότι οι τιμές που πήραμε προέρχονται από ελληνικές επιχειρήσεις οδηγεί σε μια υπερεκτίμηση του κόστους των σωληνώσεων χάλυβα καθώς ο χάλυβας είναι πιο ακριβός στην Ελλάδα
- στην αυτοματοποίηση της παραγωγής σωληνώσεων από FRP σε σχέση με την δεκαετία του 1970, που έχει μειώσει συγκριτικά το κόστος παραγωγής τους

Αναφορικά με τους περιορισμούς των Νηογνώμωνων μπορούμε να αναφέρουμε ότι το βασικό πρόσκομμα στην δυνατότητα πλήρους αντικατάστασης των χαλύβδινων σωληνώσεων πλοίου από FRP εντοπίζεται στην αντοχή σε φωτιά. Με τα παρόντα δεδομένα η δυνατότητα ριζικής αναθεώρησης των κανονισμών γίνεται να προέλθει μόνο με έναν συνδυασμό βελτίωσης της αντοχής σε φωτιά των χρησιμοποιούμενων ρητινών και προσαρμογής των συστημάτων πυρόσβεσης στην διασφάλιση της ακεραιότητας της FRP σωληνώσεως σε φωτιά. Ωστόσο ήδη υπάρχουν δίκτυα σωληνώσεων νεότευκτων πλοίων που κατασκευάζονται από FRP (έρμα, πόσιμο νερό, αέρα, αποχέτευση). Επίσης οι περιορισμοί από τους Νηογνώμονες στην χρήση FRP για τον ίδιο τύπο δικτύου σωληνώσεων πλοίου ανάλογα με τον χώρο του πλοίου αποτρέπει την επέκταση της χρήσης του ακόμα και σε μέρη δικτύων που επιτρέπεται καθώς αυτό απαιτεί δύο διαδικασίες σχεδίασης (μία για το χάλυβα και μία για το FRP) καθώς και προσθέτει περιπλοκότητα κατά την εγκατάσταση των «μεικτών» δικτύων. Επίσης υπάρχουν υπό διερεύνηση ζητήματα γύρω από τον προσδιορισμό της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς των σωληνώσεων FRP σε εφελκυσμό και κόπωση.

Συμπερασματικά μπορούμε να τονίσουμε ότι η χρήση σωληνώσεων FRP σε δίκτυα έρματος μπορεί να μειώσει αισθητά το βάρος των σωληνώσεων και το κόστος στην διάρκεια ζωής του πλοίου. Μια νέα προσέγγιση αναφορικά με την χρήση σωληνώσεων FRP σε πλοία θα μπορούσε να αφορά την μελέτη των μηχανικών απαιτήσεων και του κόστους σωληνώσεων FRP σε πιο απαιτητικά μέρη δικτύων σωληνώσεων (αναφορικά με απαιτήσεις πίεσης και θερμοκρασίας).

Παραρτήματα

Παράρτημα Α – Κατάλογος μεγάλων εταιρειών σωληνώσεων FRP

National Oilwell Varco Fiber Glass Systems (U.S.A)
Izfrp (China)
ZCL (Canada)
Balaji fiber reinforced (India)
Future Pipe Industries (Dubai)
Ashland (U.S.A)
Chemical Process Piping Pvt Ltd (Singapore)
Amiantit Company (Saudi Arabia)
Hobas (U.S.A)
Graphite India (India)
AMERON (πλέον National Oilwell Varco Fiber Glass Systems)

Παράρτημα Β – Τιμοκατάλογοι χαλύβδινων σωληνώσεων πλοίου

Παρακάτω παρουσιάζονται διάφοροι τιμοκατάλογοι και οι επισημάνσεις που τους συνοδεύουν.

Προσφορά σωληνουργικών εργασιών από επιχείρηση 1 ναυπηγο-επισκευαστικής ζώνης Περάματος

Πίνακας Β1: Προσφορά Σωληνουργικών Εργασιών

Διάμετρος	Διάμετρος	Εξωτερική Διαμετρο Σωλήνας	Πλάτος Σωλήνας	Pipe Schedule 40	Φλάντζες Ανοιχτές (παλίες – Νεες) Τόρνου
Inches	Mm	mm	Mm	Euro/m	Euro
1"	25,4	33,7	3,6	32,00	11
1,5"	38,1	48,3	4	43,00	14
2"	50,8	60,3	4	57,00	19
2,5"	63,5	76,1	5	66,00	22
3"	76,2	88,9	5,6	94,00	31
4"	101,6	114,3	6,3	128,00	43
5"	127	139,7	6,3	158,00	53
6"	152,4	168,3	7,1	236,00	76
8"	203,2	219,1	8	265,00	84
10"	254	273	8,8	347,00	110
12"	304,8	323,9	10	425,00	135
14"	355,6	355,6	12,5	545,00	165
16"	406,4	406,4	12,5	698,00	220
18"	457,2	457,2	12,5	818,00	280
20"	508	508,2	12,5	922,00	300
22"	558,8	559	12,5	1025,00	330
24"	609,6	610	12,5	1220,00	390

Σημείωση : Κατασκευή Φλάντζας 50% επί της τιμής στον άνω πίνακα.

Γενικές Παρατηρήσεις :

- Οι άνω τιμές ισχύουν μόνο για την επισκευαστική ζώνη Περάματος και νέου μόλου Δραπετσώνας. Για Κυνοσούρα επιβαρύνεστε με 10% επί των τιμών ,ενώ για Ελευσίνα επιβαρύνεστε με 25% επί των τιμών.
- Οι ως άνω τιμές αναφέρονται για εξάρμωση παλαιών διαμόρφωση & κατασκευή τοποθέτηση νέων σωληνώσεων, μετά συγκολλήσεων με νέα παρεμβύσματα και κοχλίες.
- Στηρίγματα σωλήνων φουρκέτα (U Bolts) θα χρεώνονται με την τιμή των 5,50%Euro /inch ανάλογα τη διάμετρο.

- Στηρίγματα σωλήνων από γωνίες θα χρεώνονται με την τιμή των 5.0 Euro / kg. Τεμάχια μικρότερα των 5 Kg θα χρεώνονται με 5Kg.
- Κομμάτια σωλήνας μικρότερα του ενός μέτρου θα χρεώνονται ίσα με 1 μέτρο.
- Η εξάρμωση & άρμωση των σωληνώσεων προς διευκόλυνση θα χρεώνεται με το 50% της αξίας της σωλήνας αντίστοιχης διαμέτρου.
- Η εξάρμωση & άρμωση του ίδιου επιστομίου ,βάνας ,ολισθένουσας, B/F value θα χρεώνεται με την τιμή του ενός 1 μέτρου σωλήνας διαμέτρου.
- Η αντικατάσταση τοποθέτηση καμπύλης θα χρεώνεται με την τιμή του 1.5 ενάμιση μέτρου σωλήνας αντίστοιχης διαμέτρου.
- Κούρμπες σωλήνα σε κουμπαδόρο θα χρεώνεται με την τιμή του 1 ενός μέτρου σωλήνας αντίστοιχης διαμέτρου.
- Η αντικατάσταση η τοποθέτηση συστολής θα χρεώνεται με την τιμή του 1.5 ενάμιση μέτρου σωλήνας αντίστοιχης διαμέτρου.
- Η κατασκευή Ταφ θα χρεώνεται με την τιμή των 2 μέτρου σωλήνας της μεγαλύτερης διαμέτρου.
- Μασον στις σωληνώσεις θα χρεώνεται με 1 μέτρο σωλήνα αντίστοιχης διαμέτρου.
- Οι διαπεράσεις σωληνών και η τοποθέτηση διαμαντιών στις διαπεράσεις καταστρώματος και φρακτών θα χρεώνονται με την τιμή :2 μέτρων σωλήνας αντίστοιχης διαμέτρου.
- Σωλήνες με εξαρτήματα βιδωτά από 1"-2":
 - α) Διάνοιξη σπειρωμάτων θα χρεώνεται με 9.5 Euro /inch
 - β) Τα εξαρτήματα που θα τοποθετούνται θα χρεώνονται με το τεμάχιο και την ελάχιστη τιμή του ενός 1μέτρου σωλήνας ,αντίστοιχης διαμέτρου.
- Περιστροφής 180° θα χρεώνεται με το 1/3 της τιμής μονάδος αντικατάστασης σωλήνας αντίστοιχης διαμέτρου.
- Προσαυξήσεις επί των ανωτέρω τιμών:
 - α) Σωλήνες sch 8020%
 - β) Σωλήνες γαλβανισμένες.....30%
 - γ) Σωλήνες υδραυλικές υψηλής πίεσεως.....35%
 - δ) Σωλήνες εκτός καταστρώματος20%
 - ε) Όταν δε μπορεί να γίνει χρήση φλόγας και η εξάρμωση γίνει με κοπίδι ,σφυρί ,κλειδί ,θα υπάρχει επιβάρυνση.....20%
- Στις άνω τιμές δε συμπεριλαμβάνονται σκαλωσιές
- Οι τιμές ισχύουν για ωράριο εργασιών: 07:00-17:00, εάν κριθεί σκόπιμο για τις ανάγκες του πλοίου να χρησιμοποιηθεί επιπρόσθετες εργατοώρες θα χρεώσετε με 38 Euro ανά 1 ώρα ανά εργαζόμενο.

Στις άνω τιμές συμπεριλαμβάνονται:

- Κύρια και δευτερεύοντα υλικά.
- Όλα τα ελάσματα είναι αμμοβολισμένα και βαμμένα με ένα χέρι Printer.
- Όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την εκτέλεση των εργασιών.
- Αέρια κοπής (οξυγόνο ,προπάνιο κ.τ.λ).
- Σύρμα συγκόλλησης ,ηλεκτρόδια.
- Ασφάλεια των εργαζομένων στους προβλεπόμενους οργανισμούς.
- Απομάκρυνση του scrap. Το scrap ανήκει στην εταιρεία μας.

Προσφορά σωληνοργικών εργασιών από επιχείρηση 2 ναυπηγο-επισκευαστικής ζώνης Περάματος

Πίνακας Β2: Προσφορά Σωληνοργικών Εργασιών (ευρώ)

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	SCH-40	ASA	
	/ΜΕΤΡΟ	/ΚΑΜΠΥΛΗ	/ΦΛΑΝΤΖΑ
1"	27	20	13
1 1/4"	30	23	18
1 1/2"	48	28	24
2"	57	35	30
2 1/2"	76	40	35
3"	83	45	40
4"	95	50	45
5"	115	85	50
6"	150	120	55
8"	195	195	60
10"	260	260	70
12"	340	340	80
14"	435	435	95
16"	570	520	115

Η τιμή εκάστης συστολής θα χρεώνεται ίση με ένα (1) μέτρο σωλήνα της αντιστοίχου μεγάλης διαμέτρου. Στηρίγματα U-Bolts χρεώνονται 6ευ/in. Κατασκευή βάσεων στηριγμάτων χρεώνονται προς 3,8ευ/kg, στηρίγματα κάτω από 5kg χρεώνονται 5kg Για το γύρισμα των σωλήνων με υδραυλικούς κουρμαδόρους η τιμή ανά ίντσα ίση με την τιμή ενός μέτρου σωλήνωσης αντιστοίχου διαμέτρου.

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

1. Στις ανωτέρω τιμές συμπεριλαμβάνεται η αγορά σωλήνωσης, εξάρμωση παλαιάς, κατασκευή και τοποθέτηση νέας και συγκολλήσεις.
 2. Για εξάρμωση, άρμωση σωλήνωσης προς διευκόλυνση των εργασιών ή καθαρισμό θα χρεώνεστε ανά μέτρο με το 50% της αναγραφόμενης στον ανωτέρω πίνακα τιμής της αντιστοίχου διαμέτρου.
 3. Στην περίπτωση αντικατάστασεως λαιμών σωλήνων ή ανεξαρτήτων τεμαχίων σωλήνων ή γενικά τεμαχίων προσαρμοσμένων μικρότερων του ενός μέτρου θα χρεώνεστε με την τιμή ενός μέτρου της αντιστοίχου διαμέτρου.
 4. Η τιμή αντικατάστασεως επιστομίων, βανών, κρουνών, B/F valves κτλ. υπολογίζεται ως ακολούθως. Τιμή εκάστου των ανωτέρω = τιμή αγοράς βάση τιμολογίου προσαυξημένη με 20% +τιμή από ανωτέρω πίνακα ενός μέτρου σωλήνας της αντιστοίχου διαμέτρου.
 5. Στην περίπτωση που τα υλικά δίνονται από το πλοίο το κόστος αγοράς θα αφαιρείται από την ανωτέρω τιμή.
 6. Οι ανωτέρω τιμές ισχύουν για χώρους ευπρόσιτους. Στην περίπτωση εργασίας σε δυσπρόσιτους χώρους οι ανωτέρω τιμές προσαυξάνονται όπως παρακάτω.
 7. Στην περίπτωση κατά την οποία απαγορεύεται η χρήση φλόγας και οι εξαρμώσεις εκτελούνται δια εργαλείων χειρός (σφυρί, κοπίδι, κλειδιά, κτλ.) επιπλέον 20% θα πρέπει να συνυπολογίζεται επί των ανωτέρω τιμών.
 8. Διαπεράσεις στεγανές με σωλήνωση sch 80 χρεώνονται με την τιμή ενάμιση (1,5) μέτρου σωλήνωσης αντίστοιχης διαμέτρου, το διαμάντι χρεώνετε με την τιμή ενός (1) μέτρου σωλήνωσης αντίστοιχου διαμέτρου
 9. Το Schedule πέραν των 40 προσαυξάνεται 10% ανα 20 μονάδες
 10. Για εργασίες σε κλειστούς χώρους (μηχανοστάσιο, δεξαμενές φορτίου, Wing Tanks) προσαύξηση 15%
- Για εργασίες σε σεντινες μηχανοστασίου, διπύθμενα, αντλιοστάσια, πρωραία και πρυμναία δεξαμενή ζυγοστάθμισης, cofferdams προσαύξηση 25%
11. Για εκτέλεση εργασιών σε W.C , κουζίνα, λουτρό, κλπ. κοινόχρηστους χώρους θα χρεώνεστε α)τα υλικά με τιμή αγοράς προσαυξημένη κατά 15% β) ημερομίσθια απολογιστικά που τιμώνται προς 35ευ το άτομο ανά ώρα με μίνιμουμ εργασία 8 ώρες το άτομο ανα ημέρα.
 12. Εάν οι σωλήνες πρόκειται να γαλβανισθούν, η τιμή σωλήνωσης ανά ίντσα θα προσαυξάνεται κατά 20%.
 13. Η δοκιμή πίεσεως των σωλήνων (πρεσάρισμα) θα χρεώνεται απολογιστικά.
 14. Πιστοποιητικά, GAS FREE, και Τεχνικός Ασφαλείας επιβαρύνουν την εταιρεία σας.
 15. Σκαλωσιές δεν συμπεριλαμβάνονται στις παραπάνω σωληνουργικές τιμές
 16. Οι τιμές ισχύουν για ένα κανονικό και ένα υπερωριακό ημερομίσθιο, εάν χρειασθούν επιπλέον ώρες σε ημερήσια βάση θα χρεώνονται προς 35ευ/ανα ώρα το άτομο ανα τρίωρο.
 17. Το πλοίο θα είναι απαλλαγμένο από αέρια έτοιμο για εργασίες φλόγας , οι χώροι εργασίας θα είναι καθαρισμένοι και όταν πρόκειται για πετρέλαια και πλυμένοι.
 18. Για αμμοβολή και ένα χέρι μίνιο θα υπάρχει προσαύξηση 10%.
 19. Για την τοποθέτηση χάλκινων σωλήνων η χρέωση θα γίνει με ημερομίσθια όπως παραπάνω.
 20. Εφ' όσον οι εργασίες δεν εκτελεσθούν με το πλοίο παραβεβλημένο σε προβλήτα στο ΠΕΡΑΜΑ ή στο ΙΚΟΝΙΟ και ΔΡΑΠΙΕΤΣΩΝΑ οι τιμές της προσφοράς θα προσαυξάνονται κατά 10%. Η ως άνω προσαύξηση περιλαμβάνει τα έξοδα για την μεταφορά στο πλοίο τεχνιτών, υλικών και εργαλειομηχανών δια φορτηγίδων και άλλων μεταφορικών μέσων (λάντζες). Επιπλέον και η χρήση γερανού αφορά εσάς.

Προσφορά σωληνοργικών εργασιών από Ναυπηγείο Κίνας

Πίνακας Β3: Προσφορά Σωληνοργικών Εργασιών (USD)

Pipe Work (Schedule 40)

Pipe renewal including bolt, nut and gasket, excluding flange and bent

Dia of pipe		Pipe renewal (m)	Bend	Flange
mm	inch	Steel	(Pc)	(Pc)
<25	<1	22	9	7
40	1.5	31	12	10
50	2	39	15	13
65	2.5	52	20	17
80	3	64	29	20
90	3.5	73	40	23
100	4	85	50	25
125	5	113	77	33
150	6	149	122	39
200	8	211	220	58
250	10	286	244	77
300	12	359	375	97

Note:

- (1) For pipe length under one meter, price shall be applied as one meter, if length is over one meter, the calculation shall be made actual length.
- (2) For pipe 's Dia which is between two specified as above, the rate of bigger shall be applied
- (3) Above price exclude staging, pressure test, accessory work, blasting and painting
- (4) Surcharged to be applied as follows:

Engine room and pump room to be surcharged	25%
Cargo hold to be surcharged	10%
Topside tank, fore/aft peak tanks to be surcharged	25%
Double bottom tank and pipe tunnel to be surcharged	35%
Galvanized pipe to be surcharged	25%
Acid treated pipe to be surcharged	15%
SCH 80 to be surcharged	30%
SCH 160	60%
- (5) Removal and refitting the pipe or renewal pipe with owner supply to be charged the percentage as above rate as follows:

On deck	30%
Engine room and pump room	40%
Cargo hold	40%
Topside tank, fore/aft peak tank	50%
Double bottom tank and pipe tunnel	60%
- (6) Hydraulic piping renewal to be extra
- (7) Sleeve, penetration piece, reducer to be extra

Προσφορά σωληνοργικών εργασιών από Ναυπηγείο Τουρκίας

Πίνακας Β4: Προσφορά Σωληνοργικών Εργασιών (USD)

DIA. (Inch)	DN (mm)	OUTER DIA. (mm)	SCH 40 PIPE	SCH 80 PIPE	SCH 40 BEND (90°)	SCH 80 BEND (90°)	FLANGES (SLIP-ON)			CONCENTRIC REDUCERS					
							PN 6	PN10/16	PN25	DIA. (Inch)	SCH STD	SCH XS	DIA. (Inch)	SCH STD	SCH XS
1"	25	33,70	23	26	17	21	14	14	14	1 x ¾	17	18	5 x 3	65	73
1. 1/4"	32	42,40	28	32	19	23	15	16	16	1 x ½	18	19	5 x 2½	67	77
1. 1/2"	40	48,30	33	40	20	23	17	17	17	1¼ x 1	20	21	5 x 2	69	82
2"	50	60,30	42	50	23	26	21	22	22	1¼ x ¾	20	21	6 x 5	85	98
2 1/2"	65	76,10	58	69	28	31	26	27	27	1¼ x ½	20	21	6 x 4	86	101
3"	80	88,90	75	91	41	45	32	32	35	1½ x 1¼	21	23	6 x 3	88	107
4"	100	114,30	90	113	51	59	36	37	45	1½ x 1	22	23	6 x 2½	95	-
5"	125	139,70	120	152	77	89	46	46	65	1½ x ¾	22	23	6 x 2	103	-
6"	150	168,30	175	231	104	131	56	58	79	1½ x ½	23	24	8 x 6	114	128
8"	200	219,10	220	303	161	222	75	76	127	2 x 1½	25	27	8 x 5	117	136
10"	250	273,00	310	446	286	353	118	121	238	2 x 1¼	25	27	8 x 4	121	148
12"	300	323,00	400	587	455	542	169	172	300	2 x ½	27	-	8 x 3	135	-
14"	350	355,60	544	800	635	741	230	257	396	2 x 1	26	27	10 x 8	166	199
16"	400	406,40	715	1.040	788	951	305	334	597	2 x ¾	26	28	10 x 6	170	-
18"	450	457,20	906	1.304	1.163	1.931	391	434	737	2½ x 2	30	33	10 x 5	178	-
20"	500	508,00	1.093	1.607	1.305	2.282	492	542	893	2½ x 1½	31	34	10 x 4	196	-

GENERAL PIPE NOTES:	
a) Prices are given for S137 carbon steel material and min.1" to be charged for smaller sizes..	
b) Pipe test with Vessel's pump is included in renewal prices.	
c) Galvanising will be 30% extra.	
d) Hydraulic lines will be 50% extra including acid treatment before fitting in place. Discharging of system, flushing and refilling to at Ship's responsibility.	
e) Pipes in E/R and Tanks will be 25% extra. Pipes in Pumproom & Duct keel will be 30% extra.	
f) Deck and bulkhead penetration piece will be 30% extra of 1m pipe renewal.	
g) Bending work (cold bends) to be charged same as elbow prices.	
h) SCH40 Bends 12" and above are given as STD 9.5mm thick. SCH80 bends 8" and above are given as XS 12.7mm thick. (Quoted in red color)	
i) 45° Bends to be charged 75% of 90° bends. 180° bends to be charged by 2x elbow cost.	
j) Prices given for bends are valid for 1,5D. In case 1D bends are needed, to be extra on spot.	
k) U bolt clamp will be charged 10 USD per inch per piece. (Angle bar supports to be extra)	
l) Pipes/branches/stubs less than 1m in length to be charged as 1m pipe renewal.	
m) Welding sleeve connections to be charged 75% of the corresponding SCH40 pipe cost.	
n) In case old flanges are re-used, to be charged 90% of new flanges.	
o) JIS flanges to be charged 20% extra than PN types. Flanges in other standards to be quoted on spot.	
p) In case only removal and refitting of pipes are requested for inspection etc., price will be 40% of SCH40 renewal prices including new gaskets/bolts. Bends/elbows to be calculated based on running meter of straight pipe price.	
- In case only removal and refitting of stainless steel, CuNiFe, aluminium brass (excluding tubes of heat exchangers) pipes (without welding) are requested for inspection etc.,	

CONCENTRIC REDUCERS					
DIA. (Inch)	SCH STD	SCH XS	DIA. (Inch)	SCH STD	SCH XS
1 x ¾	17	18	5 x 3	65	73
1 x ½	18	19	5 x 2½	67	77
1¼ x 1	20	21	5 x 2	69	82
1¼ x ¾	20	21	6 x 5	85	98
1¼ x ½	20	21	6 x 4	86	101
1½ x 1¼	21	23	6 x 3	88	107
1½ x 1	22	23	6 x 2½	95	-
1½ x ¾	22	23	6 x 2	103	-
1½ x ½	23	24	8 x 6	114	128
2 x 1½	25	27	8 x 5	117	136
2 x 1¼	25	27	8 x 4	121	148
2 x ½	27	-	8 x 3	135	-
2 x 1	26	27	10 x 8	166	199
2 x ¾	26	28	10 x 6	170	-
2½ x 2	30	33	10 x 5	178	-
2½ x 1½	31	34	10 x 4	196	-
2½ x 1¼	31	35	12 x 10	247	291
2½ x 1	31	36	12 x 8	256	312
3 x 2½	40	44	12 x 6	297	-
3 x 1	47	-	12 x 4	352	-
3 x 2	40	44	14 x 12	435	533
3 x 1½	41	45	14 x 10	457	588
3 x 1¼	43	48	14 x 8	479	-
4 x 3	48	54	16 x 14	553	-
4 x 2½	49	56	16 x 12	575	-
4 x 2	50	57	16 x 10	604	-
4 x 1½	52	-	16 x 8	648	-
5 x 4	64	72			

Βιβλιογραφία

A. G. GIBSON 2003 University of Newcastle Upon Tyne, The cost effective use of fibre reinforced composites offshore & Composite Materials in the Offshore Industry

A.Hawa, M.S. Abdul Majid, M. Afendi, H.F.A. Marzuki, N.A.M. Amin, F.Mat, A.G. Gibson 2016, Burst strength and impact behaviour of hydrothermally aged glass fibre/ epoxy composite pipes

A.P. Mouritz, E.Gellert, P.Burchill, K.Challis, 2001, Review of advanced composite structures for naval ships and submarines

American Bureau of Shipping 2006, Design and Certification of Offshore FRP Piping Installations

American Bureau of Shipping 2015, Rules for building and classing Facilities on Offshore Installations

American Bureau of Shipping 2015, Steel Vessels Rules

American Society of Mechanical Engineers, Code for Pressure Piping B31.1, 2007

American Society for Testing and Materials, ASTM D 2992, Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced-Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings

AMERON 2011, Installation Guide for GRE Pipe systems

AMERON 2007, Bondstrand Fiberglass Piping Marine Installation Manual

AMERON 2001, Bondstrand Glassfiber Reinforced Epoxy Pipe Systems for Marine Applications

Ameron Bondstrand Product Guide 2007, Bondstrand 2000M/7000M Glassfiber Reinforced Epoxy (GRE) pipe systems for marine service

AMERON CORROSION-RESISTANT FIBERGLASS PIPING SYSTEMS

AMIANTIT, AMIPOX GRE Pipe, Calculation Manual

Bureau Veritas 2014, Rules for the Classification of Offshore Units

Bureau Veritas 2014, Rules for the Classification of Steel Ships

Composites & Metal Products, Fiberglass Pipe Design Considerations

Copper Development Association 1986, Materials for Seawater Pipeline Systems

C.S. Smith 1990, *Design of Marine Structures in Composite Materials*

David A. Chasis 1988, Plastic Piping Systems Second Edition

David Howarth 2012, THE USE OF COMPOSITES IN COMMERCIAL SHIPPING, A CLASSIFICATION SOCIETY VIEW

Det Norske Veritas 2014, Offshore Standard

Det Norske Veritas 2014, Rules for the Classification of Ships

EATON, Pipe supports, Guides, Shields and Saddles

EDO Specialty Plastics 2001, The Adhesive Bonded vs The Butt and Strap

Eric Greene 2013, Design Process for Marine Composite Structures

F.Ellyin, M.Martens 2000, Biaxial fatigue behavior of a multidirectional filament wound glass-fiber/epoxy pipe

G. D. SIMS and W. R. BROUGHTON 2000, Glass Fiber Reinforced Plastics-Properties, Chapter 5, Volume 2, Comprehensive Composite Materials

George Fischer Piping Systems, 2012, Ballast System & Ballast Water Treatment on Ships, 2012

GEORGE F. WILHELMI & HENRY W. SCHAB 1977, GLASS REINFORCED PLASTIC (GRP) PIPING FOR SHIPBOARD APPLICATIONS

G. Hartwig and S. Knaak 1984, Fibre-epoxy composites at low temperatures

G Perillo, NP Vedvik and AT Echtermeyer 2014, Numerical and experimental investigation of impact on filament wound glass reinforced epoxy pipe

IMO Resolution A.753 (18) GUIDELINES FOR THE APPLICATION OF PLASTIC PIPES ON SHIPS

IMO Resolution A.653 (16) Recommendation on Improved Fire Test Procedures for Surface Flammability of Bulkhead, Ceiling, and Deck Finish Materials

Kevin Schmit 1998, FRP piping systems designing process/facilities piping systems with FRP a comparison to traditional metallic materials

Lloyd's Register 2014, Rules and Regulations for the Classification of Offshore Units

Lloyd's Register 2014, Rules and Regulations for the Classification of Ships

- M. Enamul Hossain 2011, The current and future trends of composite materials:an experimental study
- National Oilwell Varco Fiber Glass Systems 2012, Bondstrand Design Manual for Marine Piping Systems
- National Oilwell Varco Fiber Glass Systems, Bondstrand Glassfiber Reinforced Epoxy Pipe Systems for Marine Applications
- National Shipbuilding Research Program 1977, Plastics Shipbuilding
- National Steel and Shipbuilding Company 1976, FIBERGLASS REINFORCED PIPING FOR SHIPBOARD SYSTEMS
- Paul H. Miller 2001, An Introduction to Marine Composites
- REINFORCED PLASTICS DECEMBER 1992, GRP better than steel for Offshore pipes
- R. J. Lewandowski and W. F. Britt, Jr. , 2004 , Comprehensive Composite Materials: Volume 6, Design and Applications
- Ship Structure Committee 1997 (SSC-403), DESIGN GUIDE FOR MARINE APPLICATIONS OF COMPOSITES
- Ship Structure Committee 1990 (SSC-360), USE OF FIBER REINFORCED PLASTICS IN THE MARINE INDUSTRY
- S.R. Frost and A. Cervenka 1994, Glass fibre-reinforced epoxy matrix filament-wound pipes for use in the oil industry
- S. T. Peters 2011, Composite Filament Winding
- Sullivan D. Curran 2013, Fire Resistant Fiberglass Pipe, Fiberglass Tank & Pipe Institute
- The standard P&I Club 2012, A MASTER'S GUIDE TO SHIPS' PIPING 2nd edition
- W. F. Britt and W. F. Britt, Jr. 1993, `FRP Piping Design Manual', Britt Engineering Inc., Birmingham, AL
- Άγγελου Θ. Παπαϊωάννου, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ τόμος 2, 1996
- B.I. Παπάζογλου, Δ.Ι. Παντελής, Ν.Γ. Τσούβαλης, ΝΕΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΕ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, 2007
- Δημήτρης Ι. Παντελής, ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, 2008
- Ι.Π. Ιωαννίδη, Συστήματα και Βοηθητικά Μηχανήματα Πλοίου τεύχος 1, 1984

Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΚΑΦΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ
(ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ), 1998

Τιριακίδης 2016, προσωπική επικοινωνία