

Μελέτη της προσφερόμενης προστασίας οργανικών επικαλύψεων και αναστολέα διάβρωσης σε οπλισμένο σκυρόδεμα

Investigation of the protection offered through organic coatings and corrosion inhibitor to reinforced concrete

Σοφία ΚΑΛΟΓΕΡΟΠΟΥΛΟΥ¹, Παρασκευή ΠΑΝΤΑΖΟΠΟΥΛΟΥ²,
Γεώργιος ΜΠΑΤΗΣ³

Λέξεις κλειδιά: οπλισμένο σκυρόδεμα, προστασία, οργανικές επικαλύψεις, αναστολέας διάβρωσης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η χρήση οργανικών προστατευτικών επικαλύψεων στην επιφάνεια του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος προστασίας σε κατασκευές, συμβάλλοντας και στην μακροχρόνια ανθεκτικότητα και στην αισθητική εμφάνιση. Η ταυτόχρονη χρήση αναστολέων διάβρωσης μπορεί να βελτιώσει την προστατευτική τους επίδραση. Η μελέτη αυτή ασχολείται με την αντιδιαβρωτική προστασία που προσφέρουν στο οπλισμένο σκυρόδεμα τρεις επικαλύψεις (μια επικάλυψη νανοτεχνολογίας, ένα ακρυλικό εξωτερικών τοίχων και ένα ελαστομερές ακρυλικό) και ένας αναστολέας διάβρωσης (με βάση τις αμινοαλκοόλες), σε ισχυρά διαβρωτικό περιβάλλον, καθώς και με τη διερεύνηση φυσικοχημικών ιδιοτήτων των επικαλύψεων αυτών, όπως η πρόσφυση, η υδατοπερατότητα και η υδρατμοπερατότητα. Διαπιστώθηκε ότι όλες οι επικαλύψεις έδρασαν προστατευτικά ως προς τη διάβρωση του οπλισμού. Η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης βελτίωσε γενικά τη συμπεριφορά των δοκιμίων ως προς τη διάβρωση, όμως φάνηκε ότι επηρεάζει την πρόσφυση των επικαλύψεων στο υπόστρωμα.

ABSTRACT: The use of organic coatings on the surface of reinforced concrete is the most widespread protective method, contributing to long-term durability and to aesthetic appearance. The simultaneous use of corrosion inhibitors can improve the protective effectiveness of the coatings. This research refers to the study of concrete reinforcement corrosion protection through three coatings (a nanotechnology coating, an acrylic emulsion paint for exterior use and an elastomeric insulating acrylic paint) and a corrosion inhibitor (based on

¹ Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ., email:

skalog@puas.gr

² Δρ. Χημικός Μηχανικός, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ., email:

parpant@puas.gr

³ Ομότιμος Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email:

gbatis@chemeng.ntua.gr

aminoalcools) under highly corrosive environment, as well as to the investigation of physicochemical properties of organic coatings, such as adhesion, liquid water permeability and water-vapor transmission rate. All coatings were proven to act protectively against reinforcement corrosion. The addition of corrosion inhibitor improved the specimens' behavior against corrosion, but at the same time it seems to affect the adhesion of coatings to the substrate.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα σχεδιάζεται έτσι ώστε να προσφέρει προστασία έναντι της διάβρωσης του οπλισμού, όμως η διάβρωση εξακολουθεί να είναι η πιο συχνή αιτία υποβάθμισης των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Αποτέλεσμα της διάβρωσης είναι ο σχηματισμός ενός στρώματος σκουριάς που ασκεί τέτοιες τάσεις στο σκυρόδεμα, ώστε να προκληθούν ρωγμές. Στην αρχή το ισχυρά αλκαλικό υδροξείδιο του ασβεστίου που υπάρχει στους πόρους του υγρού σκυροδέματος βοηθά στη δημιουργία ενός παθητικού φιλμ οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου που παρεμποδίζει τη διάβρωσή του. Με την πάροδο του χρόνου, το σκυρόδεμα χάνει την προστατευτική του ικανότητα, λόγω ενανθράκωσης από την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας ή διείσδυσης χλωριόντων, οπότε το προστατευτικό στρώμα οξειδίων καταστρέφεται και ο σίδηρος αρχίζει να διαβρώνεται. Το χρονικό διάστημα έναρξης της διάβρωσης καθώς και η ταχύτητά της εξαρτώνται από παράγοντες όπως η ποιότητα του τσιμέντου, τα πρόσθετα, ο λόγος νερού προς τσιμέντο, η συντήρηση και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (Bertolini & Elsener, 2004) (Batis et al., 2000).

Εάν το νερό, τα χλωριόντα και το διοξείδιο του άνθρακα δεν μπορούν να διεισδύσουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος, δεν υπάρχει άμεσος κίνδυνος διάβρωσης του οπλισμού. Το σκυρόδεμα όμως, όπως όλα τα κονιάματα, είναι πορώδες υλικό. Η χρήση οργανικών επικαλύψεων στην επιφάνεια του σκυροδέματος, σε πάχος μερικών μόνο μικρομέτρων, μπορεί να καθυστερήσει την είσοδο αυτών των ουσιών στους πόρους του. Οι επικαλύψεις πρέπει να παρουσιάζουν καλή πρόσφυση με το σκυρόδεμα, ανθεκτικότητα στην υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος, καλή αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία και στις καιρικές συνθήκες και καλή μηχανική αντοχή. Επιπλέον, θα πρέπει να παρεμποδίζουν την είσοδο νερού αλλά να επιτρέπουν τη διέλευση υδρατμών, να παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στη διέλευση διοξειδίου του θείου, διοξειδίου του άνθρακα και στη διείσδυση των χλωριόντων στους πόρους και τις ρωγμές του σκυροδέματος (Ibrahim et al., 1999) (Selvaraj et al., 2009) (Barbucci et al., 1997).

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία επιφανειακών επικαλύψεων για το σκυρόδεμα είναι οι ακρυλικές διασπορές. Η προστασία που προσφέρουν τόσο σε θαλάσσιο όσο και σε υψηλής συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα περιβάλλον έχει μελετηθεί εκτενώς με ικανοποιητικά αποτελέσματα (Ansari & Goswami, 2006) (Al-Dulaijan et al., 2000). Οι επικαλύψεις νανοτεχνολογίας παρουσιάζουν ιδιαίτερες ιδιότητες, όπως προστατευτική επίδραση σε επιθετικά περιβάλλοντα, αντιμικροβιακές ιδιότητες, ανακλαστική ικανότητα στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας και

αντοχή σε συχνό πλύσιμο ή ακόμη και αυτοκαθαρισμό, συγκράτηση ρύπων σε εσωτερικούς χώρους και δυνατότητες αυτοϊασης. Τέλος εμφανίζουν βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τις συμβατικές όσον αφορά τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες (Ζαφειροπούλου et al., 2012).

Αναστολείς διάβρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα με οργανικές επικαλύψεις ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα για τη βελτίωση της ανθεκτικότητάς του έναντι περιβαλλοντικών δράσεων και την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση (Broomfield, 1999) (Wombacher et al., 2004).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Υλικά

Δοκίμια κονιάματος κατασκευάστηκαν με χρήση τσιμέντου Portland CEM II 32.5, άμμο λατομείου μέγιστου κόκκου 4 mm και νερό δικτύου Αθήνας με σταθερές αναλογίες 1:3:0.5 σύμφωνα με τον κανονισμό DIN 1164. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένας αναστολέας διάβρωσης με βάση την αλκανολαμίνη σε ποσοστό 4% σε αντικατάσταση ίδιου ποσοστού νερού. Κυλινδρικά δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας, με και χωρίς την παρουσία αναστολέα διάβρωσης, κατασκευάστηκαν και οπλίστηκαν ομοαξονικά με χάλυβα τύπου B500C, διαμέτρου 10 mm και ύψους 100 mm με την ακόλουθη χημική σύσταση (C:0.22%, Mn:1.24%, S:0.044%, P:0.032%, Si:0.28%, Ni:0.10%, Cr:0.10%, Cu:0.52%, V:0.075%, Mo:0.028%). Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν και συντηρήθηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στη βιβλιογραφία (Pantazopoulou et al., 2014).

Τα δοκίμια κονιάματος επικαλύφθηκαν με τρεις οργανικές προστατευτικές επικαλύψεις: μια επικάλυψη νανοτεχνολογίας (N), μια ακρυλική διασπορά εξωτερικών τοίχων (C) και μια ελαστομερή ακρυλική διασπορά (L) (Πίνακας 1). Ως αναφορά χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια χωρίς επικάλυψη (O). Η διαδικασία επικάλυψης περιλαμβάνει, για όλες τις επικαλύψεις, καταρχήν εφαρμογή με πινέλο κατάλληλου ασταριού για την επίτευξη της βέλτιστης πρόσφυσης μεταξύ επικάλυψης και τσιμεντοκονίας, το οποίο αραιώνεται σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης του. Μετά από 24 ώρες εφαρμόζεται το πρώτο χέρι της βαφής με πινέλο, όπου η βαφή αραιώνεται σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης. Μετά από 24 ώρες εφαρμόζεται το δεύτερο χέρι βαφής, κάθετα στην πρώτη στρώση, με πινέλο και με τις ίδιες διαδικασίες αραιώσης. Τέλος τα δοκίμια παραμένουν σε περιβάλλον εργαστηρίου για τουλάχιστον 7 ημέρες ώστε να στεγνώσει το χρώμα και να εξατμιστεί όλη η ποσότητα των διαλυτών. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι κατηγορίες δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με την αντίστοιχη κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 1. Συστήματα οργανικών επικαλύψεων – τεχνικά χαρακτηριστικά

| a/a | Κωδ | Προϊόν | Χρώμα | Χαρακτηριστικά |
|------------|------------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| 1α | PN | ακρυλικό αστάρι νερού | γαλακτώδες (άχρωμο μετά το στέγνωμα) | Ειδικό βάρος 1 kg/L, στερεά 25,9% κ.ο., αραίωση μέχρι 1:4 με νερό, απόδοση 8-32 m ² /L |
| 1β | N | επικάλυψη ναυοτεχνολογίας | λευκό | Σιλοξάνης, ειδικό βάρος 1,60 kg/L, στερεά 50% κ.ο., απόδοση 8,6 m ² /L |
| 2α 3α | PA | συνδετικό αστάρι | διάφανο | συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών, πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml, στερεά 28±2% κ.ο., αραίωση: έως 100% κ.ο. με διαλυτικό πινέλου, απόδοση: 7,5-8,5 m ² /L |
| 2β | C | ακρυλικό εξωτερικών τοίχων | λευκό | ακρυλική διασπορά, αραίωση με νερό σε αναλογία 5-10% κ.ο, πυκνότητα: 1,46±0,05 g/ml, στερεά 61±2,5% κ.β., 43±3% κ.ο., απόδοση: 9±1 m ² /L (2 στρώσεις) |
| 3β | L | ελαστομερές ακρυλικό | λευκό | ακρυλική διασπορά, αναραίωτο για τελική εφαρμογή, πυκνότητα: 1,35±0,04 g/ml, στερεά 60±2% κ.β., 48±4% κ.ο., απόδοση 2±1 m ² /L (αστάρωμα + 2 στρώσεις) |

Πίνακας 2. Κατηγορίες δοκιμών

| a/a | Κατηγορία | Αναστολέας | Επικάλυψη |
|------------|------------------|-------------------|------------------|
| 1 | N | - | N |
| 2 | C | - | C |
| 3 | L | - | L |
| 4 | O | - | - |
| 5 | AN | A | N |
| 6 | AC | A | C |
| 7 | AL | A | L |

Μέθοδοι

Για τη μελέτη της διάβρωσης του οπλισμού των επικαλυμμένων δοκιμίων οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, αλλά και των δοκιμίων αναφοράς, δοκίμια εκτέθηκαν μερικά επί 18 μήνες σε προσομοιούμενο με το θαλασσινό νερό περιβάλλον (3,5% κ.β. NaCl). Πραγματοποιήθηκε σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών μετά από συγκεκριμένους χρόνους έκθεσης, με θραύση των δοκιμίων κονιάς, απογύμνωση των οπλισμών, απομάκρυνση της σκωρίας και ζύγιση για τον προσδιορισμό της απώλειας μάζας (κατά ISO 8407:2009 “*Corrosion of metals and alloys - Removal of corrosion products from corrosion test specimens*”). Επίσης έγιναν ηλεκτροχημικές μετρήσεις που περιλαμβάνουν μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης των οπλισμών ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς αργύρου/χλωριούχου αργύρου (SSCE) και αποτίμηση της χρονικής μεταβολής του σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876 – 15 “*Standard Test Method for Corrosion Potentials of*

Uncoated Reinforcing Steel in Concrete” καθώς και προσδιορισμό της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας των οπλισμών.

Η μέτρηση της υδατοπερατότητας των οργανικών επικαλύψεων έγινε σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 1062-3:2008 “*Paints and varnishes – Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete - Part 3: Determination of liquid water permeability*”. Για τις μετρήσεις άοπλα κυλινδρικά δοκίμια τσιμεντοκονιάματος 40 mm × 50 mm κατασκευάστηκαν και επικαλύφθηκαν με την ίδια τεχνική όπως προηγουμένως. Η μέτρηση της υδατοπερατότητας περιλαμβάνει μέτρηση του βάρους των δοκιμίων, που βυθίζονται σε ύψος 10 mm σε απιονισμένο νερό, ανά τακτά χρονικά διαστήματα (μετά από 1h, 2h, 3h, 6h και 24h) και προσδιορίζεται παριστάνοντας γραφικά την αύξηση της μάζας των δοκιμίων συναρτήσει του τετραγώνου του χρόνου. Η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης που προκύπτει είναι ο συντελεστής της υδατοπερατότητας w ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$). Οι τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας κρίνονται βάσει της κατάταξης του πρότυπου BS EN 1062-3 που δίνεται στον παρακάτω Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Κατηγοριοποίηση επικαλύψεων σύμφωνα με το πρότυπο EN 1062-3.

| Κατηγορία | Ρυθμός υδατοπερατότητας w ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) |
|------------------|---|
| I (υψηλή) | > 0,5 |
| II (μέτρια) | 0,1 – 0,5 |
| III (χαμηλή) | < 0,1 |

Η υδρατμοπερατότητα των οργανικών επικαλύψεων μετράται με βάση το πρότυπο EN ISO 7783-2:1999 “*Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete - Part 2: Determination and classification of water-vapor transmission rate (permeability)*”. Το προς εξέταση υλικό εφαρμόζεται στη μία πλευρά κατάλληλου υποστρώματος, τα δοκίμια σφραγίζονται σε ειδικά δοχεία που περιέχουν διάλυμα ένυδρου φωσφορικού αμμωνίου, για τη δημιουργία ατμόσφαιρας 93% σχετικής υγρασίας και αφήνονται σε συνθήκες περιβάλλοντος για 24 h ώστε να στεγνώσει το υλικό σφράγισης. Στη συνέχεια τοποθετούνται σε ειδικά κλιματιζόμενο θάλαμο (25°C, 50% RH) και ζυγίζονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, συνήθως ανά 24 ώρες. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις συνθήκες διεξαγωγής των δοκιμών η επικαλυμμένη πλευρά των δοκιμίων αντιμετωπίζει τη μικρότερη σχετική υγρασία, με σκοπό να προσομοιωθεί η εφαρμογή του χρώματος σε τοιχοποιίες, όπου στο εσωτερικό παρατηρείται αυξημένη υγρασία λόγω του νερού των πόρων του σκυροδέματος. Ο ρυθμός με τον οποίο διαπερνούν οι υδρατμοί την επικάλυψη υπολογίζεται με χρήση της εξίσωσης:

$$V = \frac{V_{cs} \cdot V_s}{V_s - V_{cs}} \quad (1)$$

όπου: V : ο ρυθμός διαπερατότητας των υδρατμών του συστήματος επικάλυψης,
 V_{cs} : ο ρυθμός διαπερατότητας των υδρατμών του πορώδους υποστρώματος που

είναι επικαλυμμένο με το υλικό της επικάλυψης ή το σύστημα επικάλυψης και V_s : ο ρυθμός διαπερατότητας των υδρατμών του πορώδους υποστρώματος, όλα σε $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. Οι τιμές της διαπερατότητας κρίνονται βάσει της κατάταξης του EN ISO 7783-2, όπως περιγράφεται στον παρακάτω Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Κατάταξη διαπερατότητας σε υδρατμούς σύμφωνα με το EN ISO 7783-2

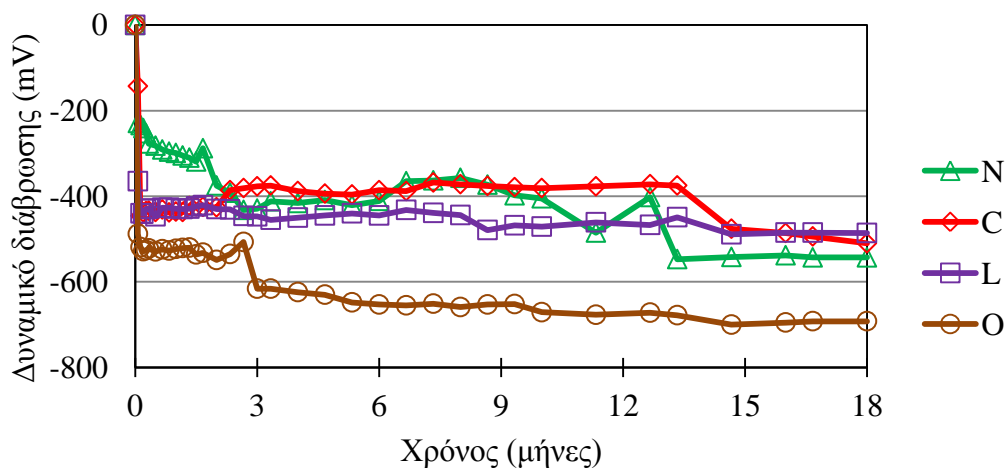
| Κατηγορία | Ρυθμός υδρατμοπερατότητας $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ |
|------------------|--|
| I (υψηλή) | > 150 |
| II (μέτρια) | 15 – 150 |
| III (χαμηλή) | < 15 |

Ο προσδιορισμός της πρόσφυσης των επικαλύψεων στο υπόστρωμα έγινε με τις μεθόδους της σταυροειδούς χάραξης και της εφελκυστικής τάσης αποκόλλησης σε άοπλα πρισματικά δοκίμια κονιάματος διαστάσεων 150 mm x 150 mm x 35 mm, που επικαλύφθηκαν με την ίδια διαδικασία όπως ανωτέρω. Η δοκιμή σταυροειδούς χάραξης έγινε σε ξηρά και σε υγρά δοκίμια, που παρέμειναν για 14 ημέρες σε διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2409:1992(E) “*Paints and varnishes – Cross cut test*”. Η πρόσφυση εκτιμήθηκε σε σχέση με μία κλίμακα από το 0 έως το 5 που αξιολογεί το ποσοστό αποκόλλησης της επικάλυψης (0 είναι το καλύτερο – καθόλου αποκόλληση και 5 είναι το χειρότερο, εκτεταμένη αποκόλληση).

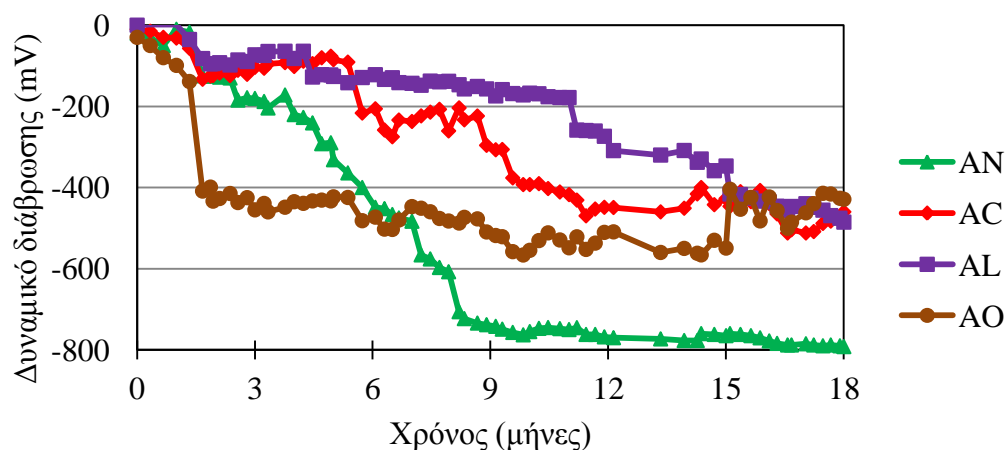
Στα επικαλυμμένα δοκίμια έγινε επίσης προσδιορισμός της πρόσφυσης της επικάλυψης με τη μέθοδο της εφελκυστικής τάσης αποκόλλησης σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN ISO 4624:2003 “*Paints, varnishes and plastics Pull off test for adhesion*” και το πρότυπο ASTM D4541 - 09e1 “*Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*”. Σύμφωνα με αυτό η πρόσφυση μιας επίστρωσης ή ενός συστήματος επικάλυψης, βερνικιού ή παρόμοιων προϊόντων, αξιολογείται μετρώντας την ελάχιστη εφελκυστική τάση σε κάθετη κατεύθυνση προς το υπόστρωμα που χρειάζεται για την αποκόλληση ή τη ρήξη της επίστρωσης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η γραφική απεικόνιση της μεταβολής με τον χρόνο του δυναμικού διάβρωσης των οπλισμών των δοκιμίων χωρίς αναστολέα διάβρωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 1 και των δοκιμίων στα οποία προστέθηκε αναστολέας διάβρωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 2 ανά κατηγορία επικάλυψης. Οι τιμές αφορούν τους μέσους όρους 4 δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κατηγορία.



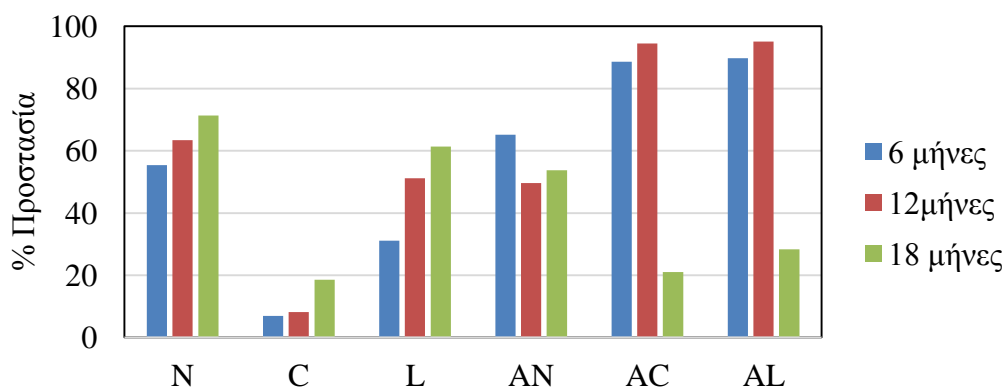
Σχήμα 1. Δυναμικά διάβρωσης συναρτήσεσι του χρόνου έκθεσης για δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 18 μήνες.



Σχήμα 2. Δυναμικά διάβρωσης συναρτήσεσι του χρόνου έκθεσης για δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 18 μήνες.

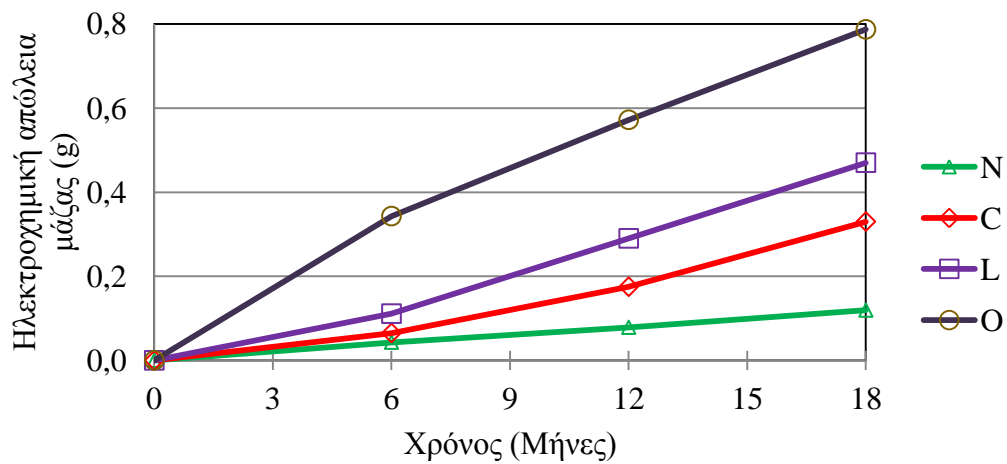
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1 η ελαστομερής επικάλυψη εμφανίζει σχεδόν σε όλη την περίοδο έκθεσης τάση για διάβρωση σε εκτεταμένο βαθμό. Η ακρυλική επικάλυψη ενώ αρχικά παρουσιάζει τάση για διάβρωση σε εκτεταμένο βαθμό, καταλήγει σε υψηλή πιθανότητα διάβρωσης μετά τους πρώτους 2 μήνες. Τέλος, η επικάλυψη νανοτεχνολογίας κυμαίνεται σε τιμές δυναμικού ενδεικτικές της υψηλής πιθανότητας διάβρωσης, εκτός από το τέλος της περιόδου έκθεσης που

παρουσιάζει τάση για διάβρωση σε εκτεταμένο βαθμό. Η παρουσία αναστολέα διάβρωσης οδήγησε γενικά σε αύξηση του δυναμικού διάβρωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, γεγονός που υποδεικνύει καλύτερη προστασία του οπλισμού έναντι της διάβρωσης απουσία αναστολέα. Στην περίπτωση του ελαστομερούς και της ακρυλικής επικάλυψης χωρίς αναστολέα παρατηρείται γρήγορη μείωση του δυναμικού διάβρωσης σε τιμές μικρότερες των -350 mV, που υποδεικνύουν τάση για έντονη διάβρωση σχεδόν από τις πρώτες ημέρες της έκθεσης των δοκιμίων, ενώ παρουσία αναστολέα παρατηρείται πιο αργή μείωση και συγκεκριμένα για το ελαστομερές οι τιμές αυτές προκύπτουν μετά από 14 μήνες έκθεσης και για το ακρυλικό μετά από 10 μήνες περίπου. Τα δοκίμια αναφοράς, χωρίς επικάλυψη, παρουσία αναστολέα παρουσιάζουν δυναμικά κατά 200 mV μεγαλύτερα από αυτά χωρίς αναστολέα. Όσον αφορά τα δοκίμια της ναυτοτεχνολογίας και στις δύο περιπτώσεις, χωρίς και με αναστολέα, οι τιμές των δυναμικών διάβρωσης υποδεικνύουν έντονη τάση για διάβρωση σχεδόν εξ αρχής, ενώ δεν παρατηρείται καμία βελτίωση από την παρουσία του αναστολέα, η οποία μάλιστα οδηγεί σε γρήγορη μείωση του δυναμικού διάβρωσης, ιδιαίτερα μετά από 6 μήνες έκθεσης, γεγονός που υποδεικνύει τάση για έντονη διάβρωση.

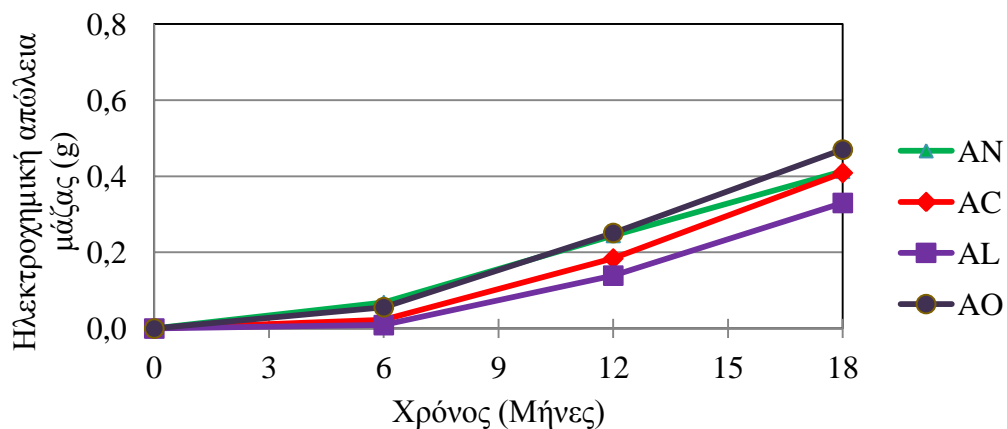


Σχήμα 3. Προσφερόμενη προστασία από τις επικαλύψεις σε σχέση με τον χρόνο για δοκίμια χωρίς και με αναστολέα διάβρωσης, μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για συνολικό χρόνο 18 μηνών.

Από το διάγραμμα της επί τοις εκατό προσφερόμενης προστασίας από τις διάφορες επικαλύψεις στον οπλισμό των δοκιμίων, παρατηρείται ότι σε όλο το χρονικό διάστημα έκθεσης των δοκιμίων στο διαβρωτικό περιβάλλον διαλύματος NaCl 3,5% κ.β. υπήρξε βελτίωση ως προς τη διάβρωση των οπλισμών από τις οργανικές επικαλύψεις. Και οι τρεις επικαλύψεις προσέφεραν ικανοποιητική προστασία σε σχέση με τα ανεπίχριστα δοκίμια αναφοράς, με λιγότερο αποτελεσματική την ακρυλική επικάλυψη. Η παρουσία αναστολέα διάβρωσης βελτίωσε περαιτέρω την προστασία των οπλισμών των επικαλυμμένων δοκιμίων από τη διάβρωση στις περιπτώσεις της ακρυλικής και ελαστομερούς επικάλυψης, σε αντίθεση με την επικάλυψη ναυτοτεχνολογίας όπου δεν παρατηρείται βελτίωση.



Σχήμα 4. Μεταβολή της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε σχέση με τον χρόνο για δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.



Σχήμα 5. Μεταβολή της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε σχέση με τον χρόνο για δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.

Από τα παραπάνω διαγράμματα της μεταβολής της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας με τον χρόνο παρατηρείται ότι σε όλο το χρονικό διάστημα έκθεσης των δοκιμίων στο διαβρωτικό περιβάλλον διαλύματος NaCl 3,5% κ.β. η διάβρωση των οπλισμών μειώθηκε εξαιτίας της παρουσίας των οργανικών επικαλύψεων και η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης βελτίωσε περαιτέρω την προστασία των οπλισμών των επικαλυμμένων δοκιμίων από τη διάβρωση. Στα δοκίμια με επικάλυψη νανοτεχνολογίας παρουσία αναστολέα διάβρωσης παρατηρήθηκε

αποφλοίωση της επικάλυψης κατά την έκθεση των δοκιμίων στο διάλυμα του χλωριούχου νατρίου, η οποία οδήγησε σε μεγαλύτερες τιμές ηλεκτροχημικών απωλειών μάζας στα δοκίμια με αναστολέα από αυτές στα δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης. Η παρουσία ατελειών στο στρώμα της επικάλυψης επηρεάζει σημαντικά τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις, διότι οι ατέλειες αποτελούν σημεία από τα οποία μπορούν να περάσουν οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ του χάλυβα του δοκιμίου και του βοηθητικού ηλεκτροδίου, μεταβάλλοντας σημαντικά τις τιμές των ηλεκτροχημικών μεγεθών.

Τα αποτελέσματα υδατοπερατότητας και υδρατμοπερατότητας των οργανικών επικαλύψεων που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες 5 και 6, όπου δίνονται οι μέσοι όροι για κάθε επικάλυψη και αναγράφεται επίσης και η κατάταξη των επικαλύψεων σύμφωνα με τα πρότυπα.

Πίνακας 5. Τιμές υδατοπερατότητας για τις οργανικές επικαλύψεις.

| Οργανική επικάλυψη | Υδατοπερατότητα w ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) | Κατηγορία EN 1062-3 |
|--------------------|---|-----------------------|
| N | 0,20 | Κατηγορία II (μέτρια) |
| C | 0,60 | Κατηγορία I (υψηλή) |
| L | 0,30 | Κατηγορία II (μέτρια) |

Πίνακας 6. Ρυθμός υδρατμοπερατότητας οργανικών επικαλύψεων

| Οργανική επικάλυψη | Υδρατμοπερατότητα ($\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$) | Κατηγορία DIN EN ISO 7783-2 |
|--------------------|--|--------------------------------|
| N | 618 | Κατηγορία I (υψηλή) |
| C | 180 | Κατηγορία I (υψηλή) |
| L | 215 | Κατηγορία I (υψηλή) |

Η ακρυλική διασπορά εμφανίζει υψηλότερο συντελεστή περατότητας νερού από τις υπόλοιπες επικαλύψεις, ενώ η επικάλυψη νανοτεχνολογίας πολύ υψηλότερες τιμές υδρατμοπερατότητας. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η βέλτιστη συμπεριφορά για μια οργανική επικάλυψη, όσον αφορά τους φυσικοχημικούς παράγοντες, είναι η ταυτόχρονη επίτευξη υψηλής υδρατμοπερατότητας και χαμηλής υδατοπερατότητας. Επικαλύψεις με αυτές τις ιδιότητες αποτρέπουν την είσοδο του νερού αλλά και όλων των παραγόντων των οποίων το νερό αποτελεί φορέα και παράλληλα επιτρέπουν τη διαφυγή των υδρατμών από το εσωτερικό της τοιχοποιίας δημιουργώντας μια σφραγιστική μεμβράνη που “αναπνέει” (Selvaraj et al., 2009). Με βάση το κριτήριο αυτό η επικάλυψη νανοτεχνολογίας εμφανίζει βελτιωμένη συμπεριφορά συγκριτικά με τα υπόλοιπα συστήματα επικαλύψεων (Adler, 1994).

Όμως, από τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις και τις μετρήσεις απώλειας μάζας, η επικάλυψη νανοτεχνολογίας φαίνεται να έχει μικρότερη προστατευτική δράση σε σχέση με τις άλλες δύο επικαλύψεις. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη μείωση της πρόσφυσης μεταξύ επικάλυψης και υποστρώματος σε υγρό περιβάλλον, π.χ. όταν

τα επικαλυμμένα δοκίμια βυθίζονται στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Για την εκτίμηση διαφορών στη συμπεριφορά επικαλύψεων μεταξύ ξηρής και υγρής κατάστασης, η δοκιμή σταυροειδούς χάραξης πραγματοποιήθηκε σε ξηρά και σε υγρά επικαλυμμένα δοκίμια. Στα ξηρά δοκίμια, και η ακρυλική διασπορά και η ελαστομερής επικάλυψη παρουσίασαν τελείως λείες άκρες στις χαραγές και καμία αποκόλληση τετραγώνου στο πλέγμα, ενώ στα υγρά δοκίμια περισσότερα τετράγωνα αποκολλήθηκαν πλήρως. Στην ακρυλική διασπορά η επιφάνεια που επηρεάστηκε ήταν μεγαλύτερη από αυτή της ελαστομερούς επικάλυψης. Η επικάλυψη νανοτεχνολογίας παρουσίασε τη χειρότερη συμπεριφορά και σε ξηρή και σε υγρή κατάσταση.

Τέλος, για να εκτιμηθεί η επίδραση του αναστολέα στην πρόσφυση των επικαλύψεων στο υπόστρωμα, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή εφελκυστικής τάσης αποκόλλησης σε ξηρά δοκίμια χωρίς και με αναστολέα διάβρωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7 όπου φαίνεται ότι η παρουσία του αναστολέα διάβρωσης μείωσε την πρόσφυση των επικαλύψεων στο υπόστρωμα.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυστικής τάσης αποκόλλησης

| Δοκίμιο | Τάση αποκόλλησης (MPa) | Δοκίμιο | Τάση αποκόλλησης (MPa) |
|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|
| N | 2,7 | AN | 2,2 |
| C | 3,0 | AC | 2,5 |
| L | 3,0 | AL | 2,6 |

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας που αναφέρεται στη διερεύνηση της δράσης οργανικών προστατευτικών επικαλύψεων, σε συνδυασμό με αναστολέα διάβρωσης, έναντι της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, όπως η μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, οδήγησαν στη διαπίστωση ότι όλες οι επικαλύψεις έδρασαν προστατευτικά ως προς τη διάβρωση του οπλισμού. Η επικάλυψη νανοτεχνολογίας παρουσίασε την καλύτερη σχέση υδατοπερατότητας / υδρατμοπερατότητας. Η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης βελτίωσε τη συμπεριφορά ως προς τη διάβρωση των δοκιμίων με επικαλύψεις την ακρυλική διασπορά και το ελαστομερές, σε αντίθεση με την επικάλυψη νανοτεχνολογίας. Γενικά φάνηκε ότι η παρουσία αναστολέα διάβρωσης στο σκυρόδεμα επηρεάζει την πρόσφυση των επικαλύψεων στο υπόστρωμα και ιδιαίτερα αυτήν της επικάλυψης νανοτεχνολογίας, γεγονός που επιδρά τελικά στην προστασία που προσφέρουν οι συνδυασμοί επικαλύψεων/αναστολέα διάβρωσης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Adler, K.K., “Protection of concrete against carbonation”, in: R.N. Swamy (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, Sheffield (1994) 1081–1093
- Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Zahrani M.M., Sharif A.M., Al-Juraifani E.A., Al-Idi S.H., “Performance evaluation of resin based surface coatings”, *Proc. Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf* (2000) 345-362
- Ansari, M.F. & Goswami, D.N., “Shellac-acrylic emulsion paint for cementations surfaces”, *Pigment and Resin Technology*, Vol. 35 (2006) 183-187
- Barbucci, A., Delucchi, M. & Cerisola, G., “Organic coatings for concrete protection: liquid water and water vapour permeabilities”, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 30 (1997) 293-297
- Batis, G., Kouloumbi, N. & Pantazopoulou, P., “Protection of reinforced concrete by coatings and corrosion inhibitors”, *Pigment and Resin Technology*, Vol. 29, No 3 (2000) 159-163
- Bertolini, L. & Elsener, B., “Corrosion of steel in concrete: Prevention, Diagnosis, Repair”, John Wiley & Sons (2004)
- Broomfield, J.P., “Corrosion inhibitors for steel in concrete”, *Concrete*, Vol. 33, No 6 (1999) 44-47
- Ibrahim, M., Al-Gahtani, A.S., Maslehuddin, M. & Dakhil, F.H., “Use of Surface Treatment Materials to Improve Concrete Durability”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11 (1999) 36-40
- Pantazopoulou, P., Zafeiropoulou, Th., Kalogeropoulou, S., Fountoukidis, E., Batis, G., Papadopoulos, K., “Examination of physicochemical properties of organic coatings applied on concrete”, in: 9th International Scientific Conference eRA-9, Piraeus, Greece (2014)
- Selvaraj, R., Selvaraj, M. & Iyer, S.V.K., “Studies on the evaluation of the performance of organic coatings used for the prevention of corrosion of steel rebars in concrete structures”, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 64 (2009) 454–459
- Wombacher, F., Maeder, U. & Marazzani, B., “Aminoalcohol based mixed corrosion inhibitors”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26 (2004) 209-216
- Ζαφειροπούλου Θ., Ρακαντά Ε, Μπατής Γ, «Προστατευτική επίδραση συμβατικών, υδατικών διασπορών και χρωμάτων νανοτεχνολογίας στο οπλισμένο σκυρόδεμα», 12ο Συμπόσιο Χρωμάτων, Αθήνα (2012) 133-149