

Αξιοποίηση της σκωρίας ηλεκτροκαμίνων της Γ.Μ.Ε.Ε. ΛΑΡΚΟ ως υλικό παθητικής πυροπροστασίας σε σήραγγες

Κ. Μ. Σακκάς¹, Π. Νομικός¹, Α. Σοφιανός¹, Δ. Πάνιας²

¹Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

²Εργαστήριο Μεταλλουργίας, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Περίληψη

Απαραίτητο στοιχείο κατά το σχεδιασμό σηράγγων είναι η εξασφάλιση της τελικής επένδυσης έναντι αστοχίας από υψηλές θερμοκρασίες, που μπορεί να αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Αν και τα φέροντα στοιχεία της επένδυσης μιας σήραγγας είναι άκαυστα, σε μία πραγματική κατάσταση πυρκαγιάς το σκυρόδεμα της επένδυσης μπορεί να καταστραφεί σε μεγάλο βαθμό, κάποιες φορές ίσως και ολοσχερώς, με πολύ σοβαρές συνέπειες τόσο σε θέματα κόστους όσο και ασφάλειας των ανθρώπων. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισης, υπάρχει πάντα όμως η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός νέου υλικού με βελτιωμένες θερμοφυσικές ιδιότητες και με χαμηλό κόστος. Τα ανόργανα πολυμερή – γεωπολυμερή είναι μία λύση που ανταποκρίνεται στις παραπάνω απαιτήσεις. Τα ανόργανα πολυμερή – γεωπολυμερή πλεονεκτούν στο συγκεκριμένο ζήτημα αφού είναι άκαυστα συνδυάζοντας τις πολύ καλές φυσικές, χημικές, μηχανικές, θερμικές ιδιότητες με πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής αλλά και μεγάλο περιβαλλοντικό όφελος. Για το συγκεκριμένο γεωπολυμερές χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη η σκωρία από τις ηλεκτροκαμίνους της Γ.Μ.Ε.Ε Λάρκο. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών αποδεικνύουν την πολύ καλή απόδοση του υλικού σε συνθήκες πυρκαγιάς.

Utilization of the slag produced in electric arc furnaces of G.M.M.S.A LARCO as a material for passive fire protection in tunnels

Abstract

An essential element in the design of tunnels is to ensure that the final lining will not fail against high temperatures, which may be developed during a fire. Although the structural elements of a tunnel lining are inflamed, in a real fire situation the concrete lining can be spalled largely, sometimes perhaps entirely, with very serious consequences on cost and safety of people. For this problem, various methods have been developed, but there is always a need for developing a new material with improved thermophysical properties and low cost. The inorganic polymers - geopolymers are a solution that meets the above requirements, since they are inflamed and they combine excellent physical, chemical, mechanical, thermal properties with very low production costs and great environmental benefit. In this study, a geopolymer is developed by using as a raw material the slag produced in the electric arc furnaces of G.M.S.A Larco. The results of the tests performed, demonstrate the good performance of the material in actual fire conditions.

Konstantinos Sakkas¹, Pavlos Nomikos¹, Alexandros Sofianos¹, Dimitrios Panias²,

¹Laboratory of Tunnelling, School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece

²Laboratory of Metallurgy, School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens, Greece

1. Το πρόβλημα της πυρκαγιάς

Μια πυρκαγιά σε μία σήραγγα μπορεί να έχει τραγικές επιπτώσεις όπως ανθρώπινες απώλειες αλλά και μεγάλο οικονομικό και κοινωνικό κόστος. Παραδείγματα τέτοιων ατυχημάτων διεθνώς αποτελούν οι πυρκαγιές στις σήραγγες της Μάγχης στην Αγγλία, του Mont-Blanc στη Γαλλία, του Tauern στην Αυστρία και του Gotthard στην Ελβετία (Beard & Carvel, 2005). Σε όλες τις περιπτώσεις οι ανθρώπινες απώλειες ήταν μεγάλες, το κόστος αποκατάστασης μερικές δεκάδες έως εκατοντάδες εκατομμύρια ευρώ ενώ ο χρόνος που απαιτήθηκε μέχρι την επαναλειτουργία της σήραγγας από μήνες μέχρι και χρόνια (Πίνακας 1). Στα παραπάνω προστίθεται και η αμφιβολία που δημιουργείται στους χρήστες για την ασφάλεια των σηράγγων, ιδιαίτερα εκείνων με μεγάλο μήκος.

Πίνακας 1.

Σήραγγα	Θύματα/ Τραυμ.	Οικον. απώλ. (εκ. €)	Χρόνος επισκ. (έτη)	Καταστρ. Σκυροδ. (cm)
Μάγχης (Αγγλία)	30 τραυμ.	250	>1	35
Mont Blanc (Γαλλία/Ιταλία)	39 νεκροί 34 τραυμ.	450	3	40
Tauern (Αυστρία)	12 νεκροί 49 τραυμ.	30		35
Gotthard (Ελβετία)	11 νεκροί	-	2 μήνες	35

Αναγνωρίζοντας τα παραπάνω, η ΕΕ εξέδωσε το 2004 την οδηγία 2004/54/ΕΚ σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας στις ευρωπαϊκές οδικές σήραγγες. Για την προστασία των ανθρώπων και της σήραγγας από πυρκαγιά προβλέπονται, μεταξύ άλλων, υποχρεωτικές έξοδοι κινδύνου, σχεδιασμός του συστήματος αερισμού για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και του καπνού, και επαρκής αντοχή των κατασκευών της σήραγγας στη φωτιά. Η Ελλάδα ανταποκρίθηκε στην ανωτέρω οδηγία με το ΠΔ 320/2007, που δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ 264Α/2007.

Σύμφωνα, εξάλλου, με τη ΙΤΑ (International Tunnelling Association) ο δομικός σχεδιασμός σηράγγων ανθεκτικών σε φωτιά αποτελεί σημαντική παράμετρο σχεδιασμού των νέων σηράγγων και αποκατάστασης των υπαρχουσών (ΙΤΑ, 2004). Στόχοι της πυρανθεκτικότητας των σηράγγων είναι να επιτραπεί η δυνατότητα εκκένωσης της σήραγγας από τους χρήστες και η εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών για τις ενέργειες διάσωσης.

Μία πυρκαγιά μέσα σε σήραγγα μπορεί να καταστρέψει την επένδυση της, λόγω της απότομης απελευθέρωσης θερμότητας και αερίων που προκαλούν την αποφλοίωση (spalling) του σκυροδέματος. Η αποφλοίωση αυτή οφείλεται στους παρακάτω μηχανισμούς: α) στην πίεση των πόρων λόγω του εξατμιζόμενου νερού, β) στην εσωτερική ρωγμάτωση λόγω της διαφορετικής θερμικής διαστολής μεταξύ αδρανών και τσιμέντου γ), στην ρωγμάτωση λόγω διαφοράς στη θερμική διαστολή/παραμόρφωση μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού, και δ) στην απώλεια της αντοχής λόγω χημικών μετασχηματισμών. Ανάλογα με το συνδυασμό των μηχανισμών που μπορεί να συμβεί η αποφλοίωση χαρακτηρίζεται ως βίαιη, σταδιακή, γωνιακή, εκρηκτική και την αποφλοίωση μετά την ψύξη του. Τα φαινόμενα αποφλοίωσης εμφανίζονται σε θερμοκρασίες άνω των 200°C[1]. Επίσης το σκυρόδεμα της επένδυσης σε θερμοκρασίες άνω των 300°C χάνει το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής του[2] και απαιτείται αντικατάσταση του[2,3]. Ο οπλισμός του σκυροδέματος χάνει την μηχανική του αντοχή σε θερμοκρασίες μεταξύ 550 – 600 °C[4,5]. Συνεπώς τόσο το σκυρόδεμα της επένδυσης όσο και ο οπλισμός του σκυροδέματος απαιτούν εξωτερική θερμομόνωση που θα αποτρέπει τη θερμοκρασία να ξεπεράσει τους 300°C στα δομικά στοιχεία, για την αποφυγή της καταστροφής τους σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η προστασία των σηράγγων από πυρκαγιές συνδυάζει την εφαρμογή ενεργητικών και παθητικών συστημάτων. Τα συστήματα ενεργητικής πυροπροστασίας απαιτείται να τίθενται σε

λειτουργία, είτε με χειροκίνητο είτε με αυτόματο τρόπο για να είναι αποτελεσματικά. Οι δύο πιο κοινές μορφές των ενεργών μορφών προστασίας που χρησιμοποιούνται σε σήραγγες είναι τα συστήματα εξαερισμού και τα συστήματα ψεκασμού του νερού[6-8]. Από την άλλη τα συστήματα παθητικής πυροπροστασίας είναι εκείνα που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της δομής της ίδιας της σήραγγας. Αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της κατασκευής της σήραγγας, που παραμένουν εκεί για όλη τη διάρκεια της ζωής της. Επίσης χρησιμεύουν ως ένα εμπόδιο εξάπλωσης πυρκαγιάς καθώς και φράγμα θερμικής ενέργειας εμποδίζοντας την αστοχία των δομικών στοιχείων της σήραγγας (σκυρόδεμα και χάλυβα οπλισμού). Υπάρχουν βασικά δύο μέθοδοι παθητικής προστασίας [9]: εξωτερική (μόνωση) και εσωτερική (σχεδιασμός σκυροδέματος). Τα εξωτερικά συστήματα πυροπροστασίας περιλαμβάνουν εφαρμογή ειδικών κονιαμάτων ή πλακών, σε όλη την περίμετρο της σήραγγας. Τα εσωτερικά συστήματα περιλαμβάνουν εφαρμογή ειδικών συνθέσεων σκυροδέματος, πρόσθετα σκυροδέματος, κατάλληλο τύπο αδρανών, ίνες πολυπροπυλενίου και χαλύβδινες ίνες.

Τα κονιάματα που χρησιμοποιούνται για την εξωτερική προστασία εκτοξεύονται στην επιφάνεια της επένδυσης της σήραγγας. Ως εκ τούτου, μπορούν να εφαρμοστούν σε υφιστάμενες σήραγγες. Έχουν ως βάση το τσιμέντο και αποτελούνται από αδρανή υλικά, νερό, πρόσμικτα και επιταχυντή. Αποτρέπουν την εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος και εμποδίζουν την μηχανική φθορά του. Μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό τους κόστος. Οι πλάκες που χρησιμοποιούνται για την εξωτερική παθητική πυροπροστασία είναι άκαυστες, κατασκευασμένες από γύψο ή πυριτικό ασβέστιο οι οποίες ενισχύονται από ίνες για την αποφυγή της αποσύνθεσης τους. Μπορούν να εφαρμοστούν σε υφιστάμενες σήραγγες, αλλά έχουν επίσης υψηλό κόστος και απαιτούν μεγάλο χρόνο εγκατάστασης. Επιπλέον, δεν θεωρούνται αποτελεσματικές για πυρκαγιές υψηλών θερμοκρασιών και μακράς διάρκειας. Η εσωτερική παθητική προστασία επιτυγχάνεται κυρίως με την προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου στο σκυρόδεμα κατά την Παρασκευή του. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, οι ίνες πολυπροπυλενίου λιώνουν δημιουργώντας κενά, δια μέσω των οποίων οι υδρατμοί μπορούν να διαφύγουν χωρίς να προκαλέσουν φαινόμενα αποφλοίωσης στο σκυρόδεμα. Ωστόσο, η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε υπάρχουσες σήραγγες, δεν μπορεί να εμποδίσει την αποφλοίωση σε υψηλής αντοχής σκυρόδεμα και δεν βελτιώνει τη βάρθρωση της θερμοκρασίας, αλλά μόνο τις πιέσεις των πόρων [3].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπάρχει η ανάγκη για την ανάπτυξη νέων πυράντοχων υλικών με δυνατότητα εφαρμογής για την παθητική πυροπροστασία των σήραγγων που να συνδυάζει το χαμηλό κόστος με την αποτελεσματικότητα. Η τεχνολογία του γεωπολυμερισμού [10] φαίνεται να είναι πολύ ελκυστική στην ανάπτυξη τέτοιων νέων πυράντοχων υλικών[11,12]. Ο γεωπολυμερισμός είναι μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία που περιλαμβάνει την ετερογενή χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα μεταξύ διάφορων στερεών υλικών πλούσιων σε πυρίτιο και αργίλιο και ισχυρών αλκαλικών πυριτικών διαλυμάτων σε ιδιαίτερα αλκαλικές συνθήκες και ήπιες θερμοκρασίες. Δημιουργούνται έτσι άμορφες μέχρι ημι-κρυσταλλικές πολυμερείς δομές, που αποτελούν τη βάση μιας νέας οικογένειας καινοτόμων υλικών με την ονομασία γεωπολυμερή ή ανόργανα πολυμερή [13-18]. Τα γεωπολυμερή υλικά έχουν άριστες φυσικές, χημικές, μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, υψηλή επιφανειακή σκληρότητα, χαμηλή υδροαπορροφητικότητα, αμελητέα συρρίκνωση, θερμική σταθερότητα σε πυρκαγιά που τα καθιστούν πολύ ελπιδοφόρα υλικά για τον τομέα των κατασκευών. Η συγκεκριμένη εργασία στοχεύει στην μελέτη των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των ανόργανων πολυμερών υλικών που κατασκευάζονται με βάση τη σκωρία που δημιουργείται από την παραγωγή σιδηρονικελίου καθώς και την αξιολόγηση των δυνατοτήτων τους για την εφαρμογή σαν θερμική παθητική προστασία των υπόγειων κατασκευών.

2. Το υλικό – πειραματική διαδικασία

Η σκωρία που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία παρέχεται από την εταιρία Γ.Μ.Ε.Ε Λάρκο που ειδικεύεται στην παραγωγή σιδηρονικελίου από λατερίτες. Το μέσο μέγεθος κόκκου είναι (d_{50}) 15,05 μm . Η χημική ανάλυση (Πίνακας 2) που έγινε με τη μέθοδο της σύντηξης έδωσε τα παρακάτω στοιχεία :

Πίνακας 2.

Στοιχεία	% w/w
SiO ₂	41.14
Al ₂ O ₃	13.79
FeO	34.74
Cr ₂ O ₃	5.41
MgO	3.59
CaO	0.71
Ni	0.14

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται για την παρασκευή των γεωπολυμερών περιλαμβάνει την ανάμειξη του στερεού (σκωρία στην προκειμένη περίπτωση) με το αλκαλικό διάλυμα NaOH 7M. Ο λόγος στερεών προς υγρών είναι ίσος με 4 g/ml. Μετά την ανάμειξη δημιουργείται ένας ομογενής πολτός ο οποίος τοποθετείται σε κατάλληλα καλούπια και παραμένει εκεί 96 h οπότε και ξεκαλουπώνεται και είναι έτοιμο για την πραγματοποίηση δοκιμής.

Οι ιδιότητες των γεωπολυμερών που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία ήταν :

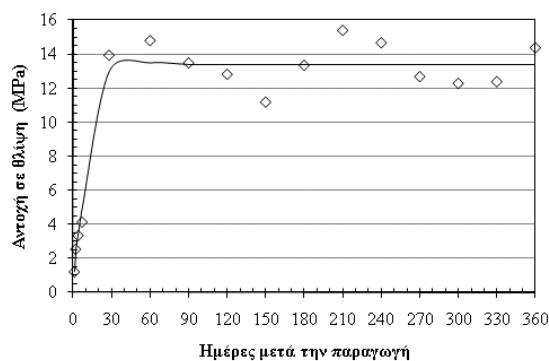
- α) δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (δοκίμια διαστάσεων 50 x 50 x 50 mm)
- β) δοκιμές κάμψης (δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm)
- γ) δοκιμές υδροαπορροφητικότητας σύμφωνα πρότυπο EN 771-1: 2003,
- δ) μέτρηση χρόνου στερεοποίησης, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3:2005
- ε) μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας

στ) Δοκιμή έκθεσης σε φλόγα. Για την αξιολόγηση των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού παρασκευάζονται πλάκες διαστάσεων 300 x 150 x 10 mm οι οποίες τοποθετούνται οριζόντια πάνω σε ένα μεταλλικό τρίποδο και η κάτω πλευρά εκτίθεται σε φλόγα προπανίου. Οι δύο πλευρές της πλάκας θερμομετρούνται με τη χρήση οπτικού πυρομέτρου κάθε 5 min.

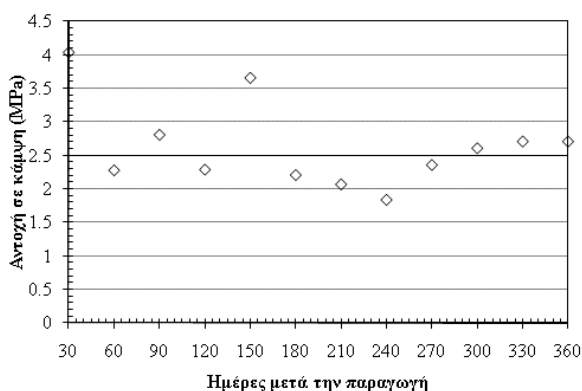
3. Αποτελέσματα

Μηχανικές ιδιότητες

Το ανόργανο πολυμερές έχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9. Η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται γραμμικά κατά τη διάρκεια των πρώτων 30 ημερών μετά την παραγωγή του υλικού φθάνοντας στην τιμή των 12 με 14 MPa. Έκτοτε, η αντοχή σε θλίψη παραμένει σχεδόν σταθερή, κυμαινόμενη μεταξύ 11 - 15 MPa. Η ίδια συμπεριφορά ακολουθείται και στην αντοχή σε κάμψη που μετά τις πρώτες 30 ημέρες είναι σχεδόν σταθερή περίπου στα 2,6 MPa, κυμαινόμενη μεταξύ από 2 - 4 MPa(σχ.2).



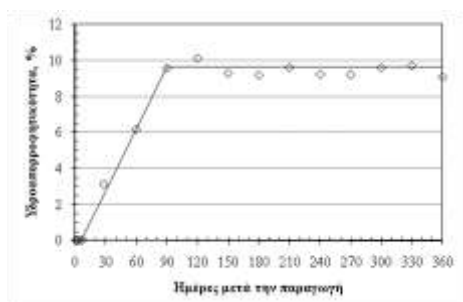
Σχ. 1. Αντοχή σε θλίψη.



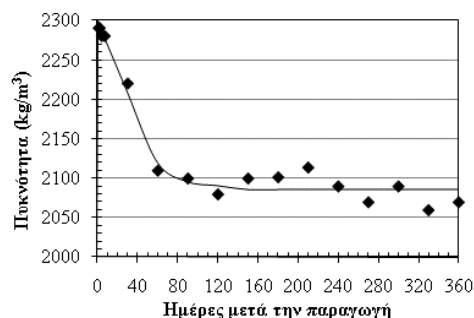
Σχ.2 Αντοχή σε κάμψη

Φυσικές ιδιότητες

Η υδροαπορροφητικότητα του υλικού αυξάνεται από 0 - 10%, όπως φαίνεται στο σχήμα 3α. Η υδροαπορροφητικότητα κατά τη διάρκεια της πρώτης εβδομάδας μετά την παραγωγή του υλικού είναι αμελητέα. Εν συνεχεία, αυξάνει γραμμικά φθάνοντας σχεδόν στο 10% μετά από 90 ημέρες και στη συνέχεια, παραμένει σταθερή. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του γεωπολυμερισμού.



(α)



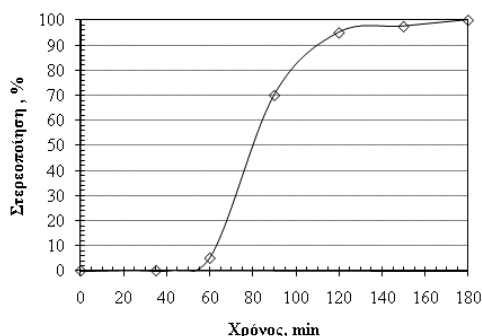
(β)

Σχ. 3. Φυσικές ιδιότητες γεωπολυμερούς: (α) η υδροαπορροφητικότητα (β) Πυκνότητα.

Δεδομένου ότι το υλικό ωριμάζει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο ρυθμός της εξάτμισης του νερού είναι πολύ χαμηλός και έτσι τα μόρια του νερού παγιδεύονται μέσα στους μικροπόρους που διαμορφώνονται μέσα στο ανόργανο πολυμερές. Ως εκ τούτου, η απορρόφηση του νερού είναι αρχικά αμελητέα (σχ. 3α), επειδή τα μόρια του νερού δεν μπορεί να διαχυθούν μέσα στους πόρους. Με την πάροδο του χρόνου, το νερό που είναι μέσα στους πόρους σταδιακά εξατμίζεται με αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας του υλικού από το 2290 kg/m^3 σε 2090 kg/m^3 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3β. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να αυξάνεται η υδροαπορροφητικότητα του και να φθάνει στην τιμή του 10% στις 90 ημέρες χρόνου ωρίμανσης. Εν συνεχεία, η πυκνότητα παραμένει σταθερή (σχ. 3β) όπως και η υδροαπορροφητικότητα (σχ. 3α).

Η επιτυχής εφαρμογή του υλικού απαιτεί ικανοποιητικές φυσικομηχανικές ιδιότητες. Μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των ανόργανων πολυμερών που επηρεάζει την εφαρμογή τους είναι ο χρόνος στερεοποίησης. Ο χρόνος στερεοποίησης του ανόργανου πολυμερούς σε θερμοκρασία περιβάλλοντος φαίνεται στο Σχήμα 4. Ο γεωπολυμερισμός σε θερμοκρασία περιβάλλοντος προχωρά με πολύ γρήγορο ρυθμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Η στερεοποίηση αρχίζει 55 λεπτά μετά την ανάμιξη της σκωρίας με το διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου 7M σε ένα λόγο στερεών προς υγρών ίσο με 4 g / ml . Η διαδικασία της σκλήρυνσης έχει ολοκληρωθεί σχεδόν 120 λεπτά μετά την ανάμιξη των πρώτων υλών, ενώ το ανόργανο πολυμερές έχει στερεοποιηθεί 100% μετά από 180 λεπτά. Μέσα στα πρώτα 55 λεπτά, ο πολτός συμπεριφέρεται ως ένα παχύρρευστο υγρό και μπορεί να διαμορφωθεί από τη χύτευση σε καλούπια ή εκτόξευση σε επιφάνεια από σκυρόδεμα. Μετά την έναρξη της στερεοποίησης (> 55 λεπτά), το υλικό μπορεί να μορφοποιηθεί με χύτευση,

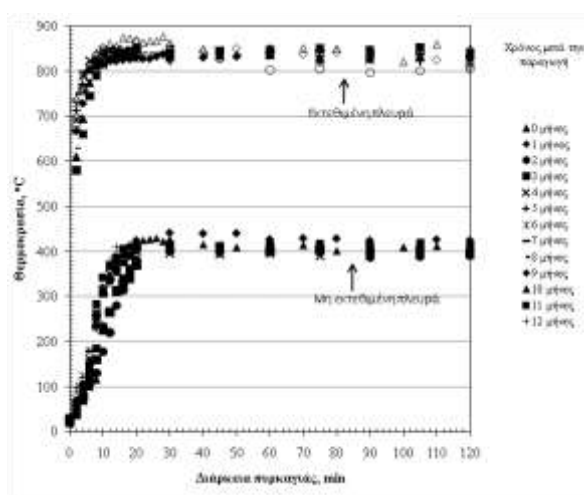
προκειμένου να αποφευχθεί ο σχηματισμός ρωγμών κατά τη διάρκεια της περιόδου ωρίμανσης. Μετά από 120 λεπτά, το υλικό συμπεριφέρεται ουσιαστικά ως στερεό και κατά συνέπεια δεν μπορεί να διαμορφωθεί μέσω οποιασδήποτε διαδικασίας χύτευσης.



Σχ. 4. Στερεοποίηση του υλικού σε σχέση με το χρόνο.

Θερμικές Ιδιότητες

Η συμπεριφορά του υλικού σε δοκιμές έκθεσης σε φλόγα φαίνεται στο Σχήμα 2 μέσω των καμπυλών θερμοκρασίας-χρόνου για τις εκτεθειμένες και μη εκτεθειμένες επιφάνειες του υλικού.



Σχ. 5. Καμπύλες θερμοκρασίας - χρόνου έκθεσης σε φλόγα για διάφορους χρόνους μετά την παρασκευή των υλικών.

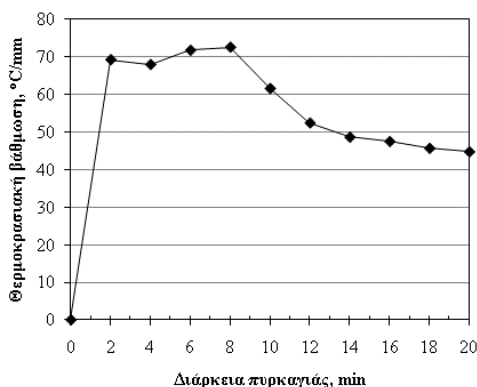
Είναι προφανές ότι υπό θερμικά σταθερές συνθήκες το υλικό μπορεί να επιτύχει μια μεγάλη θερμοκρασιακή βάρθρωση $41\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{mm}$ που είναι σταθερή σχεδόν καθ 'όλη τη διάρκεια της δοκιμής εκτός από μια αρχική περίοδο 20 λεπτών, όπου το σύστημα είναι θερμικά ασταθές. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας $0,135\text{ W} / \text{mK}$ (μετρούμενη σε 300 K). Αυτή η τιμή είναι σημαντικά χαμηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές των συνηθισμένων δομικών υλικών για οικοδομές [19], όπως τούβλα ($0,7 - 1,3\text{ W} / \text{mK}$), πήλινα πλακίδια ($0,5 - 0,7\text{ W} / \text{mK}$), τσιμεντόλιθοι ($0,5 - 0,6\text{ W} / \text{mK}$) και τσιμέντο ή γυψοκονιάματα ($0,2 - 0,8\text{ W} / \text{mK}$), ενώ είναι 2-4 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των συνήθως χρησιμοποιούμενων μονωτικών υλικών ($0,03 - 0,07\text{ W} / \text{mK}$).

Εκτός από τα παραπάνω, το γεωπολυμερές της σκωρίας μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ως εμπόδιο στη φλόγα εξαλείφοντας την πιθανότητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Το υλικό χαρακτηρίζεται ως μη αναφλέξιμο και άφλεκτο λόγω του 100% ανόργανου χαρακτήρα του. Επιπλέον, το υλικό κατά τη διάρκεια της δοκιμής έκθεσης σε φλόγα αποτρέπει το σχηματισμό ρωγμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχ. 6. Εκτεθειμένη όψη μετά τη δοκιμή σε φλόγα

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής το υλικό απαιτεί περίπου 20 λεπτά, προκειμένου να επιτύχει θερμική κατάσταση ισορροπίας (σχ. 5). Κατά τη διάρκεια της θερμικής ασταθούς κατάστασης, η βάρθρωση της θερμοκρασίας μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Αρχικά, το υλικό επιτυγχάνει πολύ υψηλή βάρθρωση της θερμοκρασίας της τάξης των $70^{\circ}\text{C} / \text{mm}$ που παραμένει σχεδόν σταθερή για τα πρώτα 8 λεπτά της δοκιμής. Στη συνέχεια, η βάρθρωση της θερμοκρασίας μειώνεται εκθετικά μέχρι τη θερμική ισορροπία της τιμής των $41^{\circ}\text{C} / \text{mm}$ (Περιοχή II). Η θερμοκρασία της μη εκτεθειμένης πλευράς υλικού στην περιοχή I είναι χαμηλότερη και γύρω στους 100°C (σχ. 5). Σε αυτή την περιοχή το μεγαλύτερο μέρος του φυσικά προσροφημένου νερού στο υλικό έχει αφαιρεθεί [20]. Η απομάκρυνση του νερού είναι μια ενδόθερμη διαδικασία που καταναλώνει μεγάλη ποσότητα της εισερχόμενης θερμότητας λόγω της μεγάλης λανθάνουσα θερμότητας εξάτμισης του νερού. Λόγω αυτού, η θερμοκρασία της μη εκτεθειμένης πλευράς υλικού στην περιοχή I παραμένει κάτω και γύρω στους 100°C και το ποσοστό της αύξησης της θερμοκρασίας είναι σημαντικά χαμηλότερο από εκείνο της περιοχής II (σχ. 5). Στην περιοχή II, συμβαίνει η απότομη άνοδος της θερμοκρασίας (σχ. 5) φτάνοντας την τιμή ισορροπίας των 420°C . Στην περιοχή αυτή τα ανόργανα πολυμερή συνεχίζουν να χάνουν βάρος το οποίο αποδίδεται στην αφυδροξυλίωση της επιφάνειας των ομάδων Silanol ($>\text{Si-OH}$) και Aluminol ($>\text{Al-OH}$).



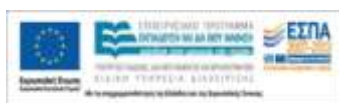
Σχ. 7. Βάρθρωση θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της θερμικά ασταθούς κατάστασης

4. Συμπεράσματα

Τα μικρής κλίμακας πειράματα στο εργαστήριο έδειξαν ότι το ανόργανο πολυμερές με βάση τη σκωρία μπορεί αποτελεσματικά να τεθεί εμπόδιο σε φλόγα δημιουργώντας ένα φράγμα θερμοκρασίας. Η ιδιότητα του αυτή αποδίδεται στον 100% ανόργανο χαρακτήρα του που το χαρακτηρίζει ως μη ανάφλεξιμο και άκαυστο, κυρίως λόγω της χαμηλής τιμής της θερμικής αγωγιμότητας του ($0.135 \text{ W} / \text{mK}$ μετρούμενη στους 300 K). Η στερεοποίηση του γεωπολυμερούς αρχίζει 55 λεπτά μετά την ανάμειξη της σκωρίας με τον αλκαλικό ενεργοποιητή και τελειώνει 65 λεπτά αργότερα με το σχηματισμό του στερεοποιημένου ανόργανου πολυμερούς. Μέσα στα πρώτα 55 λεπτά, ο πολτός συμπεριφέρεται ως ένα παχύρρευστο υγρό και μπορεί να διαμορφωθεί με την έκχυση σε καλούπια ή εκτόξευση σε σκυρόδεμα.

Τα νέα ανόργανα πολυμερή υλικά έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η αντοχή τους σε 28 ημερών δοκίμια είναι της τάξης των 12 έως 14 MPa, ενώ αντοχή τους στην κάμψη είναι της τάξης των 2,6 MPa. Η υδροαπορροφητικότητα ξεκινά από το μηδέν και φτάνει στην τιμή της ισορροπίας στο 10% σχεδόν 90 ημέρες μετά την παραγωγή των υλικών. Η πυκνότητα του υλικού ποικίλλει μεταξύ 2290 kg/m³ και 2090 kg/m³ με την τελευταία τιμή να εκπροσωπεί την τιμή ισορροπίας που επιτυγχάνεται σχεδόν 90 ημέρες μετά την παραγωγή των υλικών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε εργαστηριακή κλίμακα απέδειξαν ότι το ανόργανο πολυμερές με βάση τη σκωρία έχει μια καλή θερμομονωτική ικανότητα που μπορεί να το καταστήσει ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για την παθητική πυροπροστασία των υπόγειων κατασκευών. Αν και τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά της συμπεριφοράς σε πειράματα μεγάλης κλίμακας, η αντοχή στη φωτιά αυτού του εξωτερικού συστήματος πυροπροστασίας καθώς και ο τρόπος εφαρμογής του, πρέπει να αποδειχθεί σε μεγάλης κλίμακας δοκιμές σε υψηλότερες θερμοκρασίες, συμπεριλαμβανομένων όλων των ειδών της μηχανικής φόρτισης πριν καταλήξουμε για την αποτελεσματικότητά του και την καταλληλότητα του για την παθητική πυροπροστασία των υπόγειων κατασκευών.

Αναγνώριση



Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

Βιβλιογραφία

- [1] Both, P.W. van de Haar, G.L. Tan, G.M. Wolsink, Evaluation of passive fire protection measures for concrete tunnel linings. International Conference & 1 Day Seminar 'Tunnel Fires and Escape from Tunnels', Lyon, France, 5-7 May; 1999; p. 10.
- [2] Khoury G. A., Passive fire protection in tunnels, Concrete. 2003;37(2):31-36.
- [3] Khoury G.A., Effect of fire on concrete and concrete structures, Progress in Structural Engineering and Materials 2000;2:49-447.
- [4] Felicetti R., Gambarova P.G., Meda A., Residual behaviour of steel rebars and R/C sections after a fire, Construction and Building Materials. 2009;23:3546-3555.
- [5] Topcu I.B., Karakurt C., Properties of reinforced concrete steel rebars exposed to high temperatures, Research Letters in Materials Science 2008;41: doi:10.1155/2008/814137
- [6] Beard A., Carvel R., The Handbook of Tunnel Fire Safety, Thomas Telford Publishing, London ;2005.p. 110-126.
- [7] Brinson A., Active Fire Protection in Tunnels: in Proceedings of the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt, Germany, ;2010. p. 47-58.
- [8] Mawhinney J.R., Trelles J., Performance testing of fire protection systems in tunnels - Integrating test data with CFD simulations: in Proceedings of the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt, Germany ;2010 .p. 297-309.
- [9] Breunese A.J., Both C., Wolsink G.M., Fire testing procedure for concrete tunnel linings. Efectis Nederland Report (2008-Efectis-R0695)

- [10] Davidovits J., Geopolymer chemistry and sustainable development: in Proceedings of the world congress Geopolymer 2005, Saint-Quentin, France ;2005 .p. 9-15.
- [11] Cheng TW., Chiu JP., Fire resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Mineral Engineering*. 2003;16: 205-210.
- [12] Giannopoulou I., Panias D., Fire resistant geopolymers synthesized from industrial wastes, *World Journal of Engineering*. 2008; 5(3): 130-131.
- [13] Panias D., Giannopoulou I., Perraki T., Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*. 2007;301:246–254.
- [14] Maragos I., Giannopoulou I., Panias D., Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers, *Minerals Engineering*. 2008; 22:196-203.
- [15] Dimas D., Giannopoulou I., Panias D., Utilization of alumina red mud for synthesis of inorganic polymeric materials, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* . 2009;30(3): 211-239.
- [16] Palomo A., Grutzeck MW., Blanco MT., Alkali activated fly ashes-A cement for the future, *Cement and Concrete Research*. 1999; 29:1323-1329.
- [17] Komnitsas K., Zaharaki D., Perdikatsis V., Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers, *Journal of Hazardous Materials*. 2009;161:760-768.
- [18] Xu H., van Deventer JSJ., The geopolymerization of alumino-silicate minerals, *International Journal of Mineral Processing*. 2000; 59:247-266.
- [19] Hagen K.D, Heat transfer with applications, Prentice Hall, London ;2000 .p. 629-636.
- [20] Dimas D., Giannopoulou I., Panias D., Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology, *Journal of Materials Science* . 2009;44:3719-3730.