

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΛΑΦΡΟΑΔΡΑΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΥΣΗΣ ΛΙΓΝΙΤΗ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Ι.Μ. Αναγνωστόπουλος, Β.Ε. Στιβανάκης*, Δ.Κ. Παπαμαντέλλος, Γ.Ν. Αγγελόπουλος
*Εργαστήρια «Μεταλλογνωσίας» και «Υλικών και Μεταλλουργίας», Τμήμα Χημικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504 Ρίο, *vstivanakis@chemeng.upatras.gr*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Οι ενεργειακοί σταθμοί της Μεγαλόπολης παράγουν μεγάλες ποσότητες στερεών παραπροϊόντων, όπως ιπτάμενη τέφρα και τέφρα πυθμένα, τα οποία σήμερα αγγίζουν τα 4εκατ. τόνους/έτος. Η παραγωγή αυτή δημιουργεί την ανάγκη για άμεση αξιοποίησή τους σε διάφορους τομείς και εφαρμογές για περιβαλλοντικούς αλλά και οικονομικούς λόγους. Σήμερα αξιοποιείται περίπου το 7,5% της παραγωγής της ιπτάμενης τέφρας, σαν πρόσθετο στη παραγωγή τσιμέντου Portland Ελληνικού τύπου. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποκλείει της απορρόφηση της τέφρας πυθμένα εξ' αιτίας του υψηλού ποσοστού άνθρακα που περιέχει (~10%κβ). Η κατεύθυνση αξιοποίησης που διερευνάται, αφορά στην παραγωγή ελαφροαδρανών υλικών. Η διεργασία που μελετάται συνίσταται σε πρώτο στάδιο στην πελλετοποίηση των κόνεων και στην συνέχεια στην πυροσυσσωμάτωση τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα τελικά προϊόντα εμφανίζουν καλές φυσικές ιδιότητες και υψηλές αντοχές για την πιθανή χρήση τους ως δομικά και θερμομονωτικά υλικά.

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, τέφρα πυθμένα, πυροσυσσωμάτωση, ελαφρόπετρα

LIGHTWEIGHT AGGREGATES PRODUCTION FROM MEGALOPOLIS LIGNITE COMBUSTION BY-PRODUCTS

I.M. Anagnostopoulos, V.E. Stivanakis*, D.K. Papamantellos, G.N. Angelopoulos
*Laboratory of "Materials and Metallurgy", Dept. of Chemical Engineering, University of Patras,
26504, Rio, *vstivanakis@chemeng.upatras.gr*

ABSTRACT: The power plant of Megalopolis (Peloponnesus, Greece) has two main solid byproducts (fly ash and bottom ash) with total production 4 Mt/year. Thus, their utilization (mainly in construction industries) is necessary. Today only 7.5% of the total Megalopolis fly ash is used as additive in cement industry to produce Greek type Portland cement. The use of bottom ash in this process is impossible because of its high carbon content (10%). In this research, production of lightweight aggregates using mixtures of bottom and fly ash is investigated. As a result, substitution of significant amount of natural lightweight aggregates is possible with economical and environmental advantages. The experimental work includes pelletizing of mixtures of bottom and fly ash, and sintering of the pellets in high temperature. The final products of this process have technological properties similar to these of natural lightweight aggregates (porosity, bulk density, thermal conductivity).

Keywords: fly ash, bottom ash, sintering, lightweight aggregate

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην χώρα μας η συνολική παραγωγή (800.000 τόνους/έτος) φυσικών ελαφροαδρανών από την Νήσο Γυαλί (Δωδεκάνησα) θεωρείται προσωρινά επαρκής για τις εγχώριες ανάγκες και επιτρέπει μικρές εξαγωγές. Παρόλα αυτά η εξόρυξή τους παρουσιάζει προβλήματα εξαιτίας των αρχαιολογικών ευρημάτων που εντοπίζονται στο νησί αλλά και της καταστροφής που προκαλεί η εξόρυξή της στη φυσική ομορφιά του νησιού.

Σήμερα τα ελαφροαδρανή υλικά βρίσκουν όλοένα και περισσότερες εφαρμογές είτε ως δομικό και θερμομονωτικό υλικό είτε ως υπόστρωμα κήπων, γεγονός που δημιουργεί συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις.

Η παραγωγή τεχνητών ελαφροαδρανών μπορεί να συνεισφέρει στην επίλυση του προβλήματος. Η Ιπτάμενη Τέφρα (ΙΤ) και η Τέφρα Πυθμένα (ΤΠ) που είναι παραπροϊόντα των λιγνιτικών σταθμών της Μεγαλόπολης (Πελοπόννησος) και τα οποία παράγονται σε μεγάλες ποσότητες μπορούν να αποτελέσουν την α' ύλη για αυτή την διεργασία. Επιπλέον η αξιοποίησή τους είναι επιτακτική για περιβαλλοντικούς αλλά και οικονομικούς λόγους. Η παραγόμενη ποσότητα των παραπροϊόντων αυτών αγγίζει τα 4 εκ. τόνους ετησίως και μόνο το 7.5% της παραγόμενης ΙΤ χρησιμοποιείται για την παραγωγή τσιμέντου Portland Ελληνικού Τύπου, ενώ καμία ποσότητα ΤΠ δεν χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες δομικών υλικών εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.

Η παρούσα μελέτη βασίζεται στην πυροσυσσωμάτωση (sintering) μιγμάτων αυτών των υλικών κατά την οποία ο περιεχόμενος άνθρακας της ΤΠ θα αποτελέσει το απαιτούμενο καύσιμο για την ολοκλήρωση της διεργασίας με σκοπό την παραγωγή πορώδους αδρανούς υλικού. Η ΙΤ θα χρησιμοποιηθεί στην διεργασία με στόχο να υπάρξει συνολική απορρόφηση των στερεών παραπροϊόντων της λιγνιτικής καύσης.

Οι κύριες μεταβλητές που ρυθμίζουν τις διεργασίες πυροσυσσωμάτωσης είναι:

- Η χημική και ορυκτολογική σύσταση των α' υλών
- Η υγρασία και το στερεό καύσιμο που συμπεριλαμβάνεται στις α' ύλες
- Η διαπερατότητα και το ύψος της σχηματιζόμενης κλίνης, και
- Η ταχύτητα του αέρα

Στα πειράματά μας η διεργασία εφαρμόστηκε για την παραγωγή ελαφροαδρανών υλικών από μίγματα ΙΤ, ΤΠ και μικρής ποσότητας μεταλλουργικού ασβέστη.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Οκτώ μίγματα διαφορετικής αναλογίας ΙΤ/ΤΠ πυροσυσσωματώθηκαν και τα προϊόντα τους χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή σκυροδέματος με τσιμέντα Portland. Στα δοκίμια του σκυροδέματος μετρήθηκε η θερμική τους αγωγιμότητα σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες προκειμένου να καταγραφεί η θερμική τους συμπεριφορά και να γίνει σύγκριση με τα φυσικά ελαφροαδρανή.

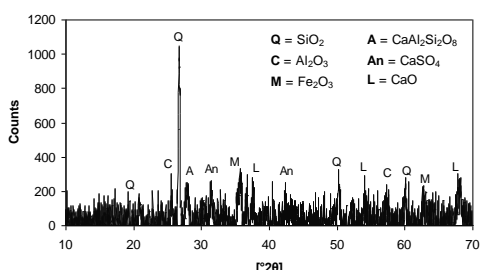
Στα μίγματα αυτά ελήφθη υπό όψη ότι η περιεκτικότητα της ΤΠ σε στερεό άνθρακα αγγίζει το 10% (κ.β επί ξηρού) ενώ της ΙΤ είναι 1,31%. Η υγρασία και οι πτητικές ενώσεις της ΤΠ ισοδυναμούν περίπου με το 40% του βάρους της ενώ η ΙΤ βρίσκεται σε σχεδόν ξηρή κατάσταση (3% υγρασία).

Η αναλυτική σύσταση των υλικών αυτών φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 1.

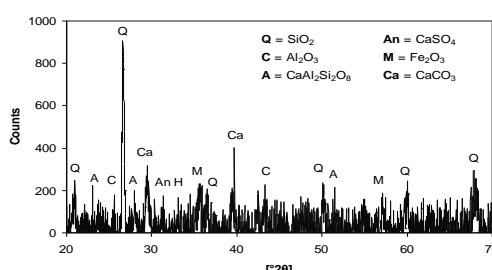
Πίνακας 1. Χημική σύσταση ξηρής ΙΤ και ΤΠ (κβ %)

ΕΝΩΣΗ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	C	Σύνολο
ΙΤ	49.4	22.65	7.42	8.85	1.62	0.85	1.39	2.55	1.31	96.04
ΤΠ	44.6	19.93	6.28	7.51	1.43	0.75	1.22	2.24	10.1	94.1

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις της ΙΤ και ΤΠ εμφανίζουν τις εξής φάσεις: quartz, anhydrite, plagioclase, hematite, mulite and gehlenite (Michailidis 1996, Stivanakis 2003), όπως φαίνονται στις Εικόνες 1 και 2.

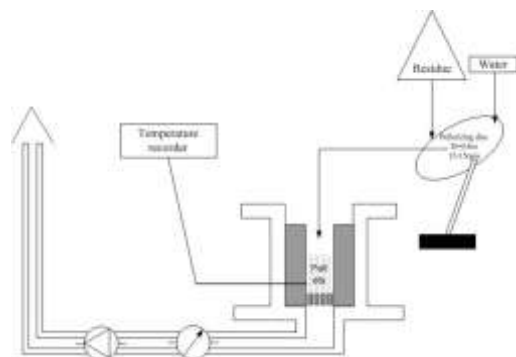


Εικόνα 1. Ορυκτολογική ανάλυση ΙΤ



Εικόνα 2. Ορυκτολογική ανάλυση ΤΠ

Οι δοκιμές πυροσυσσώματωσης πραγματοποιήθηκαν σε συσκευή που αποτελείται από κάδο εσχάρας επιφάνειας 0,04m² και δίσκο σφαιροποίησης διαμέτρου 0.4m. Η συσκευή αυτή είναι εγκατεστημένη στο εργοστάσιο του ΤΙΤΑΝ στο Δρέπανο και φαίνεται διαγραμματικά στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3. Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής εγκατάστασης σφαιροποίησης & πυροσυσσώματωσης

Στην διεργασία οι α' ύλες (μίγματα) αναμίχθηκαν και σφαιροποιήθηκαν (πελλετοποίηση) στον υπό κλίση περιστρεφόμενο δίσκο σε πελλέτες διαμέτρου 4-10mm. Έπειτα τοποθετήθηκαν στον κάδο πυροσυσσώματωσης σχηματίζοντας μια διαπερατή, από τον αέρα, κλίνη. Στον πυθμένα του κάδου είναι εγκατεστημένη σχάρα που επιτρέπει την διέλευση του αέρα και η οποία συνδέεται με μυζητήρα. Ο μυζητήρας ρουφάει τον αέρα από τον πυθμένα του κάδου δημιουργώντας συνθήκες υποπίεσης στην κλίνη. Η δημιουργούμενη υποπίεση μετατοπίζει τη ζώνη καύσης από την κορυφή στον πυθμένα του κάδου (κλίνης). Η πυροσυσσώματωση διαρκεί περίπου 10-15min και αναπτύσσονται θερμοκρασίες 1100-1250°C.

Τα μίγματα προετοιμάστηκαν με διαφορετικές αναλογίες ΤΠ και ΙΤ και σταθερό ποσοστό ασβέστη, με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη αναλογία τους σχετικά με τις αποκτώμενες φυσικές και θερμικές ιδιότητες των πυροσυσσωμάτων. Στον Πίνακα 2 φαίνονται αναλυτικά οι αναλογίες των μιγμάτων που πυροσυσσωματώθηκαν.

Πίνακας 2. Αναλογίες (% κ.β.) μιγμάτων πυροσυσσωμάτωσης

Μίγμα	Σ11	Σ12	Σ13	Σ14	Σ15	Σ16	Σ17	Σ18
ΤΠ	35	55	65	70	75	80	85	90
ΙΤ	62	42	32	27	22	17	12	7
Ασβέστης	3	3	3	3	3	3	3	3

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις

Τα προϊόντα της πυροσυσσωμάτωσης χαρακτηρίστηκαν από χημική και ορυκτολογική άποψη. Οι χημικές αναλύσεις των προϊόντων πραγματοποιήθηκαν βάση της μεθόδου ατομικής απορρόφησης. Η χημική τους σύσταση φαίνεται στον Πίνακα 3.

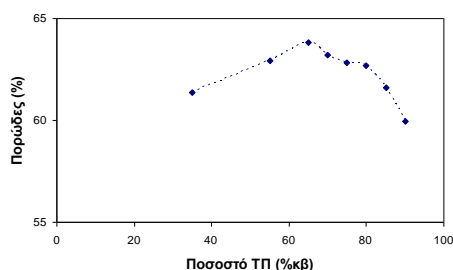
Πίνακας 3. Χημική σύσταση μιγμάτων (επί ξηρού κ.β.%)

Μίγμα	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	Σύνολο
Σ11	49.81	23.86	7.19	10.92	2.02	1.57	1.61	0.37	96.98
Σ12	51.28	24.18	7.01	13.04	1.75	1.36	0.78	0.6	100
Σ13	49.27	25.55	7.8	12.68	1.95	1.46	0.98	0.0	99.7
Σ14	50.1	26	6.3	13	2	1.8	0.8	0.0	100
Σ15	49.61	24.94	6.69	10.68	2.01	1.67	1.75	0.42	97.35
Σ16	51.45	23.2	8.41	12.68	1.81	1.36	0.45	0.32	99.7
Σ17	48.17	26.01	8.13	9.54	2.23	2	0.58	1.71	98.3
Σ18	49.77	23.06	6.63	10.85	1.97	1.73	1.51	0.87	97.52

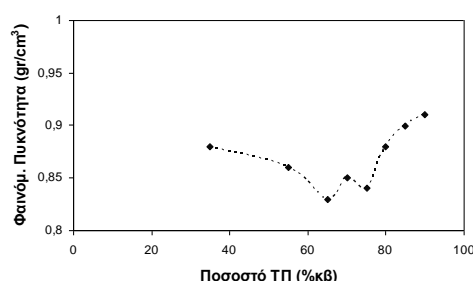
Οι ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της διάθλασης ακτίνων-Χ. Οι σημαντικότερες φάσεις που προκύπτουν για τα προϊόντα πυροσυσσωμάτωσης είναι οι εξής: Anorthite, Quartz, Cristobalite, Hematite, Maghemite και Calcium Aluminate.

Μετρήσεις τεχνολογικών ιδιοτήτων

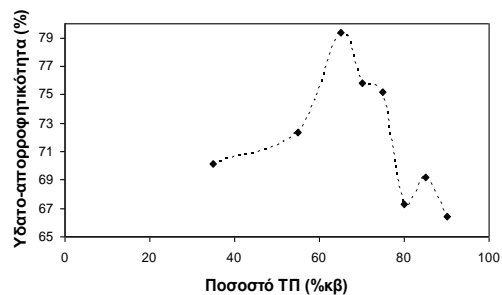
Στα προϊόντα της πυροσυσσωμάτωσης μετρήθηκαν φυσικές ιδιότητες όπως το πορώδες, η φαινόμενη πυκνότητα και η υδατοαπορροφητικότητα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στις παρακάτω Εικόνες.



Εικόνα 4. Πορώδες (%) προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης



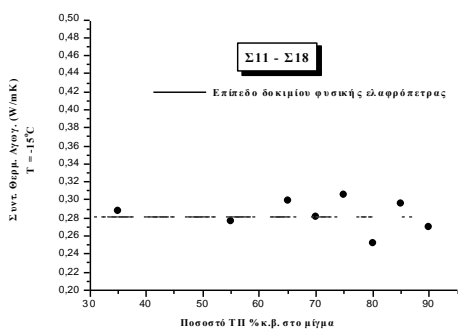
Εικόνα 5. Φαιν. πυκνότητα (gr/cm³) προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης



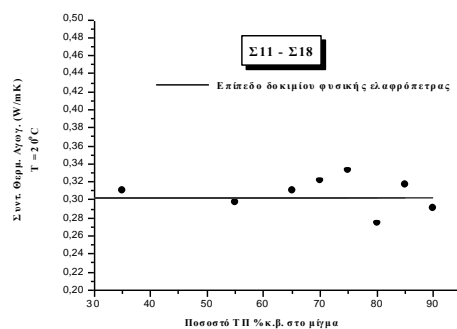
Εικόνα 6. Υδατοαπορροφητικότητα προϊόντων τυροσυσσωμάτωσης

Από τις Εικόνες 4, 5 και 6 προκύπτει ότι το πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα των προϊόντων κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα (59-63% & 65-75% αντίστοιχα) ενώ η πυκνότητά τους δεν ξεπέρασε τα $0,91 \text{ gr/cm}^3$. Η βέλτιστη αναλογία μιγμάτων (μέγιστες τιμές για τις δύο πρώτες ιδιότητες και η ελάχιστη για την τρίτη ιδιότητα) εμφανίζεται στην περιοχή γύρω από το 70% ΤΠ.

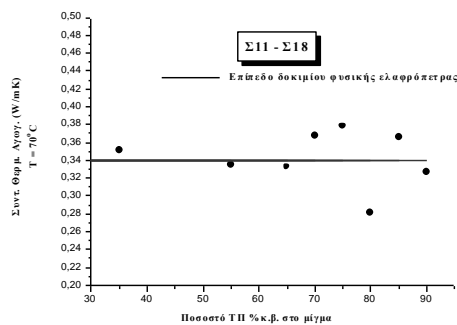
Οι μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια σκυροδέματος με τα παραγόμενα ελαφροαδρανή στις θερμοκρασίες -15 , 20 & 70°C . Τα δοκίμια σκυροδέματος τα οποία κατασκευάστηκαν έχουν διαστάσεις: $20 \times 20 \times 5 \text{ cm}$ και οι μετρήσεις του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν βάσει της μεθόδου θερμής πλάκας σε συσκευή FOX 200. Τα αποτελέσματα που φαίνονται στις Εικόνες 7, 8 & 9 αξιολογούνται ως ενθαρρυντικά.



Εικόνα 7. Συντελεστής θερμ. αγωγιμ. δοκιμίων με προϊόντα Σ11-Σ18 στους -15°C



Εικόνα 8. Συντελεστής θερμ. αγωγιμ. δοκιμίων με προϊόντα Σ11-Σ18 στους 20°C



Εικόνα 9. Συντελεστής θερμ. αγωγιμ. δοκιμίων με προϊόντα Σ11-Σ18 στους 70°C

Συγκεκριμένα φαίνεται ότι οι μέσες τιμές θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμών με προϊόντα Σ11-Σ18 στα παραπάνω διαγράμματα κινούνται στο επίπεδο της τιμής που εμφανίζει το δοκίμιο φυσικής ελαφρόπετρας. Ιδιαίτερα, τα πρώτα τρία δοκίμια Σ11-Σ13 εμφανίζουν σχεδόν ίδια αγωγιμότητα με την φυσική ελαφρόπετρα ενώ στα υπόλοιπα δείγματα εμφανίζεται μεγαλύτερη απόκλιση. Η απόκλιση αυτή οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι τα δοκίμια με Σ14-Σ18 περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άνθρακα (υψηλά ποσοστά ΤΠ) του οποίου η καύση οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση ισχυρότερων αντιδράσεων με εντονότερες διακυμάνσεις στις ιδιότητες. Γενικά παρατηρούμε ότι οι τιμές ευρίσκονται στην περιοχή της φυσικής ελαφρόπετρας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα αυτής έρευνας είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά και δείχνουν ότι η ΤΠ είναι εφικτό να αξιοποιηθεί μέσω της πυροσυσσωμάτωσης ως ελαφροβαρές και θερμομονωτικό υλικό. Επιπλέον, φαίνεται ότι μπορεί να βρεθεί λύση στα περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την εναπόθεση των παραπροϊόντων της Μεγαλόπολης όπως επίσης και την εξόρυξη ελαφρόπετρας από την νήσο Γυαλί.

Για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης έρευνας πρέπει να πραγματοποιηθούν πιλοτικές δοκιμές παραγωγής ελαφροαδρανών από μίγματα ΙΤ και ΤΠ προκειμένου να μελετηθεί η παραγωγή των υλικών σε ημιβιομηχανική κλίμακα. Επίσης, θεωρείται απαραίτητο να μετρηθούν οι αντοχές σκυροδέματος με τα παραγόμενα ελαφροαδρανή ώστε να αποκτήσουμε μια πλήρη εικόνα των τεχνολογικών ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Alexopoulou, I.E, Aggelopoulos G.N., Papamantellos D.K. and Rentizelas G. (1994). The dust recycling problem of the FeNi production at Larymna, Greece. Part I: Operational and experimental results, *Erzmetal* 47, Nr.9, p. 562-571. Cappel F. und Wendeborn f. (1973). *Sintern von Eisenerzen*, Verlag Stahleisen. M.B.H. Dusseldorf.
2. Dawson, R.P., (1993), *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 20, Nr.2, 137-143.
3. Lampropoulou, P.G., Alexopoulou, I.E. and Aggelopoulos G.N. (2003). Agglomeration of dust and sludge of the FeNi production. *Erzmetall*, Vol. 9, p. 551-557. Karamoutsos, S., Alexopoulou, I.E., Stivanakis, V., Fotias, P. and Papamantellos D.C. (2003). Investigation of the Safe Disposal of Sintered Oil Fired Power Station Solid Residues. *Environmental science and technology*, Lemnos island, September 8-10.
4. Michailidis, K., Sakorafas, V. and Burrigato, F., (1996). Mineralogy, geochemistry and properties of fly ash from the Megalopolis lignite fields, Peloponnese, Southern Greece. *Fuel*, Vol.75, No 4: 419-423.
5. Stivanakis, V., Papamantellos, D.K. and Galanoulis, E. (2003). "Evaluation of Greek type Portland cement based on Megalopolis fly ash addition, *Steel Grips* 2, (2003).
6. Tupkary, R.H. (2nd ed.) (1985). *Introduction to Modern Iron Making*. Delhi: Khana Publishers, Delhi.