

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΚΩΡΙΩΝ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

I. Λιάπης, X. Στρατής

BEng, MSc, DIC, Πολιτικός Μηχανικός, ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε., Θεσσαλονίκη, Greece
Πολιτικός Μηχανικός, ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε., Θεσσαλονίκη, Greece

Περίληψη

Το βασικότερο παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας χάλυβα είναι η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου. Από το 2001 η ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ επεξεργάζεται τη σκωρία των χαλυβουργιών του ομίλου ΣΙΔΕΝΟΡ παράγοντας σκληρά αδρανή. Η εργασία επικεντρώνεται στην παραγωγική διαδικασία, από την έξοδο της σκωρίας από το χαλυβουργείο έως την προετοιμασία των αδρανών προς χρήση σε αντιολισθηρά ασφαλτομείγματα. Τα αποτελέσματα των μελετών δείχνουν την μικρή μεταβολή των δεικτών σε σύγκριση με τμήματα ίδιων οδών με φυσικά αδρανή στην αντίσταση σε ολίσθηση (SRV) όπως και βάθος μακροϋφής (HS). Στα πλαίσια των ερευνητικών προγραμμάτων συμπεριλαμβάνονται μελέτες και στο τμήμα του πετάλου του Μαλιακού το οποίο στρώθηκε επίσης με σκληρά αδρανή από σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου το διάστημα του Ιουλίου-Σεπτεμβρίου 2007.

Λέξεις κλειδιά: βιομηχανικά παραπροϊόντα, αδρανή, σκωρία, αντιολισθηρά

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΩΡΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΛΙΒΑΝΟΥ

1.1 Νομοθετικό πλαίσιο

Το 1996, η Ευρωπαϊκή Κοινότητα έχει εκδώσει την Ευρωπαϊκή Οδηγία για Ολοκληρωμένη Πρόληψη και Έλεγχο της Ρύπανσης (IPPC) όπου περιγράφονται Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (BAT) για κάθε βιομηχανική δραστηριότητα. Από τον Μάιο του 2004 όλα τα κράτη μέλη συμπεριλαμβανομένων και των νέων μελών υποχρεούνται να εφαρμόσουν πλήρως την οδηγία τόσο σε υπάρχουσες όσο και νέες βιομηχανικές εγκαταστάσεις η οποία, μεταξύ άλλων, επιβάλλει στα χαλυβουργεία να ελαχιστοποιήσουν τα απόβλητα που προκύπτουν από τη παραγωγική διαδικασία και απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Έχοντας ως αίτιο την ανάγκη προσαρμογής στους νέους ευρωπαϊκούς κανονισμούς, ο Όμιλος ΣΙΔΕΝΟΡ αναζήτησε λύσεις για την πλήρη εναρμόνισή της με τις ευρωπαϊκές οδηγίες για όλα τα χαλυβουργεία του ομίλου της. Μέρος των βελτιωτικών αποφάσεων ήταν η σύσταση μιας θυγατρικής εταιρίας, της ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε., με κύριο μέλημα την ανακύκλωση όλων των παραπροϊόντων των χαλυβουργιών και την παραγωγή νέων προϊόντων από αυτά. Από το 2002, η πρωτοπόρος για την Ελλάδα εταιρεία ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε. επεξεργάζεται, βάση διεθνών πρακτικών, τη μεγαλύτερη ποσότητα σκωρίας στην Ελλάδα, το σύνολο δηλαδή της παραγόμενης μεταλλουργικής σκωρίας των χαλυβουργιών της ΣΙΔΕΝΟΡ, εκπληρώνοντας τους λόγους σύστασής της.

1.2 Σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου, (Electric Arc Furnace Slag , EAF)

Οι «σκωρίες» είναι μεταλλουργική έκφραση που περιγράφει γενικά τα μη μεταλλικά ορυκτά συστατικά μέρη και διακρίνονται από τις τέφρες, που αποτελούν κατάλοιπα καύσης. Κατά τη βιβλιογραφία, η σκωρία του ηλεκτρικού κλιβάνου είναι ένα βιομηχανικά ληφθέν τεχνητό πέτρωμα, του οποίου η χημική σύνθεση, η ορυκτολογική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες είναι ανάλογες των μαγματικών πετρωμάτων (π.χ. βασάλτης ή γρανίτης).

Η ποσότητα που παράγεται στα χαλυβουργεία, ως παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας, αποτελεί ποσοστό περίπου 10%-15% επί της συνολικής ποσότητας τροφοδοσίας του κλιβάνου με αποτέλεσμα οι μεταλλουργικές σκωρίες να είναι ένα από τα μεγαλύτερα σε ποσότητα βιομηχανικά παραπροϊόντα. Η συνολική ποσότητα στην Ελλάδα είναι περίπου 350.000 τόνοι ανά έτος.

Ο παλαιοσίδηρος (σκραπ) αποτελεί την πρώτη ύλη των χαλυβουργιών. Αρχικά γίνεται διαχωρισμός από μονάδα άλεσης (shredder) σε μεταλλικά μέρη. Στη συνέχεια μόνο οι σιδηρούχες ύλες προωθούνται στο κλίβανο για τήξη, όπου προστίθενται ασβέστης και άλλα συλλιπάσματα με αποτέλεσμα τη δημιουργία της «μεταλλουργικής σκωρίας». Η σκωρία οδηγείται σε ρευστή κατάσταση (1630°C) από ειδική θυρίδα του κλιβάνου, συλλέγεται και οδηγείται σε χώρο συγκέντρωσης όπου και ψύχεται. Η απότομη ψύξη της σκωρίας, της δίνει την άμορφη, υαλώδη μορφή προσδίδοντας έτσι τις άριστες μηχανικές της ιδιότητες. Από τη στιγμή αυτή η σκωρία παύει να είναι παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας του χαλυβουργείου και αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή διαβαθμισμένων σκληρών αδρανών.

Στοιχείο	Ποσοστό
FeO _x	36%
CaO	31%
SiO ₂	14%
Al ₂ O ₃	6%
MnO	6%
MgO	2%

Πίνακας 1. Τυπική χημική σύσταση (XRF)

Για την παραγωγή των τελικών προϊόντων ακολουθείται σειρά μηχανικών διεργασιών, κατά σειρά προδιαλογή, αποσιδήρωση, πρωτογενής θραύση, δευτερογενής θραύση και τελικά παραγωγή των τελικών προϊόντων από κοσκίνιση. Τα αδρανή που παράγονται ταξινομούνται σε διάφορα κλάσματα και αποθηκεύονται σε σωρούς στις πλατείες τελικών προϊόντων. Από τον 02/2006 τα σκληρά αδρανή της ΑΕΙΦΟΡΟΣ είναι πιστοποιημένα κατά ΕΛΟΤ EN 13043.

Το κύριο πλεονέκτημα της σωστά επεξεργασμένης σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (στο εξής ΣΗΚ) είναι οι άριστες μηχανικές ιδιότητες που ικανοποιούν τόσο τις εγχώριες όσο και τις διεθνείς προδιαγραφές αδρανών για την κατασκευή επιφανειακών επιστρώσεων και συγκεκριμένα αντιολισθηρών ταπήτων [1]. Η χρήση των αδρανών αυτών στην οδοποιία και ειδικά σε οδούς με μεγάλες απαιτήσεις αντίστασης σε ολίσθηση, όπως οδούς ταχείας κυκλοφορίας και αυτοκινητόδρομους, επιδρά καταλυτικά στον τομέα της ασφάλειας. Η ποιότητα δε των οδοστρωμάτων αυτών μπορεί να συγκριθεί ποιοτικά με τα δίκτυα αυτοκινητοδρόμων στις υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες.

Ως βιομηχανικά ληφθέν, τεχνητό πέτρωμα και μέσω της τυποποιημένης παραγωγής πλεονεκτεί έναντι των υπόλοιπων φυσικών αδρανών στην καθαρότητα των κόκκων. Η περιεκτικότητα σε άμμο στα χονδρόκοκκα κλάσματα περιορίζεται σε ποσοστό μικρότερο του 5% τη στιγμή που στα φυσικά αδρανή το αντίστοιχο ποσοστό φθάνει το 30%. Η καθαρότητα των κόκκων σε συνδυασμό με την σταθερή κοκκομετρική διαβάθμιση συντελούν στην απλοποίηση της παραγωγής ασφαλτομείγματος.

1.3 Περιγραφή μελέτης

Στόχος της μελέτης είναι η καταγραφή των μηχανικών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων και συγκεκριμένα των αντιολισθηρών ταπήτων οι οποίοι κατασκευάστηκαν με αδρανή σκωρίας παραγωγής ΑΕΙΦΟΡΟΥ. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούσαν τάπητες κατασκευασμένους με αδρανή σκωρίας όσο και με φυσικά αδρανή. Τα αποτελέσματα της μελέτης συγκρίνονται με τις συνήθεις ελληνικές προδιαγραφές κατασκευής αντιολισθηρών στρώσεων και με την επίδραση του περιβάλλοντος και του κυκλοφοριακού φόρτου στο ρυθμό μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών σε μία χρονική περίοδο 4 μέχρι και 14 μηνών μετά την παράδοση των νεοκατασκευασμένων τμημάτων στην κυκλοφορία. Οι αντιολισθηροί τάπητες από τους οποίους έγινε δειγματοληψία κατασκευάστηκαν βάσει της ασυνεχούς διαβάθμισης του τύπου 2 ονομαστικού μεγέθους κόκκου 12,5mm.

2. ΕΠΙΤΟΠΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ

Για τους σκοπούς της μελέτης μετρήθηκαν δύο βασικά χαρακτηριστικά των ταπήτων, ο δείκτης αντίστασης σε ολίσθηση (Skid Resistance Value, SRV) καθώς και το βάθος μακροϋφής (HS). Η δοκιμή SRV εκτελέστηκε με την χρήση του βρετανικού εκκρεμούς. Οι πίνακες 2 και 3 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα στα τμήματα του αυτοκινητόδρομου ΠΑΘΕ Υλική – Αγ. Κωνσταντίνος και Σκοτίνα – Κατερίνη αντίστοιχα.

a/a	Θέση (αριθμ.)	Χρόνος (μήνες)	SRV (%)	HS (mm)
1	1	4	55-60	0.90-1.00
2	1	14	61-65	0.64
3	2	4	58-60	1.10
4	2	14	61-66	0.64-0.68
5	3	4	58-60	n/a
6	3	14	65-66	0.64

Πίνακας 2. Σύνοψη μετρήσεων του τμήματος Υλική – Αγ. Κωνσταντίνος

a/a	Θέση (αριθμ.)	Χρόνος (μήνες)	SRV (%)	HS (mm)
1	1	4	60-66	1.32-1.38
2	1	14	56-62	1.15-1.24
3	2	4	63-64	1.20-1.35
4	2	14	62-67	0.96-1.21
5	3	4	62-70	1.35

Πίνακας 3. Σύνοψη μετρήσεων του τμήματος Σκοτίνα - Κατερίνη

Σε όλες τις περιπτώσεις οι τεχνικές προδιαγραφές θέτουν ως κατώτατο όριο για τον δείκτη αντίστασης σε στίλβωση (SRV) το 50%, ενώ για το βάθος μακροϋφής το 1,00mm. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των αδρανών σκωρίας φαίνονται στον πίνακα 4.

Αυτοκινητόδρομος (a/a)	LA (%)	PSV (%)	% EAF*	% άμμος*	% ασφ.	% κενών
Αγ. Θεόδωροι-Αλμυρός	15.00	62	74.9	25.1	4.68	9.49
Υλίκη-Αγ. Κωνσταντίνος	21.68	65	67	33	4.65	9.10
Σκοτίνα-Κατερίνη	18.06	64	63	37	4.85	10.30

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά από τις μελέτες σύνθεσης

όπου LA δοκιμή Los Angeles κατά το πρότυπο ASTM C131/89

PSV Polished Stone Value κατά το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1997.80

AAV Aggregate Abrasion Value κατά το πρότυπο BS 812.113-1991

Οι τιμές SRV μαζί με τα αποτελέσματα των δοκιμών PSV κατά τους αρχικούς ελέγχους που διενεργήθηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 5. Σε όλες τις περιπτώσεις μετά την πάροδο 14 μηνών από την παράδοση στην κυκλοφορία οι τιμές SRV ικανοποιούν τα όρια των ελληνικών προτύπων. Λόγω της φυσικής φθοράς και του κυκλοφοριακού φόρτου η μεταβολή κυμαίνεται από 0 έως 6 %

Αυτοκινητόδρομος (a/a)	PSV (%)	μέση τιμή SRV στους 4 μήνες (%)	μέση τιμή SRV στους 14 μήνες (%)
Αγ. Θεόδωροι - Αλμυρός	62	58	-
Υλίκη - Αγ. Κωνσταντίνος	65	59	64
Σκοτίνα - Κατερίνη	64	64	62

Πίνακας 5. Σύνοψη αποτελεσμάτων

Τα βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ικανοποίηση των προδιαγραφών από τα ασφαλτομείγματα με αδρανή ΣΗΚ στην επιφανειακή στρώση μετά και την πάροδο των 14 μηνών και μάλιστα σε συνθήκες βαριάς κυκλοφορίας.

3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΚΛΗΡΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΣΗΚ

Για τους σκοπούς της μελέτης έγιναν μετρήσεις στην επαρχιακή οδό Βόλου – Νέας Αγχιάλου και επί της Εθνικής Οδού Λαμίας – Καρπενησίου από τον όγδοο έως τον δωδέκατο μήνα μετά την παράδοση των τμημάτων στην κυκλοφορία. Όπως και προηγουμένως, μελετήθηκαν ο δείκτης αντίστασης σε ολίσθηση (SRV) και το βάθος μακροϋφής (HS) των αντιολισθηρών ταπήτων [2]. Τα δεδομένα αφορούσαν τάπητες με σκωρία ΑΕΙΦΟΡΟΥ αλλά και τάπητες με φυσικά σκληρά αδρανή. Στον πίνακα 6 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις δύο κατηγορίες ταπήτων.

a/a	Οδός	Υλικό	SRV (%)	HS (mm)
1	Βόλος – Νέα Αγχιάλος	EAF slag	52	0.85
2	Βόλος – Νέα Αγχιάλος	φυσικό αδρανές	51	0.65
3	Λαμία – Καρπενήσι	EAF slag	52	0.7
4	Λαμία – Καρπενήσι	φυσικό αδρανές	41	0.4

Πίνακας 6. ΣΗΚ και φυσικό σκληρό πέτρωμα

Σε όλες τις περιπτώσεις οι επιφανειακές στρώσεις με ΣΗΚ παρουσιάζουν σαφώς υψηλότερες τιμές των δεικτών SRV και HS από τις αντίστοιχες τιμές για ασφαλτοτάπητες με φυσικό σκληρό πέτρωμα, παρά το γεγονός ότι στην περίπτωση της επαρχιακής οδού Βόλου – Νέας Αγχιάλου η διαφορά των μέσων τιμών του δείκτη της αντίστασης σε ολίσθηση δεν είναι στατιστικά σημαντική ανάμεσα στους δύο τάπητες. Το ίδιο συμπέρασμα απορρέει και από την μελέτη στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ και συγκεκριμένα του τμήματος μεταξύ Υλίκης και Αγίου Κωνσταντίνου που συνοψίζεται στον πίνακα 7. Αντίστοιχες μελέτες σε αδρανή ΣΗΚ σε επιφανειακές στρώσεις στο Rotherham της Μ. Βρετανίας την δεκαετία του 1980 κατέληγαν στο συμπέρασμα ότι «επιφανειακές στρώσεις με σκωρία έχουν τουλάχιστον εξίσου καλές μακροχρόνιες αντιολισθητικές ιδιότητες όσο και επιφανειακές στρώσεις με αντίστοιχα φυσικά αδρανή» [3].

a/a	Αυτοκινητόδρομος	Φυσικό πέτρωμα		EAF slag	
		SRV (%)	HS (mm)	SRV (%)	HS (mm)
1	Υλίκη – Αγ. Κωνσταντίνος	52	0.25	65	0.79
2	Υλίκη – Αγ. Κωνσταντίνος	52	0.24	66	0.64
3	Υλίκη – Αγ. Κωνσταντίνος	50	0.28	66	0.79
4	Υλίκη – Αγ. Κωνσταντίνος	50	0.24	62	0.64
5	Υλίκη – Αγ. Κωνσταντίνος	52	0.38	61	0.68
6	Υλίκη – Αγ. Κωνσταντίνος	52	0.31	66	0.64

Πίνακας 7. Σκωρία/φυσικό πέτρωμα στο τμήμα Υλίκη – Αγ. Κωνσταντίνος

Τα αποτελέσματα της συμπίπτουν με αντίστοιχα αποτελέσματα μελετών στην Μ. Βρετανία σε ασφαλτομείγματα με σκωρία και φυσικού πετρώματος με υψηλό PSV [4]. Στην εν λόγω μελέτη αντί του δείκτη αντίστασης σε ολίσθηση (SRV) μετρήθηκε ο συντελεστής πλευρικής τριβής (SFC) καταλήγοντας στα ίδια συμπεράσματα με την ελληνική μελέτη.

Γίνεται αντιληπτό πως οι μηχανικές ιδιότητες των αδρανών επηρεάζουν άμεσα την συμπεριφορά του τελικού ασφαλτοτάπητα. Πέραν των ιδιοτήτων που μελετήθηκαν στα πλαίσια του ελληνικού ερευνητικού προγράμματος (SRV και HS) η διεθνής έρευνα επεκτείνεται σε όλους τους τομείς των ασφαλτικών. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της μελέτης της πολιτείας του Όρεγκον στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η έρευνα επικεντρώθηκε σε μετρήσεις τροχοαυλάκωσης (rutting) όσο και ελαφράς αποσύνθεσης (raveling) σε ασφαλτικές στρώσεις κυκλοφορίας κατασκευασμένες είτε με αδρανή σκωρίας είτε με φυσικά σκληρά αδρανή. Οι μετρήσεις τροχοαυλάκωσης αφορούσαν το μέγεθος του παραμορφωμένου ασφαλτοτάπητα ενώ με τις

μετρήσεις ελαφράς αποσύνθεσης καθορίζεται το ποσοστό της φθαρμένης επιφάνειας προς το σύνολο της επιφάνειας του ασφαλτοτάπητα με το συγκεκριμένο αδρανές. Η μελέτη διήρκησε από το 1995 έως το 1999 [5].

Σύμφωνα με την τελική έκθεση η παραμορφωμένη επιφάνεια σε ασφαλτοτάπητες σε συμβατικά σκληρά αδρανή ήταν κατά 36% μεγαλύτερο από ότι σε ασφαλτοτάπητες με ΣΗΚ. Παράλληλα η παραμόρφωση στα σημεία όπου παρατηρήθηκε τροχοαυλάκωση ήταν 15% μικρότερη στους τάπητες με σκωρίες. Εξίσου σημαντική είναι και η περιβαλλοντική σκοπιά της χρήσης αντιολισθηρών αδρανών σκωρίας έναντι φυσικών σκληρών αδρανών [6].

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καθώς η εμπειρία στην χρήση σκωρίας στην Ελλάδα είναι περιορισμένη, μέσω του κοινού ερευνητικού προγράμματος με το ΑΠΘ, μελετήθηκε η συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων τόσο σε μείγματα με σκωρίες όσο και σε μείγματα με φυσικά σκληρά αδρανή.

Μέσω της συνεργασίας της ΑΕΙΦΟΡΟΣ με τις σημαντικότερες κατασκευαστικές εταιρείες και των μελετών σύνθεσης για τα μεγαλύτερα οδικά έργα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- τα σκληρά αδρανή ΣΗΚ ικανοποιούν πλήρως τις εγχώριες προδιαγραφές ασφαλτικού σκυροδέματος, υπερκαλύπτοντας τις επιμέρους απαιτήσεις. Παράλληλα διαφαίνεται η ανθεκτικότητα σε γήρανση μέσω φυσικής φθοράς και κυκλοφοριακού φόρτου, με συνέπεια την υπερκάλυψη των δεικτών συντήρησης μετά την πάροδο 14 μηνών από την παράδοση στην κυκλοφορία και
- τα αποτελέσματα συγκλίνουν στο συμπέρασμα της υψηλότερης ποιότητας τάπητα με αδρανή σκωρίας σε σύγκριση με φυσικά σκληρά αδρανή, τόσο από τα αποτελέσματα επιμέρους δοκιμών των αδρανών, όσο και από τις μετρήσιμες ιδιότητες του ασφαλτοτάπητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Motz H. & Geiseler J., “Products of steel slags an opportunity to save natural resources”, Waste Management, Waste Management 21 (2001): 285-293
- [2] Κεχαγιά, Φ., “Χρήση σκωριών χαλυβουργίας σε κατασκευές οδοστρωμάτων. Χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων στην οδοποιία Πρακτικά Ημερίδας, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (2004)
- [3] Stock et al., “Skidding Characteristics of Pavement Surfaces Incorporating Steel Slag Aggregates”. Transportation Research Record 1545, Asphalt Pavement Surfaces and Asphalt Mixtures: 35-40 (1996)
- [4] Jones N., “The Successful Use of Electric Arc Furnace Slag in asphalt”, 2nd European Slag Conference, Düsseldorf, (2000)
- [5] Hunt L. & Boyle G. 2000. “Steel slag in hot mix asphalt concrete”, Final Report – State Research Project 511, Oregon Department of Transportation
- [6] Πραπίδης, Μ., “Use of slag in skid resistant asphalt mixes based on mechanical and environmental criteria”, Αθήνα: HELLECO (2005)