

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

10.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση της ανθεκτικότητας συστημάτων ενίσχυσης συνθέτων υλικών υπό την επίδραση μίας σειράς παραγόντων, που δίνονται ακολούθως:

- Υψηλές θερμοκρασίες
- Υγρασία
- Υπεριώδης ακτινοβολία
- Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον
- Γαλβανική διάβρωση
- Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση
- Κόπωση
- Κρούση

10.2 Θερμοκρασιακές επιδράσεις

Έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφ. 2 ότι σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 50-80 °C, μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες (μήτρα συνθέτων υλικών, κόλλα στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών – υποστρώματος). Ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως αυτές κατά τη διάρκεια πυρκαϊάς, προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών (πολλές από τις οποίες κατά την καύση τους εκλύουν τοξικά αέρια) και επομένως τα σύνθετα υλικά δεν μπορούν να φέρουν τάσεις. Οι θερμοκρασίες “αποσύνθεσης” των ίνων είναι 1000 °C για το γυαλί, 650 °C για τον άνθρακα και 200 °C για το αραμίδιο. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι μανδύες συνθέτων υλικών με ίνες άνθρακα σε εποξειδική μήτρα υφίστανται απώλεια αντοχής για θερμοκρασίες πάνω από περίπου 260 °C. Έτσι, κατά τη διάρκεια ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών (αλλά και μετά) το σύστημα ενίσχυσης θα πρέπει να θεωρείται ανενεργό, εκτός αν φέρει πυροπροστασία. Η τελευταία είναι εφικτή σε σημαντικό βαθμό μέσω επικάλυψης των συνθέτων υλικών είτε με ειδικά επιχρίσματα (ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους, της τάξης των 40-50 mm, σύμφωνα με τις Ιαπωνικές Συστάσεις JSCE 2001) είτε με ειδικά προστατευτικά (π.χ. τύπου γυψοσανίδας μεγάλου πάχους).

10.3 Υγρασία

Γενικά τα σύνθετα υλικά έχουν πολύ καλή συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως και μετά από μακροχρόνια δράση του νερού (ή ρευστών, γενικότερα), κάποιοι συνδυασμοί ινών-ρητίνης ενδέχεται να παρουσιάσουν προβλήματα. Οι ρητίνες απορροφούν μικρές ποσότητες νερού, οι οποίες μειώνουν ελαφρά την αντοχή τους καθώς και τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Αυτές βέβαια που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επικόλληση συνθέτων υλικών (καλής ποιότητας εποξειδικές ρητίνες) έχουν γενικά εξαιρετική ανθεκτικότητα στην υγρασία (Blaschko et al. 1998). Από τις ίνες, παρουσία υγρασίας το γυαλί υφίσταται μικρή μείωση αντοχής (λόγω απομάκρυνσης ιόντων από την επιφάνεια των ινών) και το αραμίδιο, το οποίο μπορεί να απορροφήσει υγρασία μέχρι και 13% κ.β., αρκετά μεγαλύτερη. Οι ίνες άνθρακα είναι πρακτικά απρόσβλητες.

Εδώ αξίζει να επισημάνουμε ότι η πλήρης κάλυψη στοιχείων σκυροδέματος με μανδύες συνθέτων υλικών δημιουργεί στεγανές (σε νερό και αέρα) εξωτερικές επιφάνειες με αποτέλεσμα την προστασία του μέλους από δυσμενείς περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. χλωριόντα, δράση χημικών). Τούτο, σε στοιχεία τα οποία είτε παρουσιάζουν έντονη διάβρωση είτε εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον, είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό, διότι ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται δραστικά. Πρέπει να τονιστεί βέβαια ότι σε στοιχεία τα οποία θα πρέπει να “αναπνέουν” (να είναι δηλαδή σχετικά εύκολα διαπερατά) ένας καθολικός μανδύας (ο οποίος ενδέχεται μάλιστα να εγκλωβίσει την υγρασία) θα πρέπει να αποφεύγεται.

10.4 Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου (UV) επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στα πολυμερή (μήτρα συνθέτων υλικών) που εκτίθενται σε αυτή. Φαινομενικά, το αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι η χρωματική αλλοίωση και μικρορηγμάτωση των εκτιθέμενων επιφανειών. Για την περίπτωση των συνθέτων υλικών η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει κάπως την επιφανειακή στρώση ρητίνης, επιφέροντας χρωματική αλλοίωση και ενδεχομένως μικρή μείωση της αντοχής της, όχι όμως και τις ίνες (εξαίρεση αποτελούν οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες είναι ελαφρώς ευπαθείς, Ahmad and Plecnik 1989). Ως μέθοδος προστασίας στην περίπτωση απευθείας έκθεσης στον ήλιο επί μακρόν προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών αντι-UV (ακρυλικής ή πολυουρεθανικής σύστασης) βαφών ανοικτού χρώματος (π.χ. γκρί ανοικτό).

10.5 Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον

Γενικά, τόσο το αλκαλικό περιβάλλον (π.χ. αυτό του σκυροδέματος) όσο και το όξινο δεν έχουν δυσμενείς επιδράσεις σε σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα. Οι ίνες γυαλιού είναι όμως αρκετά ευπαθείς (υφίστανται μείωση αντοχής), ενώ οι ίνες αραμιδίου έχουν ενδιάμεση συμπεριφορά. Προστασία σε ευπαθείς ίνες μπορεί παρέχεται από την μήτρα (ρητίνη), υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτή τις απομονώνει από το αλκαλικό ή το όξινο περιβάλλον.

10.6 Γαλβανική διάβρωση

Η επαφή των ινών άνθρακα με χάλυβα θα πρέπει να αποφεύγεται, διότι ο τελευταίος θα υποστεί γαλβανική διάβρωση. Τέτοιο πρόβλημα δεν υφίσταται όταν χρησιμοποιούνται ίνες γυαλιού ή αραμιδίου.

10.7 Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση

Γενικά οι ερπυστικές παραμορφώσεις (αυτές δηλαδή που αναπτύσσονται με το χρόνο υπό σταθερή τάση) συνθέτων υλικών τα οποία φορτίζονται κυρίως παράλληλα στις ίνες είναι μικρές. Για υλικά με ίνες άνθρακα είναι πρακτικά μηδενικές, για ίνες γυαλιού πολύ μικρές (αμελητέες), ενώ για ίνες αραμιδίου κάπως μεγαλύτερες. Δεδομένου όμως ότι σε περιπτώσεις ενισχύσεων συνήθως (α) τα σύνθετα υλικά ευρίσκονται υπό τάση μόνο για τα πρόσθετα φορτία (πλέον του ιδίου βάρους) και (β) το σκυρόδεμα δεν είναι “μικρής ηλικίας”, οπότε έχει αναπτύξει το μεγαλύτερο τμήμα των ερπυστικών παραμορφώσεων, ο ερπυσμός σπανίως αποτελεί φαινόμενο προς εξέταση. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στην εργασία των Plevris and Triantafyllou (1994).

Μία αξιοσημείωτη πάντως παρατήρηση είναι η εξαιρετικά πτωχή συμπεριφορά των συνθέτων υλικών με ίνες γυαλιού υπό τάση. Οι τελευταίες μπορεί να αστοχήσουν όταν βρίσκονται υπό μόνιμη τάση, ακόμα και αν αυτή είναι εξαιρετικά χαμηλή (π.χ. 20% της εφελκυστικής αντοχής). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *θραύση υπό τάση* (stress rupture).

Το φαινόμενο της *διάβρωσης υπό τάση* (stress corrosion) αφορά στην μείωση της αντοχής των συνθέτων υλικών λόγω της συνδυασμένης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού (π.χ. όξινου ή αλκαλικού) περιβάλλοντος (το οποίο όμως, απουσία τάσεων, δεν θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής). Γενικά τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα δεν έχουν πρόβλημα διάβρωσης υπό τάση ακόμα και αν η τάση φθάνει στο 80% της εφελκυστικής αντοχής. Οι ίνες γυαλιού όμως είναι εξαιρετικά ευπαθείς

(ειδικά όταν συνδυάζονται με ρητίνες όχι τόσο καλές όσο οι εποξειδικές) ενώ οι ίνες αραμιδίου δείχνουν ενδιάμεση συμπεριφορά.

Συμπερασματικά, όταν τα σύνθετα υλικά φέρουν μόνιμα φορτία, η βέλτιστη επιλογή υλικού ινών είναι ο άνθρακας (σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη).

10.8 Κόπωση

Γενικά, η συμπεριφορά των συνθέτων υλικών σε κόπωση (δράση μεγάλου αριθμού κύκλων επαναλαμβανόμενης φόρτισης) είναι πολύ καλή. Ειδικά για υλικά με ίνες άνθρακα η διεθνής βιβλιογραφία (π.χ. Kaiser 1989, Deuring 1993, Barnes and Mays 1999) καταδεικνύει ότι η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα οπλισμού: σε περιπτώσεις καμπτικής ενίσχυσης δοκών με υλικά ινών άνθρακα υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση πρώτα παρατηρήθηκαν αστοχίες λόγω κόπωσης στον εφελκυσμένο χάλυβα και σε καμμία περίπτωση στους εξωτερικούς οπλισμούς ενίσχυσης.

10.9 Κρούση

Σε ότι αφορά στην επίδραση της κρούσης (π.χ. λόγω πρόσκρουσης οχήματος σε υποστύλωμα γέφυρας ενισχυμένο με μανδύα συνθέτων υλικών) στην εναπομένουσα αντοχή των συνθέτων υλικών, καλύτερη συμπεριφορά δίνουν τα υλικά με ίνες αραμιδίου (δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων!), ακολουθούν αυτά με ίνες γυαλιού και τέλος αυτά με ίνες άνθρακα.

10.10 Αξιολόγηση τύπου ινών

Ένα ερώτημα το οποίο τίθεται συχνά στην πράξη από τους μηχανικούς – μελετητές ενισχύσεων με σύνθετα υλικά αφορά στην επιλογή του πλέον κατάλληλου για κάθε περίπτωση τύπου ινών. Όπως φάνηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, η παράμετρος που καθορίζει τον σχεδιασμό μίας επέμβασης σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. ενίσχυση σε κάμψη, ενίσχυση σε τέμνουσα, περίσφιγξη με στόχο αύξηση της θλιπτικής αντοχής, περίσφιγξη στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων με στόχο την αποτροπή λυγισμού των διαμήκων ράβδων) είναι η “δυστένεια” του υλικού, δηλαδή το γινόμενο $E_f t_f$ (μέτρο ελαστικότητας επί συνολικό πάχος). Έτσι, ένα πρώτο κριτήριο επιλογής υλικού ινών θα μπορούσε να αποτελέσει το **κόστος για δεδομένη δυστένεια**. Για παράδειγμα, ένα ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 230 kN/mm^2 και πάχος $t_{fib} = 0.12 \text{ mm}$ είναι ουσιαστικά “ισοδύναμο” ενός υφάσματος ινών γυαλιού με μέτρο ελαστικότητας 69

kN/mm^2 και πάχος $t_{\text{fib}} = 0.40 \text{ mm}$. Το σύνθετο υλικό που θα προκύψει και από τα δύο θα έχει “δυστένεια” κάτι λιγότερο (λόγω του μειωτικού συντελεστή r_1 , που αναφέρθηκε στην Ενότ. 2.1.4) από $nE_f t_{\text{fib}}$ όπου n = αριθμός στρώσεων. Ως δεύτερο παράδειγμα, δύο στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 230 kN/mm^2 και πάχος 0.12 mm είναι ουσιαστικά “ισοδύναμες” 5 στρώσεων υφάσματος γυαλιού με μέτρο ελαστικότητας 69 kN/mm^2 και πάχος 0.16 mm . Έτσι, αν το κόστος (π.χ. ανά m^2) κάθε υφάσματος γυαλιού, στο τελευταίο παράδειγμα, είναι πάνω από 2.5 φορές χαμηλότερο του αντίστοιχου για το ύφασμα άνθρακα, η επιλογή του γυαλιού αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Στην περίπτωση που στόχος της ενίσχυσης είναι η αύξηση της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος μέσω περίσφιγξης (π.χ. σε περιοχές πλαστικών αρθρώσεων με στόχο την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας) η παράμετρος που καθορίζει τον σχεδιασμό μίας επέμβασης είναι το γινόμενο $f_{\text{td}} t_f$ (εφελκυστική αντοχή επί συνολικό πάχος), οπότε ως κριτήριο επιλογής του τύπου ινών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το κόστος για δεδομένη τιμή του παραπάνω γινομένου.

Πίνακας 10.1 Αξιολόγηση ινών με βάση την ανθεκτικότητα.

Κριτήριο	Ίνες Άνθρακα	Ίνες Γυαλιού	Ίνες Αραμιδίου
Υψηλές θερμοκρασίες	+	-	-
Υγρασία	+	-	-
Υπεριώδης ακτινοβολία	++	+	-
Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον	++	--	+
Γαλβανική διάβρωση	--	+	+
Ερπυσμός	++	--	-
Θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση	++	--	+
Κόπωση	++	-	+
Κρούση	-	+	++

Στους παραπάνω συλλογισμούς όμως θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη και άλλες παράμετροι, όπως είναι το κόστος εργατικών (αυξάνεται με τον αριθμό στρώσεων), η αποδοτικότητα των πολλαπλών στρώσεων (δεν είναι ανάλογη του αριθμού των στρώσεων), η δυσκολία εμποτισμού στρώσεων μεγάλου πάχους και, φυσικά, η ανθεκτικότητα του συστήματος σε διάρκεια. Σε ότι αφορά στον τελευταίο παράγοντα, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα είναι αυτά που έχουν την καλύτερη συμπεριφορά, όπως φαίνεται και στον Πίν. 10.1.

