

## Μελέτη ιδιοτήτων συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας αλουμινίου με υλικό πλήρωσης ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη

**Α. Μουτσάτσου<sup>1</sup>, Γ.Σ. Ίτσκος<sup>1,2</sup>, Ν. Κούκουζας<sup>2</sup> και Π. Βουνάτσος<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773, Ζωγράφου, Αθήνα

<sup>2</sup>Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης / Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων (ΕΚΕΤΑ/ΙΤΕΣΚ), 4<sup>ο</sup> χλμ Πτολεμαΐδας-Μποδοσακείου Νοσοκομείου, 50200 Πτολεμαΐδα

*Λέξεις κλειδιά: MMCs, σκληρότητα, ιπτάμενη τέφρα λιγνίτη, αλουμίνιο*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Οι σύγχρονες τάσεις στον τομέα της ανάπτυξης των συνθέτων υλικών, επιβάλλουν την οικονομική βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους και τον προσανατολισμό της παραγωγικής διαδικασίας τους σε διεργασίες με θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Στο πλαίσιο αυτών των επιδιώξεων αποφασίστηκε η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας των σταθμών παραγωγής ενέργειας ως υλικού πλήρωσης στην παραγωγική διαδικασία των συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας καθαρού αλουμινίου και κραμάτων αυτού. Στην παρούσα μελέτη παρασκευάστηκαν δοκίμια συνθέτων υλικών (Metal Matrix Composites, MMCs) μήτρας αλουμινίου και κράματος αλουμινίου-πυριτίου (Al-12%Si) με χρήση, ως υλικού πλήρωσης, ιπτάμενων τεφρών από τις περιοχές της Καρδιάς (ΙΤΚ) και της Μεγαλόπολης (ΙΤΜ). Τα τελικά δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας και οι ιπτάμενες τέφρες συμμετείχαν σε αυτά σε ποσοστά: 5%, 10% και 15%. Κατόπιν, και αφού προηγουμένως είχε ερευνηθεί η θερμική τους συμπεριφορά με διαφορική θερμιδομετρική ανίχνευση (DSC), τα σύνθετα προϊόντα ψήθηκαν στους 600°C για 2 και 6 ώρες. Η πυκνότητα των υλικών και η σκληρότητά τους (Vickers) μελετήθηκαν σε συνάρτηση με το ποσοστό της συμμετοχής της ιπτάμενης τέφρας σε αυτά. Επίσης, προσδιορίστηκαν η χημική και ορυκτολογική σύσταση των συνθέτων υλικών, με τη χρήση της μεθόδου φθορισμού ακτινών-X (XRF) και της μεθόδου περίθλασης ακτινών-X (XRD) αντίστοιχα ενώ μελετήθηκε η μικροδομή τους με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Τα σύνθετα υλικά του αλουμινίου γνωρίζουν ποικίλες εφαρμογές, παρόμοιες με αυτές του καθαρού αλουμινίου, όσον αφορά τις δομικές κατασκευές.

## Investigation of the properties of aluminum-based MMCs with lignite fly ash as a filler material

**Moutsatsou A., Itskos G.S., Koukouzas N. and Vounatsos P.**

<sup>1</sup>Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iron Polytechniou str. 157 73 Athens

<sup>2</sup>Centre for Research and Technology Hellas / Institute for Solid Fuels Technology and Applications (CERTH/ISFTA), 4<sup>th</sup> klm of Ptolemais-Bodosakion Hospital Road, GR-50200, Ptolemais, Greece

### ABSTRACT

Current trends towards the research field of composite materials necessitate their economical advancement as well as the development of their manufacturing in a more environmental-friendly

way. In that frame, we decided to investigate the potential utilization of lignite fly ash as a reinforcement material in the production process of pure aluminum (Al) and aluminum alloy-based metal matrix composites (MMCs). In the present paper, two different lignite fly ashes (FAs) originated from Kardias, Northern Greece (KFA, Class C) and from Megalopolis, Southern Greece (MFA, Class F) were utilized for the fabrication of Al/fly ash Metal Matrix Composites. Aluminum-fly ash and aluminum/silicon alloy (Al-12% Si)-fly ash mixtures containing 5%, 10% and 15% w/w fly ash were prepared and compacted. The products were tested for their thermal behavior by the use of Differential Scanning Calorimetry (DSC) and sintered at 600°C for two (2h) and six hours (6h). Density, hardness of the sintered compacts were determined as a function of weight per cent of fly ash particles. The sintered compacts composites were evaluated in terms of their chemical composition and structure by X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM). Aluminum-based composite materials have potential applications similar to those of pure aluminum in the field of constructions.

*Key words: MMCs, hardness, lignite fly ash, aluminum*

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα είναι το αναπόφευκτο παραπροϊόν της ελληνικής λιγνιτικής ηλεκτροπαραγωγής (Τσικός 2006) με την ετήσια παραγωγή τους να φθάνει τα 13 εκατομμύρια τόνους και τη μετέπειτα αξιοποίησή τους να μην ξεπερνά τα επίπεδα του 15% και να αφορά αποκλειστικά τη τσιμεντοβιομηχανία. Στις ελληνικές τέφρες, ειδικά στις έντονα ασβεστούχες της Πτολεμαΐδας και της Καρδιάς (Class C κατά ASTM C 618) κυριαρχούν ενώσεις όπως:  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  (Τσίμας 2005).

Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites, MMCs) ονομάζονται τα μηχανικά παρασκευασμένα υλικά τα οποία προέρχονται από το συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών, ένα εκ των οποίων είναι μέταλλο. Ως αποτέλεσμα του συνδυασμού αυτού τα σύνθετα υλικά αποκτούν ενισχυμένες ιδιότητες σε σχέση με τα καθαρά μέταλλα. Παραδείγματος χάριν, εμφανίζουν μεγαλύτερες αντοχές και δυσκαμψία (ως συνάρτηση της πυκνότητάς τους), υψηλότερη αντίσταση σε φθορά κοπώσεως και λειτουργικότερη συμπεριφορά σε περιοχές υψηλών θερμοκρασιών (χαμηλότερος λόγος ερπυσμού και συντελεστής θερμικής διαστολής). Μάλιστα, όπως έχει προκύψει από πληθώρα μελετών, η πλήρωση μεταλλικής μήτρας αλουμινίου με λεπτόκοκκο κεραμικό υλικό (π.χ. ιπτάμενη τέφρα), οδηγεί σε ισχυρή αύξηση της αντίστασης των υλικών στη διάβρωση, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση τους σε μεγάλες δομικές κατασκευές (Καραγιάννης 2006, Rajan 2007, Sudarshan 2008). Παρόλα τα συγκριτικά πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα καθαρά μέταλλα, η χρήση των συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας περιορίζεται, εν μέρει, από το υψηλό κόστος κατασκευής τους. Ανάμεσα, όμως, στα διάφορα υλικά πλήρωσης της μήτρας τα οποία έχουν, κατά καιρούς, χρησιμοποιηθεί, μακράν το φθηνότερο είναι η ιπτάμενη τέφρα των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Sudarshan 2008). Εκτός από τα μεγάλα δομικά έργα, τα σύνθετα υλικά του αλουμινίου παρουσιάζουν εκτεταμένη αξιοποίηση τόσο στην αυτοκινητοβιομηχανία όσο και στον ευρύτερο ηλεκτρο-μηχανολογικό βιομηχανικό τομέα ως: περιβλήματα (κιβωτίου, διαφορικού, δρομέα στροβίλου), πτυχωτά καλύμματα αρμών, υλικά στροφείων μηχανής, κορμών κινητήρα εσωτερικής καύσης, «πολλαπλών» εισαγωγής-εξαγωγής βενζίνης, τροχαλιών κ.α. (Rohatgi 1998, Matsunaga 2002, Wu 2006, Ammar 2008, Feng 2008)

## 2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1 *Ιπτάμενες Τέφρες*

Οι ιπτάμενες τέφρες συλλέχθηκαν από τα Ηλεκτροστατικά Φίλτρα των ΑΗΣ Καρδιάς και Μεγαλόπολης προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των διαφορετικών συστατικών τους στις διαδικασίες της πυροσυσσωμάτωσης και της ανάπτυξης των μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών Al/ και Al/Si/ιπτάμενων τεφρών. Η χημική σύσταση των τεφρών προσδιορίστηκε με τη χρήση της μεθόδου Φθορισμού Ακτινών-X (XRF), η ορυκτολογική τους σύσταση με τη χρήση της μεθόδου Περίθλασης Ακτινών-X (XRD) και η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων τους με χρήση αναλυτή μεγέθους σωματιδίων (Malvern).

### 2.2 *Παραγωγή και χαρακτηρισμός των συνθέτων υλικών*

Ως υλικά μήτρας επιλέχθηκαν: Al 99.5% και Al/Si (88%/12%) σε μορφή σκόνης. Προετοιμάστηκαν μίγματα Al- και Al/Si-ιπτάμενων τεφρών και μορφοποιήθηκαν με τη μέθοδο της Κρύας Μονοαξονικής Συμπίεσης (CMP) (συνδετικό υλικό: λάδι). Βασικά, για κάθε είδος μεταλλικής μήτρας και τέφρας παρασκευάστηκαν δύο διαφορετικές σειρές συνθέτων υλικών: μία με ιπτάμενη τέφρα "ως έχει" και μία με ιπτάμενη τέφρα αλεσμένη σε κόκκους διαμέτρου <56μm. Για κάθε ξεχωριστό συνδυασμό μήτρας- είδος τέφρας - κοκκομετρίας παρασκευάστηκαν 6 δοκίμια, συνεπώς κατασκευάστηκαν συνολικά 144 δοκίμια συνθέτων υλικών. Στη συνέχεια, τα υλικά εξετάστηκαν σε σχέση με τη θερμική τους συμπεριφορά με τη χρήση της μεθόδου Διαφορικής Θερμιδομετρικής Ανίχνευσης (DSC) σε ατμόσφαιρα αζώτου στο εύρος θερμοκρασιών 0-700°C. Ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ορίστηκε σε 10°C/λεπτό. Κατόπιν, τα υλικά υπέστησαν έψηση (για 2 και 6 ώρες) στους 600°C (μήτρα Al) και 520°C (μήτρα Al/Si) σε αδρανή ατμόσφαιρα, υπό σταθερή ροή αζώτου. Οι θερμοκρασίες επιλέχθηκαν από τα νομογραφήματα της DSC. Μετά την πυροσυσσωμάτωση τα υλικά χαρακτηρίστηκαν σε σχέση τη χημική (XRF) και ορυκτολογική τους σύσταση (XRD). Επίσης, η δομή τους μελετήθηκε με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (EDAX/SEM). Στη συνέχεια τα δοκίμια υπέστησαν δοκιμές για τον προσδιορισμό της σκληρότητάς τους με τη μέθοδο Vickers (VHN). Έλαβαν χώρα πέντε (5) διαφορετικές μετρήσεις για κάθε δοκίμιο και το τελικό αποτέλεσμα συνιστά το μέσο όρο τους. Οι αλλαγές στην πυκνότητα των υλικών που προέκυψαν κατά την πυροσυσσωμάτωση προσδιορίστηκαν με θεωρητικό υπολογισμό της πυκνότητας κατόπιν μετρήσεων των διαστάσεών τους.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 2.3 *Ιπτάμενες Τέφρες*

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τη χημική σύσταση των ιπτάμενων τεφρών που χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά πλήρωσης. Όπως αναμένονταν, οι διαφορές στα σημαντικά χημικά χαρακτηριστικά μεταξύ των δύο τεφρών είναι προφανείς. Στην ΙΤΚ το οξείδιο του ασβεστίου κυριαρχεί καθώς καλύπτει περίπου το 35% της χημικής σύστασης του υλικού. Αντιθέτως, η ΙΤΜ είναι έντονα πυριτική καθώς σχεδόν κατά το ήμισυ αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου. Ο Πίνακας 2 περιλαμβάνει τις κύριες ορυκτολογικές φάσεις που ανιχνεύθηκαν στις δύο ιπτάμενες τέφρες. Όσον αφορά την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων των ιπτάμενων τεφρών, αυτή προσδιορίστηκε για τις τέφρες τόσο «ως έχουν» όσο και αλεσμένες. Για την «ως έχει» ΙΤΜ τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα μισά σωματίδια της είναι <23.5μm ενώ το 90% αυτών έχει διάμετρο μικρότερη των 100μm. Τα μισά σωματίδια της αλεσμένης ΙΤΜ έχουν διάμετρο μικρότερη από 19.8μm και το 90% από αυτά μικρότερη από 50μm. Αναφορικά με την «ως έχει» ΙΤΚ το 50% των σωματιδίων της βρίσκεται

κάτω από 13.9 $\mu\text{m}$  και το 90% κάτω από 110 $\mu\text{m}$ . Μετά την άλεση το 90% των σωματιδίων απέκτησε διάμετρο μικρότερη από 47 $\mu\text{m}$ .

Πίνακας 1. Χημική Σύσταση (%) των ιπτάμενων τεφρών Καρδιάς και Μεγαλόπολης

Ένωση	ITK	ITM
SiO <sub>2</sub>	30.1	49.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.9	19.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.10	8.44
CaO	34.5	11.8
Na <sub>2</sub> O	1.01	0.53
K <sub>2</sub> O	0.40	1.81
MgO	2.69	2.27
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.34	0.37
TiO <sub>2</sub>	0.60	1.35
SO <sub>3</sub>	6.28	2.91
MnO	0.07	0.14
LOI	3.95	1.67

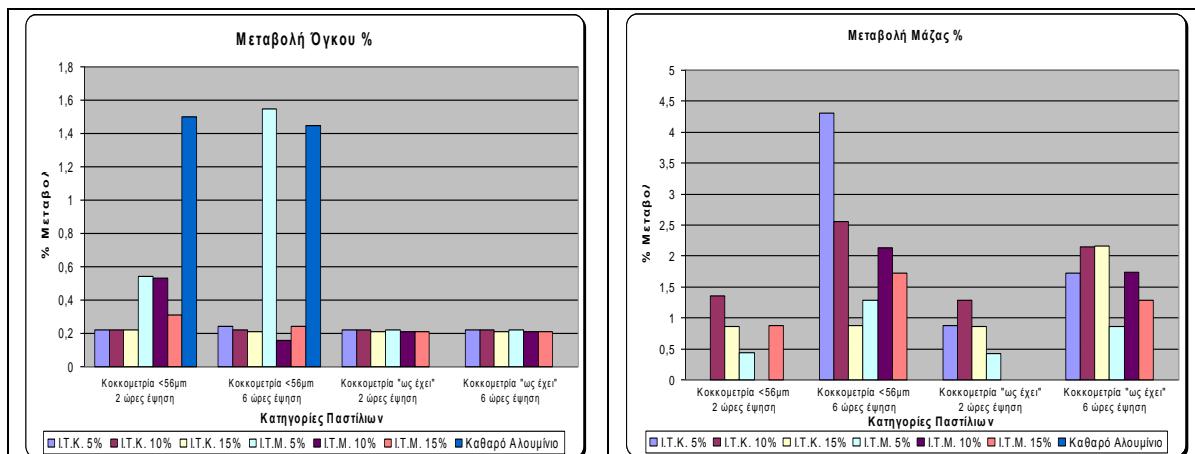
Πίνακας 2. Ορυκτολογική Σύσταση (%) των ιπτάμενων τεφρών Καρδιάς και Μεγαλόπολης

Ορυκτολογική Φάση	ITK	ITM
Ασβεστίτης	++	+
Ανυδρίτης	+	-
Χαλαζίας	+	++
Άστριοι	+	+
Γελενίτης	+	+
Άσβεστος	++	-
Θειικό		+
Ασβέστιο	-	

\* ++ : έντονη παρουσία, + : παρουσία, - : απουσία

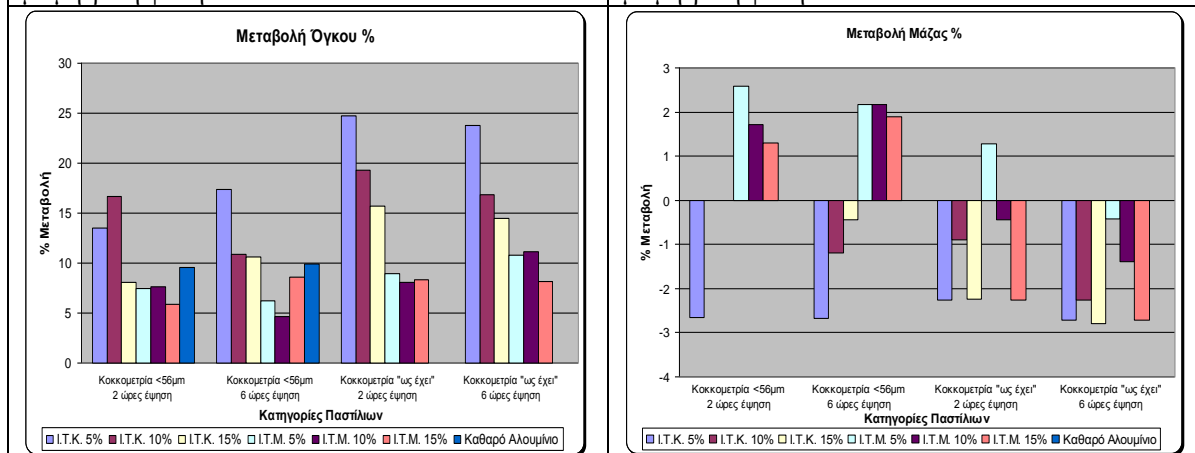
#### 2.4 Παραγωγή των συνθέτων υλικών

Οι εξωτερικές διαφορές μεταξύ των υλικών ήταν εμφανείς και αφορούσαν στην ομαλότητα της επιφάνειας και στη διασπορά της τέφρας στο «σώμα» του υλικού που ήταν καλύτερες στα δοκίμια αλεσμένης τέφρας. Κατά τη μέτρηση της μάζας και των διαστάσεων των 2- και 6-ωρων ψημένων δοκιμίων με μητρική φάση αλουμίνιο δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές. Συμπεραίνεται συνεπώς ότι δεν υπήρξε ρόφηση ή αντίδραση οξυγόνου με τα δείγματα. Όσον αφορά τη μεταβολή των διαστάσεών τους, η αύξηση του όγκου οφείλεται στην επιφανειακή οξείδωση των κόκκων κατά την ανταλλαγή οξυγόνου μεταξύ των οξειδίων της τέφρας και του αλουμινίου υπό το σχηματισμό αλούμινας, καθώς αυτή καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο από τα προηγούμενα δύο υλικά. Αναφορικά με τα υλικά μητρικής φάσης Al/Si, συγκρίνοντας τη μάζα τους πριν και μετά την έψηση, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αύξηση στα δοκίμια τα οποία περιείχαν ITM. Επίσης, η αύξηση της διαμέτρου και του ύψους των δοκιμίων είναι αρκετά μεγάλη συγκριτικά με την αντίστοιχη των δοκιμίων του αλουμινίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη καύση του συνδετικού υλικού και την περαιτέρω διόγκωση. Παράλληλα, ανοίγονται διάδρομοι εξόδου των ατμών αυξάνοντας το πορώδες των δοκιμίων, γεγονός ζημιογόνο για την αντοχή των συνθέτων υλικών. Εκτός αυτού, στην επιφάνεια όλων των δοκιμίων τα οποία περιείχαν ITK παρατηρήθηκαν σφαιρικά συσσωματώματα τα οποία αποκολλούνταν με την εφαρμογή μικρής επιφανειακής δύναμης. Η πιθανότερη εξήγηση του γεγονότος αυτού αφορά στην έντονα ασβεστούχο φύση της ιπτάμενης τέφρας της Καρδιάς η οποία χαμηλώνει το σημείο τήξης των συνθέτων. Τα Διαγράμματα 1-4 απεικονίζουν την ποσοστιαία μεταβολή μάζας και όγκου των παρασκευασθέντων υλικών ως συνάρτηση του είδους του υλικού πλήρωσης και των ωρών της πυροσυσσωμάτωσης.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή Όγκου (%) των συνθέτων με μητρική φάση Al

Διάγραμμα 2. Μεταβολή Μάζας (%) των συνθέτων με μητρική φάση Al



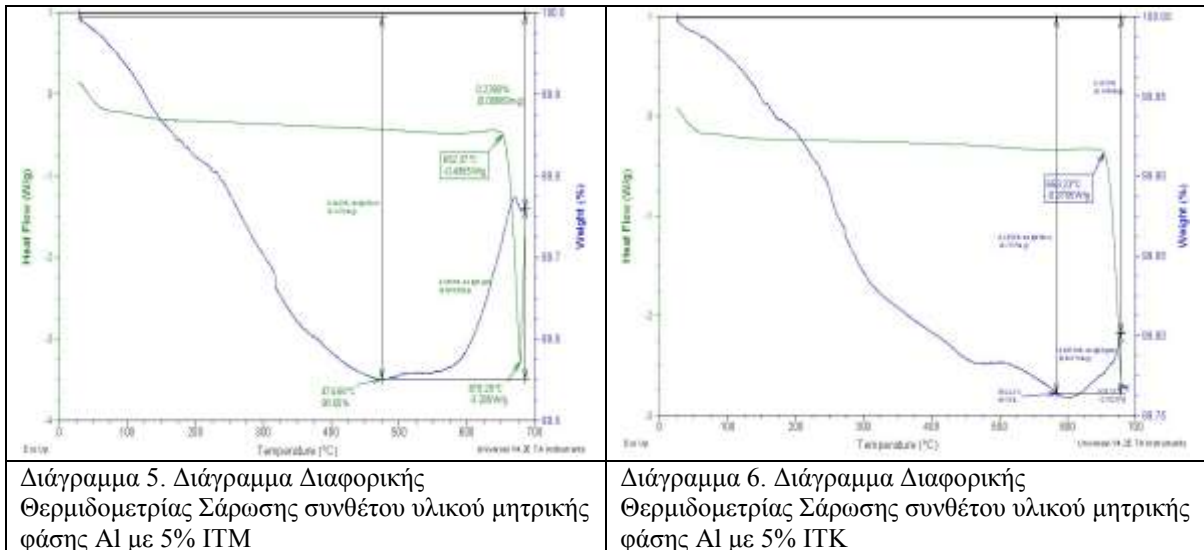
Διάγραμμα 3. Μεταβολή Όγκου (%) των συνθέτων με μητρική φάση Al/Si

Διάγραμμα 4. Μεταβολή Μάζας (%) των συνθέτων με μητρική φάση Al/Si

## 2.5 Χαρακτηρισμός των συνθέτων υλικών

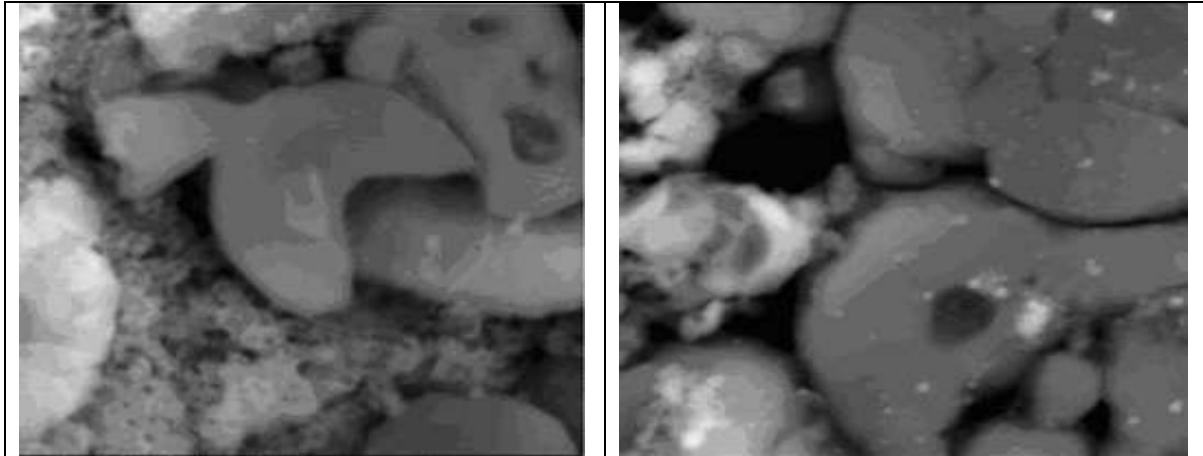
Τα Διαγράμματα 5 και 6 περιγράφουν τη θερμική συμπεριφορά των συνθέτων υλικών μητρικής φάσης αλουμινίου και υλικού πλήρωσης ΙΤΚ και ΙΤΜ, όπως αυτή προσδιορίστηκε με τη Διαφορική Θερμιδομετρική Ανίχνευση. Η καμπύλη πράσινου χρώματος συμβολίζει τη ροή θερμότητας δια μέσου του δείγματος. Στο Διάγραμμα 5, στους 652.37°C παρατηρείται απότομη πτώση της καμπύλης και αποδίδεται στην αλλαγή φάσης του δείγματος. Το σημείο τήξης, δηλαδή, του συνθέτου υλικού είναι κατά περίπου 8°C χαμηλότερο σε σχέση με αυτό του καθαρού αλουμινίου. Η καμπύλη αυτή παρουσιάζει ελάχιστο στους 678°C. Η μπλε καμπύλη απεικονίζει τη μεταβολή της μάζας του δείγματος. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή μείωση βάρους μέχρι τους 475°C όπου λαμβάνει χώρα η καύση του άκαυστου άνθρακα της τέφρας. Από το θερμοκρασιακό αυτό σημείο και έπειτα η μάζα αυξάνεται, γεγονός που υποδεικνύει την περαιτέρω αλλαγή φάσεων. Στο Διάγραμμα 6, παρατηρώντας την πορεία της πράσινης καμπύλης, συμπεραίνεται ότι το σημείο τήξης του υλικού βρίσκεται στους 653°C, ήτοι 7°C κάτω από αυτό του καθαρού αλουμινίου. Επίσης, η καμπύλη αυτή ελαχιστοποιείται στους 678°C, ομοίως με την περίπτωση του συνθέτου υλικού Al/ITK. Εξάγεται, συνεπώς, το συμπέρασμα ότι το είδος της ιπτάμενης τέφρας (όταν αυτή παρενρίζεται σε χαμηλά ποσοστά στα υλικά) δεν επηρεάζει τη θερμική αγωγιμότητα των συνθέτων. Αντιθέτως, η απώλεια βάρους στα σύνθετα Al/ITM είναι σημαντικά μικρότερη από ότι στα σύνθετα Al/ITK. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 450°C λαμβάνει χώρα η διάσπαση των

ανθρακικών της ιπτάμενης τέφρας της Καρδιάς, ενώ άνω των 600°C η μάζα του δείγματος αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που αποδίδεται στις αλλαγές φάσεων που συντελούνται στην ιπτάμενη τέφρα της περιοχής της Καρδιάς.



Οι Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζουν τις κύριες ορυκτολογικές φάσεις που ανιχνεύτηκαν στα σύνθετα υλικά AI-ITK και AI-ITM. Το μεταλλικό αλουμίνιο κυριαρχεί στα υλικά ανεξαρτήτου είδους τέφρας, ενώ και ο χαλαζίας ανιχνεύεται και στα δύο είδη των υλικών. Οι υπόλοιπες κρυσταλλικές φάσεις ποικίλουν, εξαρτώμενες κυρίως από τη χημική και ορυκτολογική σύσταση των ιπτάμενων τεφρών καθώς και από τις πειραματικές συνθήκες κάτω από τις οποίες παρασκευάστηκαν τα υλικά. Στην Εικόνα 1 παρατίθενται επιλεγμένες φωτογραφίες από τα σύνθετα υλικά AI /ITK. Οι φάσεις που ξεχωρίζουν και στις δύο φωτογραφίες είναι προφανώς οι νέες κρυσταλλικές φάσεις οι οποίες ανιχνεύτηκαν με τη μέθοδο της Περίθλασης Ακτινών-X και αναπτύσσονται γύρω από ένα σωματίδιο τέφρας ως λεπτά υμένια. Οι φωτογραφίες απεικονίζουν επίσης τα όρια των κόκκων της τέφρας και ελήφθησαν προκειμένου να ελεγχθεί η προσκόλλησή τους στα σωματίδια του αλουμινίου. Εκτός αυτού, οι φωτογραφίες SEM και ο έλεγχος SEM/EDAX κατέδειξαν ότι, ειδικά στην περίπτωση της ιπτάμενης τέφρας της Μεγαλόπολης, η διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης έλαβε χώρα χωρίς παρεμπόδιση.

Τα Διαγράμματα 7 και 8 παρουσιάζουν τη διαφοροποίηση της επιφανειακής σκληρότητας των παρασκευασθέντων υλικών ως συνάρτηση του είδους της ιπτάμενης τέφρας και των ωρών της πυροσυσσωμάτωσης. Καταρχάς πρέπει να τονισθεί ότι τα δοκίμια εμφάνισαν υψηλότερες τιμές σκληρότητας από αυτές του καθαρού αλουμινίου. Γενικά, τα σύνθετα με υλικό πλήρωσης ITK ανέπτυξαν μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στις πυριτικές και άσβεστο-πυριτικές φάσεις που ανιχνεύτηκαν σε αυτά τα υλικά. Η παρουσία των ενώσεων αυτών, σε συνδυασμό με την ταπείνωση του σημείου τήξεως των υλικών, έχει ασφαλώς θετική επίδραση στις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί ότι όσο μεγαλύτερο ήταν το ποσοστό συμμετοχής των ιπτάμενων τεφρών, τόσο σκληρότερη ήταν και η επιφάνεια των υλικών.



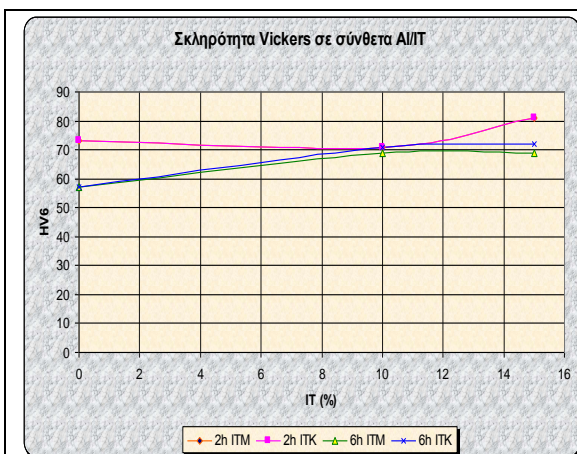
Εικόνα 1. Φωτογραφίες SEM συνθέτου υλικού μεταλλικής μήτρας Al με αλεσμένη ΙΤΚ

Πίνακας 3. Ορυκτολογικές φάσεις συνθέτων υλικών Al-ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης

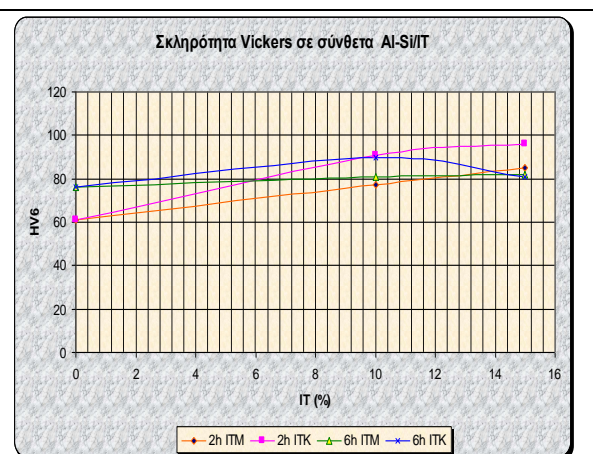
Ωρες έψησης	2	6	2	2
Ορυκτ. φάση	Al-5% ITM	Al-5% ITM	Al-10% ITM	Al-15% ITM
Al	++	++	++	++
SiO <sub>2</sub>	+	+	+	+
Si <sub>64</sub> O <sub>128</sub>	-	-	-	-

Πίνακας 4. Ορυκτολογικές φάσεις συνθέτων υλικών Al-ιπτάμενης τέφρας Καρδιάς

Ωρες έψησης	2	6	2	2
Ορυκτ. φάση	Al-5% ITK	Al-5% ITK	Al-10% ITK	Al-15% ITK
Al	+	+	+	+
SiO <sub>2</sub>	+	+	+	+
CaO	+	+	+	+
Ca <sub>46</sub> (Al <sub>92</sub> Si <sub>100</sub> O <sub>384</sub> )	-	-	+	+
Ca <sub>23.20</sub> Mg <sub>22.4</sub> (Al <sub>92</sub> Si <sub>100</sub> O <sub>384</sub> )	-	-	-	+
Al <sub>1.31</sub> (Al <sub>1.87</sub> Si <sub>9.61</sub> O <sub>24</sub> ) <sub>0.93</sub>	-	-	-	+



Διάγραμμα 7. Σκληρότητα (Vickers) των συνθέτων μητρικής φάσης αλουμινίου - τέφρας



Διάγραμμα 8. Σκληρότητα (Vickers) των συνθέτων μητρικής φάσης αλουμινίου/πυριτίου - τέφρας

### 3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της διενεργηθείσας έρευνας συνοψίζονται ως εξής:

- Τα δοκίμια με αλεσμένη τέφρα παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά τόσο κατά την συμπίεση όσο και κατά την έψηση, όσον αφορά τις τελικές τους διαστάσεις, τον όγκο και συνεπώς το πορώδες τους
- Χρειάζεται να βρεθεί αποτελεσματικότερο συνδετικό υλικό για τα δοκίμια μήτρας Al/Si
- Αναφορικά με τα υλικά μήτρας καθαρού αλουμινίου, τα δείγματα που έδειξαν τόσο την καλύτερη συμπεριφορά κατεργασίας όσο και τις πιο ελκυστικές ιδιότητες, είναι αυτά με ποσοστιαία συμμετοχή ιπτάμενης τέφρας Καρδιάς 15%
- Τα σύνθετα υλικά Al- και Al/Si-τέφρας που υπέστησαν δίωρη πυροσυσσωμάτωση τείνουν να εμφανίσουν καλύτερες αντοχές από τα αντίστοιχα εξάωρα

### 4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ammar, H.R. Samuel, A.M. Samuel, F.H. 2008. Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum–silicon casting alloys. *International Journal of Fatigue*, 30: 1024–1035

Annual Book of ASTM Standards, C618-03

Feng, Y.C., Geng, L., Zheng, P.Q., Zheng, Z.Z., Wang, G.S. 2008. Fabrication and characteristic of Al- based hybrid composite reinforced with tungsten oxide particle and aluminum borate whisker by squeeze casting, *Materials and Design*, 29: 2023–2026

Ίτσκος Σ, Ίτσκος Γ.Σ. 2006. Εξοικονόμηση ενέργειας και ορυκτών πόρων από τον εξορθολογισμό της προμήθειας λιγνίτη και τη διερεύνηση αξιοποίησης της τέφρας του. *Πρακτικά Ημερίδας Εξοικονόμησης Ενέργειας, Ακαδημία Αθηνών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Νοέμβριος 2006, Αθήνα, Ελλάδα.

Karayiannis, V.G. and Moutsatsou, A.K. 2006. Fabrication of MMCs from metal and alloy powders produced from scrap. *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 2: 295-300

Matsunaga, T, Kim, J.K., Hardcastle, S. Rohatgi, P.K. 2002. Crystallinity and selected properties of fly ash particles, *Materials Science and Engineering A*, 325: 333-343

Rajan, T.P.D., Pillai, R.M., Pai, B.C., Satyanarayana, K.G. Rohatgi, P.K. 2007. Fabrication and characterization of Al–7Si–0.35Mg/fly ash metal matrix composites processed by different stir casting routes. *Composites Science and Technology*, 67: 3369–3377

Rohatgi, P.K., Guo, R.Q., Iksan, H., Borchelt, E.J., Asthana, R. 1998. Pressure infiltration technique for synthesis of aluminum-fly ash particulate composite. *Materials Science and Engineering A*, 244: 22-30

Sudarshan, Surappa, M.K. 2008a. Dry sliding wear of fly ash particle reinforced A356 Al composites, *Wear*, 265: 349-360

Sudarshan, Surappa, M.K. 2008b. Synthesis of fly ash particle reinforced A356 Al composites and their characterization, *Materials Science and Engineering A*, 480: 117-124

Tsimas, S., Moutsatsou-Tsima, A. 2005. High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives, *Cement & Concrete Composites*, 27: 231–237

Wu, G.H., Dou, Z.Y., Jiang, L.T., Cao, J.H. 2006. Damping properties of aluminum matrix–fly ash composites. *Materials Letters*, 2945–2948