

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τα σύνθετα υλικά (και τα επί μέρους συστατικά αυτών), για τα συστήματα ενίσχυσης και για τις διάφορες τεχνικές εφαρμογής.

#### 2.1 Υλικά

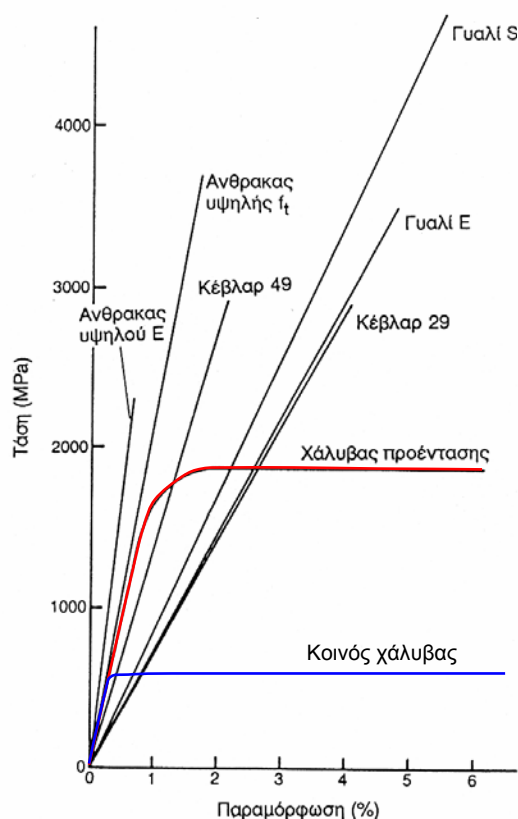
##### 2.1.1 Γενικά

Η επιλογή του τύπου, της μορφής και της μεθόδου εφαρμογής των συνθέτων υλικών εξαρτώνται κάθε φορά από πολλούς παράγοντες όπως: η γεωμετρία και οι διαστάσεις των προς ενίσχυση στοιχείων, το είδος της εντατικής τους καταπόνησης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. σε θερμοκρασίες κάτω των 10 °C περίπου η σκλήρυνση των ρητινών είναι δύσκολη), η εμπειρία του μηχανικού και του διατιθέμενου εργατοτεχνικού προσωπικού και, τέλος, ο προϋπολογισμός της επέμβασης. Βεβαίως, εκτός από την προσεκτική επιλογή των συνθέτων υλικών και την επιμελημένη εφαρμογή τους, ένας παράγοντας που καθορίζει αν η επέμβαση θα είναι επιτυχής είναι η αντοχή και η ποιότητα του υποστρώματος (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία) στο οποίο θα γίνει η επικόλληση. Πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή ή επιφάνεια τραχειά, γεμάτη με σκόνη, λάδια κ.τ.λ. δεν θα εξασφαλίσουν καλή ποιότητα δεσμού μεταξύ υποστρώματος-συνθέτων υλικών, με αποτέλεσμα πρόωρη αστοχία του οπλισμού ενίσχυσης. Πρόσθετα στοιχεία για την πρακτική εφαρμογή των συνθέτων υλικών θα δοθούν σε άλλες ενότητες του βιβλίου (π.χ. Κεφ. 7). Ακολουθώς επιχειρείται μία συνοπτική περιγραφή των βασικών συστατικών ενός συστήματος ενίσχυσης: τα **σύνθετα υλικά**, που αποτελούνται από **ίνες** σε (συνήθως) πολυμερική **μήτρα**, και η **κόλλα** εφαρμογής τους σε επιφάνειες σκυροδέματος ή τοιχοποιίας.

##### 2.1.2 Ίνες

Οι ίνες στα σύνθετα υλικά, διαμέτρου 5-25 μm, αποτελούν τον φορέα ανάληψης δυνάμεων (κατά κανόνα εφελκυστικών), παράλληλα στη διεύθυνσή τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους (Σχ. 2.1). Οι κυριότεροι τύποι ινών που

χρησιμοποιούνται στο πεδίο των ενισχύσεων είναι οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα), οι ίνες γυαλιού (υαλονήματα) και οι ίνες αραμιδίου, με βασικές ιδιότητες που δίνονται στον Πίνακα 2.1 (Feldman 1989, Kim 1995). Επισημαίνεται ότι οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στις ίνες υπό μονοτονική φόρτιση, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση μακροχρόνιας φόρτισης και τυχόν δυσμενών περιβαλλοντικών παραγόντων (βλ. Κεφ. 11).



**Σχ. 2.1** Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα.

Οι ίνες **άνθρακα** (πυκνότητα  $1800-1900 \text{ kg/m}^3$ ) παρασκευάζονται είτε από θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου (PAN) είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου (pitch). Οι πρώτες χαρακτηρίζονται γενικά από μεγαλύτερες αντοχές και μέτρα ελαστικότητας σε σύγκριση με τις δεύτερες. Οι ίνες **γυαλιού** (παρασκευάζονται από λειωμένο γυαλί, πυκνότητα  $2300-2500 \text{ kg/m}^3$ ) μπορεί να είναι: (α) τύπου E, που είναι ο κοινός και πλέον συνηθισμένος τύπος γυαλιού (με βασικό μειονέκτημα την μείωση της αντοχής σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως είναι αυτό του σκυροδέματος)· (β) τύπου Z (ή AR), με μεγάλη αντοχή στο αλκαλικό περιβάλλον· και (γ) τύπου S, με κύρια χαρακτηριστικά την υψηλή αντοχή και το υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Ένα πλεονέκτημα των ινών γυαλιού (έναντι των άλλων τύπων) είναι το αρκετά χαμηλότερο κόστος. Τέλος, οι ίνες **αραμιδίου** (πυκνότητα  $1450 \text{ kg/m}^3$ ) που διατίθενται στη διεθνή αγορά διακρίνονται σε αυτές οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαμιδίο (Κέβλαρ, Twaron) και σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμιδίο (Technora). Κύριο πλεονέκτημα

τους είναι η πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία, γι' αυτό και τα τελευταία χρόνια προτιμούνται (π.χ. στο Ηνωμένο Βασίλειο) για την κατασκευή μανδυών σε υποστυλώματα γεφυρών, όπου υπάρχει κίνδυνος πρόσκρουσης οχημάτων.

**Πίνακας 2.1** Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Feldman 1989, Kim 1995).

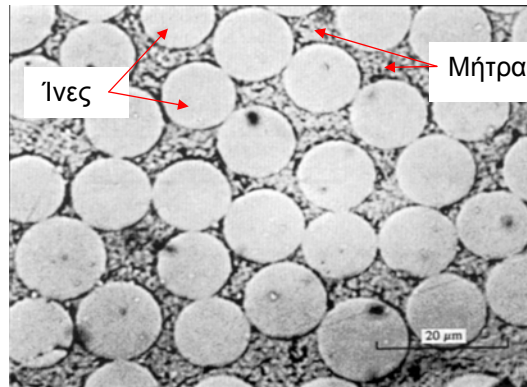
Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (kN/mm <sup>2</sup> )	Εφελκυστική αντοχή (N/mm <sup>2</sup> )	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
<i>Άνθρακας</i>			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1.5-2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικ.	500-700	2100-2400	0.2-0.4
<i>Γυαλί</i>			
E	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Z	70-75	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
<i>Αραμίδιο</i>			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29)	70-80	3500-4100	4.3-5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 49, Twaron)	115-130	3500-4000	2.5-3.5

### 2.1.3 Μήτρα

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί τη συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών. Συνήθως είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, το οποίο συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, τις προστατεύει, εξασφαλίζει την μεταφορά δυνάμεων σε αυτές, αλλά καθορίζει και αρκετές μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών, όπως είναι η αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, η διατμητική και η θλιπτική αντοχή. Ο πλέον συνηθισμένος (καίτοι ακριβότερος) τύπος μήτρας είναι οι εποξειδικές ρητίνες, σπανιότερα όμως χρησιμοποιείται πολυεστέρας ή βινυλεστέρας. Οι εποξειδικές ρητίνες υπερέχουν των άλλων τύπων μήτρας λόγω των εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών και της μεγάλης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις. Προσφάτως έχουν γίνει προσπάθειες αντικατάστασης των πολυμερικών μητρών με υλικά βασισμένα στο τσιμεντό (τσιμεντοκονιάματα τροποποιημένα με πολυμερή).

### 2.1.4 Σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά που εφαρμόζονται στο πεδίο των ενισχύσεων προκύπτουν από τον συνδυασμό συνεχών ινών, συνήθως μίας διεύθυνσης, και πολυμερικής μήτρας (γι' αυτό ονομάζονται και ινοπλισμένα πολυμερή). Στην περίπτωση ελασμάτων συνθέτων υλικών (π.χ. για την καμπτική ενίσχυση δοκών) οι ίνες καταλαμβάνουν περίπου το 50-70% του συνολικού όγκου υλικού (Σχ. 2.2), ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για μανδύες που κατασκευάζονται με επί τόπου εφαρμογή της ρητίνης είναι 20-35%.



Σχ. 2.2 Τομή ελάσματος συνθέτου υλικού σε μεγέθυνση.

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών με ίνες σε μία κυρίως διεύθυνση μπορούν είτε να μετρηθούν πειραματικά (αυτός είναι ο ορθότερος τρόπος εύρεσης των ιδιοτήτων αυτών), είτε να εκτιμηθούν βάσει των αντιστοιχών για τις ίνες και τη μήτρα, μέσω της σχέσης που είναι γνωστή και ως “κανόνας ανάμιξης”:

$$E_f \approx E_{fib} V_{fib} + E_m V_m \quad (2.1)$$

$$f_f \approx f_{fib} V_{fib} + f_m V_m \quad (2.2)$$

όπου:

$E_f$  = μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών παράλληλα στις ίνες

$E_{fib}$  = μέτρο ελαστικότητας ινών

$E_m$  = μέτρο ελαστικότητας μήτρας

$V_{fib}$  = ογκομετρικό ποσοστό ινών

$V_m$  = ογκομετρικό ποσοστό μήτρας =  $1 - V_{fib}$

$f_f$  = εφελκυστική αντοχή συνθέτων υλικών παράλληλα στις ίνες

$f_{fib}$  = εφελκυστική αντοχή ινών

$f_m$  = εφελκυστική αντοχή μήτρας

Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι επειδή  $E_{fib}/E_m \gg 1$  και  $f_{fib}/f_m \gg 1$ , οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν κατά προσέγγιση ακόμα και αν στα αθροίσματα του δεξιού σκέλους αγνοηθούν οι δεύτεροι όροι. Δηλαδή, τόσο το μέτρο ελαστικότητας, όσο και η εφελκυστική αντοχή των συνθέτων υλικών ουσιαστικά μπορούν να εκτιμηθούν από το γινόμενο της αντίστοιχης ιδιότητας για τις ίνες επί το ογκομετρικό ποσοστό αυτών.

Οι προμηθευτές συστημάτων ενίσχυσης με βάση τα σύνθετα υλικά διαθέτουν στην αγορά συνήθως είτε προκατασκευασμένα ελάσματα, οπότε η παραγωγή του σύνθετου υλικού έχει γίνει σε βιομηχανική μονάδα, είτε υφάσματα με ίνες μίας διεύθυνσης. Στην πρώτη περίπτωση οι μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών είναι γνωστές εκ των προτέρων, π.χ. βάσει εργαστηριακών μετρήσεων. Στη δεύτερη όμως, όπου η επικόλληση των ινών με τη μήτρα γίνεται επί τόπου του έργου, υπάρχει μία σχετική αβεβαιότητα ως προς την ποσότητα ρητίνης η οποία θα εμποτίσει τις ίνες, και άρα ως προς το τελικό ογκομετρικό ποσοστό ινών στο σύνθετο υλικό. Οι πιθανές λύσεις σχετικά με τις τιμές ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών που θα πρέπει να υιοθετηθούν στους υπολογισμούς είναι δύο: (α) Χρήση των ιδιοτήτων των τελικώς διαμορφωμένων συστημάτων (συνθέτων υλικών) όπως αυτές έχουν μετρηθεί (εργαστηριακά) από τον προμηθευτή με βάση τη χρήση δεδομένης ποσότητας ρητίνης. (β) Χρήση των ιδιοτήτων των ινών, αφού προηγηθεί ελαφρά μείωση (βάσει πολλαπλασιασμού με μειωτικό συντελεστή  $r_1$ , ο οποίος θα πρέπει να έχει προσδιοριστεί πειραματικά από τον προμηθευτή). Τα παραπάνω καταδεικνύονται μέσω του Παραδείγματος 2.1.

### Παράδειγμα 2.1

Ο Χ προμηθευτής υλικών διαθέτει εύκαμπτα υφάσματα ινών άνθρακα μίας διεύθυνσης με πλάτος 0.70 m και βάρος 260 g/m<sup>2</sup>. Ιδιότητες ινών: έστω μέτρο ελαστικότητας  $E_{fib} = 230 \text{ kN/mm}^2$  και εφελκυστική αντοχή  $f_{fib} = 3500 \text{ N/mm}^2$ . Το ονομαστικό πάχος του υφάσματος,  $t_{fib}$ , υπολογίζεται με βάση το βάρος του και την (γνωστή) πυκνότητα του υλικού των ινών,  $\rho_{fib}$ :  $\rho_{fib} \times t_{fib} = 260$ , έστω  $\rho_{fib} = 2000 \text{ kg/m}^3$ , οπότε  $t_{fib} = 0.13 \text{ mm}$ . Υποθέτουμε ότι μετά τον εμποτισμό με την απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης το πάχος του συνθέτου υλικού φθάνει τα 0.3 mm, το οποίο σημαίνει ότι το ογκομετρικό ποσοστό ινών είναι  $V_{fib} = 0.13/0.3 = 43\%$ . Αν υπήρχε η δυνατότητα πειραματικού προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου υλικού μετά την εφαρμογή της ρητίνης θα προέκυπταν τιμές μικρότερες από  $0.43 \times 230 \text{ kN/mm}^2$  και  $0.43 \times 3500 \text{ N/mm}^2$ , αντίστοιχα, έστω κατά 10% (οπότε  $r_1 = 0.9$ ):  $89 \text{ kN/mm}^2$  και  $1355 \text{ N/mm}^2$ . Επομένως, στους υπολογισμούς θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν:

$$(α) E_f = 89 \text{ kN/mm}^2, f_f = 1355 \text{ N/mm}^2, t_f = 0.3 \text{ mm}, \text{ ή}$$

$$(β) E_f = 0.9 \times 230 \text{ kN/mm}^2, f_f = 0.9 \times 3500 \text{ N/mm}^2, t_f = 0.13 \text{ mm}.$$

Σε μία πραγματική εφαρμογή, η ποσότητα ρητίνης εμποτισμού θα είναι ενδεχομένως διαφορετική από αυτήν που προτείνει ο προμηθευτής των υλικών, γι' αυτό και το πραγματικό πάχος του συνθέτου υλικού θα διαφέρει από τα 0.3 mm. Αυτό όμως που πραγματικά ενδιαφέρει στους υπολογισμούς είναι συνήθως το γινόμενο  $E_f t_f$  (και σπανιότερα το  $f_f t_f$ ), οπότε οι παραπάνω λύσεις (α) και (β) είναι **ισοδύναμες**. Το πλεονέκτημα της (α) είναι ότι οι ιδιότητες που παρέχει ο προμηθευτής προσεγγίζουν καλύτερα αυτές που θα έχει το σύνθετο υλικό στην πράξη, ενώ το μειονέκτημα είναι ότι οι ιδιότητες αυτές είναι “πλασματικές”, δεν αντιστοιχούν δηλαδή στο προϊόν αγοράς (ύφασμα) αλλά σε ένα “υποθετικό” προϊόν, το οποίο θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε μόνο κάτω από αυστηρές προϋποθέσεις ποιοτικού ελέγχου. Από την άλλη, η λύση (β) έχει το πλεονέκτημα ότι τα υλικά αγοράς (υφάσματα) συνοδεύονται και από τις ιδιότητές **τους**, ενώ μέσω του μειωτικού συντελεστή  $r_1$  (0.9 στο παράδειγμά μας) μπορούν εύκολα να προκύψουν οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

### 2.1.5 Κόλλα

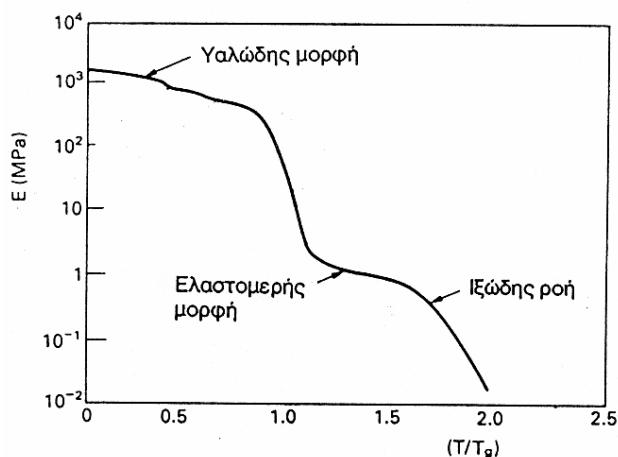
Η κόλλα (κατά κανόνα εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών) εφαρμόζεται μεταξύ του υποστρώματος και του συνθέτου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Η χρήση εποξειδικών ρητινών στις κατασκευές προϋποθέτει την κατανόηση τριών βασικών εννοιών. Η πρώτη είναι ο **χρόνος εργασιμότητας** (pot life), η δεύτερη είναι ο **χρόνος εφαρμογής** (open time) και η τρίτη είναι η **θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης**,  $T_g$  (glass transition temperature).

Ο χρόνος εργασιμότητας είναι αυτός που έχει κανείς στη διάθεσή του για να χρησιμοποιήσει την κόλλα με ευκολία πριν αρχίσει να αυξάνεται το ιξώδες της και να σκληρύνεται στο δοχείο όπου έγινε η ανάμιξη. Εξαρτάται από τον τύπο κόλλας, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και από την ποσότητα κόλλας που προκύπτει με την ανάμιξη των δύο συστατικών. Ενδεικτικοί χρόνοι για ποσότητα (τυπικής) κόλλας 5 kg είναι 90 min σε 15 °C και 30 min σε 35 °C.

Ο χρόνος εφαρμογής αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κόλλα είναι ενεργή, δηλαδή έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες. Μέσα σε αυτό το διάστημα θα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του σπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια του υποστρώματος.

Τέλος, στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των πολυμερών) οι κόλλες υφίστανται ραγδαία απομείωση του μέτρου ελαστικότητας (Σχ. 2.3), οπότε έχουν περιορισμένη πλέον ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων.

Μία σύνοψη ιδιοτήτων (και σύγκριση αυτών με τις αντίστοιχες για σκυρόδεμα και χάλυβα) για συνηθισμένες εποξειδικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται σε τεχνικά έργα δίνεται στον Πίνακα 2.2.



**Σχ. 2.3** Επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας των πολυμερών (Τριανταφύλλου 2006).

**Πίνακας 2.2** Ενδεικτικές ιδιότητες εποξειδικών ρητινών και σύγκριση με σκυρόδεμα και χάλυβα (*fib* 2001).

Ιδιότητα (σε 20 °C)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	1100-1700	2350	7800
Μέτρο ελαστικότητας (kN/mm <sup>2</sup> )	0.5-20	20-50	205
Μέτρο διάτμησης (kN/mm <sup>2</sup> )	0.2-8	8-21	80
Λόγος Poisson	0.3-0.4	0.2	0.3
Εφελκυστική αντοχή (N/mm <sup>2</sup> )	9-30	1-4	200-600
Διατμητική αντοχή (N/mm <sup>2</sup> )	10-30	2-5	150-400
Θλιπτική αντοχή (N/mm <sup>2</sup> )	55-110	25-150	200-600
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%)	0.5-5	0.015	20-25
Ενέργεια θραύσης (Jm <sup>-2</sup> ) – κατά προσέγγιση	200-1000	100	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 <sup>-6</sup> /°C)	25-100	11-13	10-15
Υδαταπορροφητικότητα: 7 ημ. - 25 °C (% κ.β.)	0.1-3	5	0
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (°C)	50-80	---	---

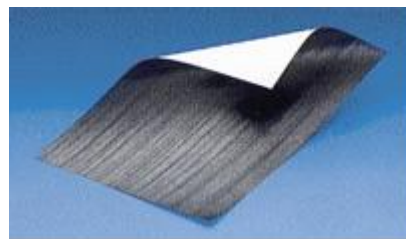
Τέλος αξίζει να αναφέρουμε ότι σε πρόσφατες ερευνητικές εργασίες έχουν γίνει προσπάθειες αντικατάστασης της εποξειδικής ρητίνης ως συγκολλητικού υλικού με υλικά ανόργανης σύνθεσης, βασισμένα στο τσιμέντο (τσιμεντοκονιάματα τροποποιημένα με πολυμερή).

## 2.2 Συστήματα ενίσχυσης

Τα συστήματα ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ή φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά είναι γενικά δύο τύπων: (α) “υγρής εφαρμογής” (ή “επί τόπου σκλήρυνσης” της μήτρας) και (β) “προκατασκευασμένα” (η σκλήρυνση της μήτρας έχει προηγηθεί της εφαρμογής). Η παρουσίαση αυτών γίνεται συνοπτικά παρακάτω (π.χ. ACI 1996, *fib* 2001).

### 2.2.1 Συστήματα υγρής εφαρμογής

- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας (κυρίως) διεύθυνσης (Σχ. 2.4), χωρίς μήτρα (“ξηρή” κατάσταση). Για την εφαρμογή τους απαιτείται συνήθως η εφαρμογή “ασταρώματος” στο σκυρόδεμα, ή επιπεδωτικού κονιάματος και ακολούθως ασταρώματος στην τοιχοδομή, και ακολούθως ο εμποτισμός των ινών με ρητίνη, βάσει μίας εκ των εξής μεθόδων:



Σχ. 2.4

- εφαρμογή της ρητίνης στο υπόστρωμα (σκυρόδεμα) ή επιπεδωτικό κονίαμα σε τοιχοποιία, τοποθέτηση των ινών απευθείας στη ρητίνη
- προεμποτισμός των ινών (επί τόπου στο έργο αλλά όχι επάνω στο υπό ενίσχυση στοιχείο) με ρητίνη και ακολούθως επικόλληση

- Υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε δύο τουλάχιστον διευθύνσεις (π.χ. 0° και 90° ή  $\pm 45^\circ$  σε σχέση με τον άξονα του υπό ενίσχυση μέλους, Σχ. 2.5), χωρίς μήτρα (“ξηρή” κατάσταση). Η εφαρμογή τους γίνεται όπως περιγράφεται στις παραπάνω δύο περιπτώσεις.



Σχ. 2.5



- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας (κυρίως) διεύθυνσης, *προεμποτισμένα* με ρητίνη (μήτρα) σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επί πλέον ρητίνη.
- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, *προεμποτισμένα* με ρητίνη (μήτρα) σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επί πλέον ρητίνη.
- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα (“ξηρή” κατάσταση), συγκεντρωμένες σε μορφή *νήματος* (tow), το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος.
- Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή *νήματος* (tow), το οποίο ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο υπό ενίσχυση μέλος, υφίσταται ενδεχομένως και πρόσθετο εμποτισμό.

## 2.2.2 Προκατασκευασμένα υλικά

- Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα (και σχετικά δύσκαμπτα) *ελάσματα* (strips), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης. Τα ελάσματα διατίθενται συνήθως σε μορφή ρόλλων (“κουλούρες”), και παράγονται με τη μέθοδο της εξέλασης (pultrusion), ή, σπανιότερα, της στρωμάτωσης (lamination). Στη μέθοδο της εξέλασης οι ίνες είναι κατά κανόνα συνεχείς και παράλληλες στη διεύθυνση των ελασμάτων, ενώ η στρωμάτωση επιτρέπει τη χρήση ινών σε διαφορετικές διευθύνσεις (π.χ. παράλληλες και κάθετες στη διεύθυνση των ελασμάτων, ή και υπό γωνίες  $\pm 45^\circ$ ). Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες μηχανικής στερέωσης ελασμάτων ειδικού τύπου (με ίνες σε διάφορες διευθύνσεις) μέσω αγκυρίων και “καρφιών”, χωρίς δηλαδή να γίνεται χρήση εποξειδικών ρητινών.
- Προκατασκευασμένες ράβδοι (bars) κυκλικής ή συνήθως ορθογωνικής διατομής, οι οποίες τοποθετούνται σε επιφανειακές εγκοπές γεμισμένες με ρητίνη ή πολυμερικό κονίαμα.
- Προκατασκευασμένα κελύφη (shells), μανδύες (jackets) ή γωνιές (angles), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης.

Σε γενικές γραμμές τα προκατασκευασμένα ελάσματα προτιμούνται έναντι των υφασμάτων (ή φύλλων) όταν η εφαρμογή γίνεται σε επίπεδες επιφάνειες (π.χ. καμπτική ενίσχυση δοκών ή πλακών, χιαστί ή οριζόντια διάταξη για τοιχοποιίες σε εντός επιπέδου τέμνουσα) και απαιτούνται σημαντικά πάχη, ενώ σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. μανδύες υποστρωμάτων, διατμητική ενίσχυση δοκών) η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου είναι προτιμητέα.

## 2.3 Τεχνικές εφαρμογές

### 2.3.1 Βασική τεχνική

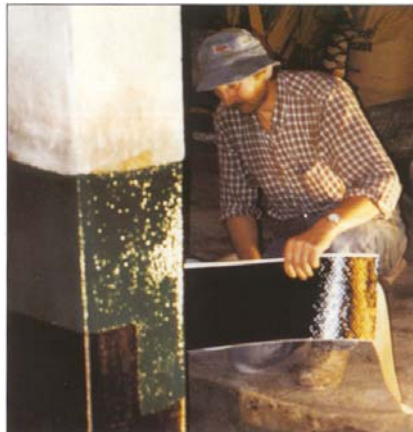


Έλασμα για αύξηση  
καμπτικής αντοχής  
δοκού

Υφασμα για αύξηση  
διατμητικής  
αντοχής δοκού



Επικόλληση ελασμάτων για την καμπτική  
ενίσχυση καταστρώματος γέφυρας



Περιτύλιξη υποστυλώματος  
με ύφασμα

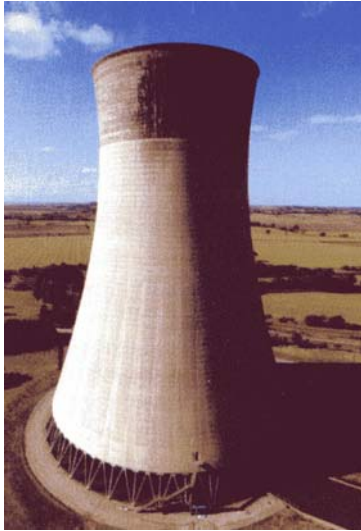


Εμποτισμός υφάσματος σε ειδική  
“μπαγιέρα” ρητίνης



Εφαρμογή προ-εμποτισμένου  
υφάσματος σε υποστύλωμα

Η βασική τεχνική, η οποία είναι και η πλέον συνηθισμένη (και εφαρμόζεται ουσιαστικά κατ' αποκλειστικότητα στη χώρα μας), περιλαμβάνει την δια χειρός επικόλληση είτε υφασμάτων (προεμπροτισμένων με ρητίνη ή μη προεμπροτισμένων), είτε προκατασκευασμένων στοιχείων (π.χ. ελάσματα) σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ή τοιχοποιίας, μέσω εποξειδικών ρητινών. Παραδείγματα δίνονται στο Σχ. 2.6.



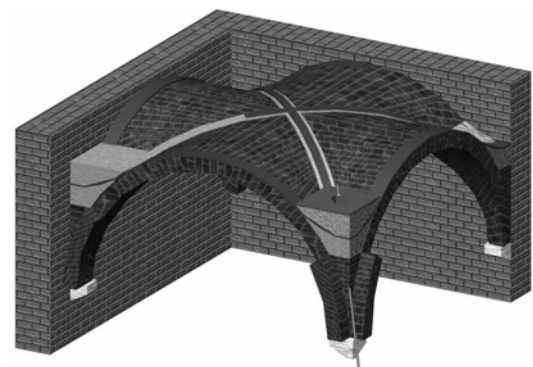
Ενίσχυση του κελύφους πύργου ψύξης με υφάσματα συνθέτων υλικών



Εφαρμογή επιπεδωτικού κονιάματος για την επικόλληση ελασμάτων σε στοιχεία τοιχοποιίας



Ενίσχυση θόλων τοιχοδομών με ελάσματα



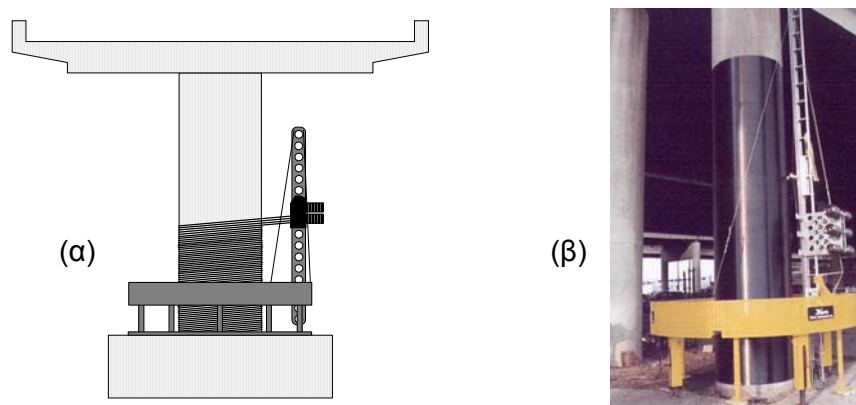
Σχ. 2.6 Παραδείγματα εφαρμογής της βασικής τεχνικής.

### 2.3.2 Ειδικές τεχνικές

Οι περισσότερες από τις παρακάτω τεχνικές δεν έχουν τύχει ακόμα ευρείας εφαρμογής, αλλά αναφέρονται παρακάτω κυρίως για λόγους πληρότητας.

#### 2.3.2.1 Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη

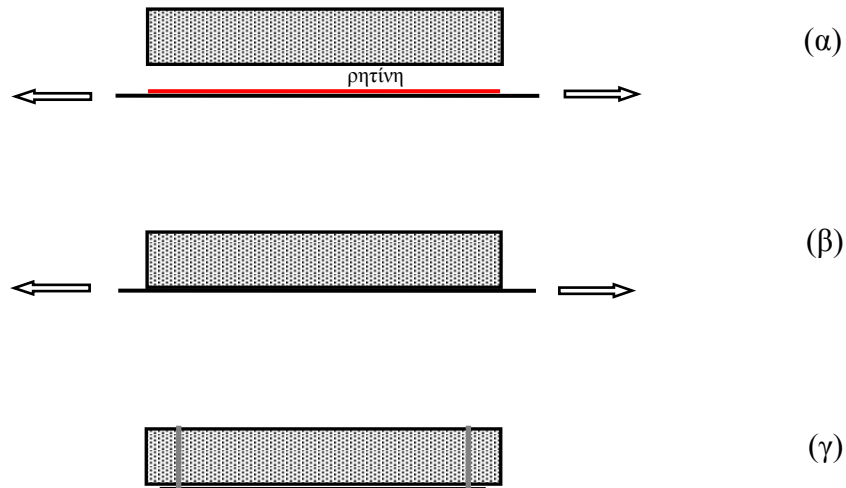
Η τεχνική της αυτοματοποιημένης περιτύλιξης “νημάτων” αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία στις αρχές της δεκαετίας του '90 και λίγο αργότερα στις ΗΠΑ. Περιλαμβάνει την χωρίς διακοπή περιτύλιξη προεμπροτισμένων με ρητίνη νημάτων υπό μικρή γωνία γύρω από υποστυλώματα γεφυρών ή από άλλα στοιχεία (π.χ. καπνοδόχοι), μέσω ειδικής συσκευής-ρομπότ (Σχ. 2.7). Βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής, πλέον του καλού ποιοτικού ελέγχου, είναι η μεγάλη ταχύτητα εφαρμογής.



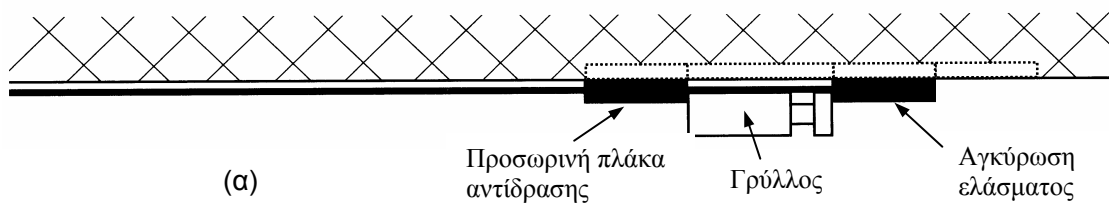
**Σχ. 2.7** Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη προεμπροτισμένων “νημάτων”. (α) Σχηματική διάταξη, (β) φωτογραφία συσκευής-ρομπότ.

#### 2.3.2.2 Εφαρμογή με προένταση

Η μέθοδος προέντασης, η οποία αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 (Triantafyllou and Deskovic 1991, Deuring 1993), περιλαμβάνει την επικόλληση ελασμάτων ενώ αυτά βρίσκονται υπό τάνυση (Σχ. 2.8). Έτσι εκμεταλλευόμαστε τα βασικά πλεονεκτήματα της προέντασης (αύξηση δυσκαμψίας, καθυστέρηση ρηγματώσης, μείωση πλάτους ρωγμών, αύξηση καμπτικής και διατμητικής αντοχής σε σχέση με την εφαρμογή της τεχνικής χωρίς προένταση κλπ), με τίμημα την αύξηση του κόστους αλλά και του βαθμού πολυπλοκότητας της μεθόδου εφαρμογής, λόγω της ανάγκης για τη χρήση ειδικών αγκυρώσεων (π.χ. Σχ. 2.9).



**Σχ. 2.8** Σχηματική διάταξη προέντασης με ελάσματα συνθέτων υλικών. (α) Προένταση, (β) επικόλληση υπό τάνυση, (γ) αγκύρωση άκρων και αποφόρτιση (μετά τη σκλήρυνση της ρητίνης).



**Σχ. 2.9** Διάταξη εφαρμογής προέντασης ελάσματος και αγκύρωσης στο άκρο. (α) Σχηματικά, (β) φωτογραφία.

Η τεχνική της προέντασης μπορεί να εφαρμοστεί και σε μανδύες υποστυλωμάτων, π.χ. είτε εφαρμόζοντας τα σύνθετα υλικά με τις ίνες υπό τάνυση, είτε εισάγοντας στο κενό μεταξύ μανδύα και υποστυλώματος ρητίνη υπό πίεση ή διογκούμενο κονίαμα (Σχ. 2.10).

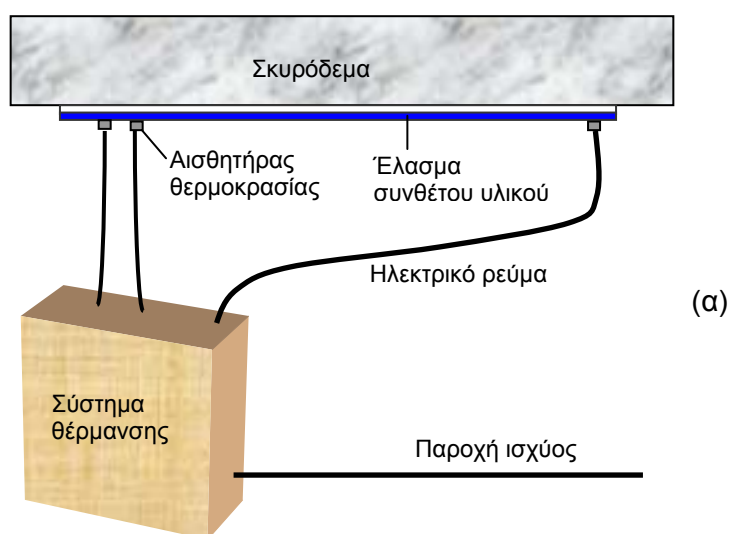


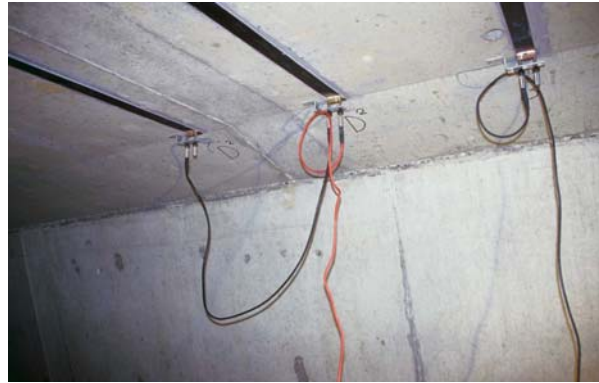


**Σχ. 2.10** Κατασκευή ελλειπτικού μανδύα στην κρίσιμη περιοχή υποστυλώματος και προένταση με χρήση διογκούμενου κονιάματος στο κενό μεταξύ υποστυλώματος και μανδύα.

### 2.3.2.3 Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση

Η σκλήρυνση της εποξειδικής ρητίνης στην διεπιφάνεια ελασμάτων-σκυροδέματος μπορεί να επιταχυνθεί σημαντικά μέσω της χρήσης ειδικών συσκευών θέρμανσης (π.χ. θερμαντικά σώματα, συσκευές θέρμανσης με βάση υπέρυθρες ακτίνες, θερμαντικά καλύμματα), με παράλληλη εκμετάλλευση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ινών άνθρακα (Σχ. 2.11). Έτσι αυξάνεται σημαντικά η ταχύτητα εφαρμογής της ενίσχυσης (π.χ. τρεις ώρες θέρμανσης σε 70 °C αρκούν για πλήρη σκλήρυνση), ακόμα και σε περιπτώσεις που η τελευταία θα ήταν αδύνατη (π.χ. λόγω χαμηλής θερμοκρασίας, οπότε δεν ευνοείται η σκλήρυνση της ρητίνης). Πρόσθετο πλεονέκτημα της επιταχυμένης σκλήρυνσης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης της ρητίνης.





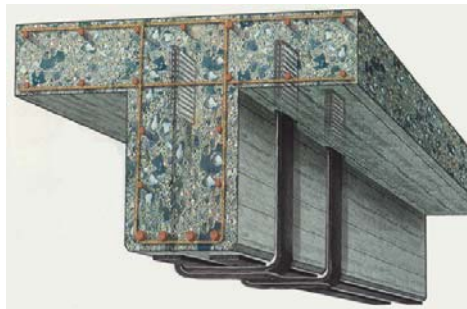
(β)

**Σχ. 2.11** Συσκευή ταχείας σκλήρυνσης της ρητίνης μέσω θέρμανσης. (α) Αρχή λειτουργίας, (β) φωτογραφία καλωδίωσης στα άκρα των ελασμάτων.

#### 2.3.2.4 Προκατασκευασμένα στοιχεία



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

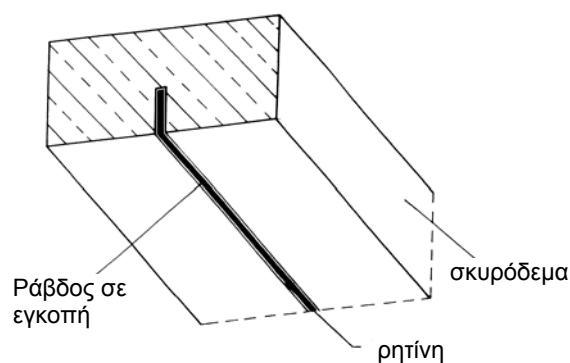
**Σχ. 2.12** Παραδείγματα εφαρμογής προκατασκευασμένων στοιχείων. (α) Γωνιές, (β)-(γ) εφαρμογή γωνιών για την ενίσχυση δοκού σε διάτμηση, (δ) εφαρμογή μανδύα μορφής κελύφους, (ε) εφαρμογή μανδύα σε τεμάχια.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σύνθετα υλικά είναι συνήθως μορφής: (α) Ελάσματος (πάχους της τάξης του 1 mm και πλάτους π.χ. 50 mm, 100 mm). (β) Γωνιών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ενίσχυσης (π.χ. πλακοδοκών) έναντι τέμνουσας

(Σχ. 2.12α-γ). (γ) Μανδύα-κελύφους (Σχ. 2.12δ,ε), που τοποθετείται περιμετρικά υποστυλωμάτων με στόχο την αύξηση της περίσφιγξης ή της διατμητικής αντοχής.

### 2.3.2.5 Εφαρμογή ράβδων σε εγκοπές

Η τοποθέτηση και επικόλληση (μέσω εποξειδικής ρητίνης) ράβδων σε εγκοπές (Σχ. 2.13, 2.14) αποσκοπεί συνήθως στην αύξηση της καμπτικής αντοχής υφισταμένων μελών σκυροδέματος και της διατμητικής και/ή καμπτικής αντοχής τοιχοποιίας. Κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής, σε σχέση με την επιφανειακή επικόλληση, είναι η εξαιρετικά βελτιωμένη συνάφεια των συνθέτων υλικών με το σκυρόδεμα ή την τοιχοποιία και εν γένει η καλύτερη προστασία τους.



(α)



(β)

**Σχ. 2.13** Τοποθέτηση ράβδων σε εγκοπές: (α) Σχηματικά, (β) Φωτογραφία εφαρμογής.

### 2.3.2.6 Μηχανική στερέωση ελασμάτων με αγκύρια

Βάσει της τεχνικής αυτής, η οποία αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα (π.χ. Lamanna et al. 2001), η στερέωση των ελασμάτων στην εξωτερική επιφάνεια σκυροδέματος γίνεται με αγκύρια ή “καρφιά”, απουσία εποξειδικής ρητίνης (Σχ. 2.14). Τα καρφιά τοποθετούνται μέσω ειδικού στερεωτικού εργαλείου τύπου “πιστολιού” συνήθως σε σταθερές αποστάσεις κατά μήκος του ελάσματος, ενώ τα αγκύρια στερεώνονται συνήθως μόνο στις άκρες, για την βελτίωση των συνθηκών αγκύρωσης των ελασμάτων. Βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής είναι η εξάλειψη της ανάγκης για προετοιμασία των επιφανειών σκυροδέματος, η δυνατότητα ενίσχυσης μελών σε σύντομο χρονικό διάστημα (δεν απαιτείται σκλήρυνση της ρητίνης) και η αυξημένη (σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης ρητίνης) πλαστιμότητα των ενισχυμένων μελών, υπό την προϋπόθεση φυσικά ότι ο σχεδιασμός των αγκυρίων ή καρφιών γίνεται ορθά, ώστε η (μερική) διατμητική σύνδεση να έχει χαρακτηριστικά πλαστιμότητας (π.χ. λόγω σταδιακής παραμόρφωσης των



ελασμάτων στις θέσεις επαφής με τα καρφιά). Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η χρήση ελασμάτων ειδικού τύπου (με ίνες σε πολλές διευθύνσεις, ώστε να αποφεύγεται η απόσχιση στις θέσεις των αγκυρίων/καρφιών) και η κατάλληλη επιλογή του ορθού τύπου καρφιών / αγκυριών καθώς και μεθόδου εφαρμογής (π.χ. με προ-τρύπημα των ελασμάτων και του σκυροδέματος).



(α)

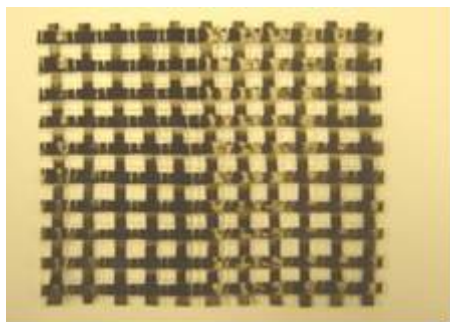


(β)

**Σχ. 2.14** Μηχανική στερέωση ελασμάτων με καρφιά: (α) Χρήση εργαλείου τύπου “πιστολιού”. (β) Προσθήκη αγκυρίων στο άκρο του ελάσματος για την βελτίωση της αγκύρωσης.

#### 2.3.2.7 Πλέγματα συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα

Η μέθοδος αυτή, η οποία αποτελεί την πλέον σύγχρονη εξέλιξη σε σχέση με τα σύνθετα υλικά στο πεδίο των ενισχύσεων, συνίσταται στην επικόλληση πλεγμάτων συνεχών ινών (Σχ. 2.15) στις εξωτερικές επιφάνειες σκυροδέματος ή τοιχοποιίας (Σχ. 2.16) μέσω ειδικών τσιμεντοκονιαμάτων τροποποιημένων με πολυμερή (Triantafillou et al. 2006, Triantafillou and Papanicolaou 2006). Έτσι γίνεται άρση ορισμένων προβλημάτων που αφορούν στις εποξειδικές ρητίνες (π.χ. πτωχή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, σχετικά υψηλό κόστος, ασυμβατότητα με υλικά κατασκευών μνημειακού χαρακτήρα), με αντίτιμο την ελαφρώς μειωμένη αποτελεσματικότητα των συνθέτων υλικών (συγκριτικά με αυτά στα οποία γίνεται χρήση ρητίνης), η οποία όμως είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται πραγματικά στις πρακτικές εφαρμογές. Βασικό συστατικό της μεθόδου των πλεγμάτων συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα (Textile Reinforced Mortars – TRM) είναι η χρήση πλεγμάτων με βροχίδες, ώστε να εξασφαλίζεται η καλή συνεργασία ινών – μήτρας όχι μόνον μέσω “δεσμού” (όπως στην περίπτωση ρητίνης) αλλά και (κυρίως) μηχανικής εμπλοκής.



(α)



(β)

**Σχ. 2.15** Πλέγματα συνεχών ινών (α) δύο διευθύνσεων και (β) τεσσάρων διευθύνσεων.



(α)



(β)

**Σχ. 2.16** Επικόλληση πλέγματος συνεχών ινών μέσω κονιάματος σε (α) σκυρόδεμα και (β) τοιχοποιία.