

ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 19^{ΗΣ} ΜΑΡΤΙΟΥ 1981

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΙΩΑΝΝΟΥ Ν. ΚΑΡΜΠΗ

ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ - ΜΕΤΑΛΛΟΤΕΧΝΙΑ.— **Ἡ τεχνική τῆς παραγωγῆς σιδήρου καὶ χάλυβος ἀπὸ τοὺς ἀρχαίους Ἑλληνας στὴν Ἀττικὴ κατὰ τὴν κλασσικὴ περίοδο, ὑπὸ Κ. Κονοφάγου - Γ. Παπαδημητρίου ***. Ἀνεκοινώθη ὑπὸ τοῦ Ἀκαδημαϊκοῦ κ. Περικλῆ Θεοχάρη.

Ἡ πρώτη παραγωγή σιδήρου μὲ ἀναγωγή ἀπὸ μέταλλευμα τοποθετεῖται χρονικὰ γύρω στὸ 1400 π. Χ. καὶ θεωρεῖται ὅτι ἔγινε ἀπὸ τοὺς Χιτταίους στὰ ὄροπέδια τῆς Μ. Ἀσίας [1]. Τὸ ἴδιο ἰσχύει καὶ γιὰ τὸ χάλυβα.

Ἡ χρησιμοποίηση τοῦ σιδήρου ἀλλὰ καὶ τοῦ χάλυβος δὲν ἄργησε νὰ ἔρθει καὶ στὴν Ἑλλάδα. Πιθανότατα κατὰ πρῶτον μὲ τὴν «Κάθοδο τῶν Δωριέων».

Ὁ χάλυψ εἶναι γνωστὸς ἀπὸ τὸν 7^ο τοῦλάχιστον αἰῶνα π. Χ. Τοῦτο ἀποδεικνύεται ἀπὸ τὴ μικρογραφικὴ παρατήρηση τοῦ Γ. Ι. Βαρουφάκη σὲ τρεῖς λόγχες ποὺ ἀνακαλύφθηκαν ἀπὸ τὸν Καθηγητὴ κ. Γ. Μυλωνᾶ σὲ ἱερὸ τοῦ Ἄρεως, στὴ θέση Ἄσπρα Χώματα, 1 χιλιόμετρο βορείως τῆς Ἀκροπόλεως τῶν Μυκηνῶν [2].

Τὴ χρήση τοῦ χάλυβος κατὰ τοὺς ἀρχαίους χρόνους ἀποδεικνύουν ἔμμεσα τὰ ἴχνη λαξεύσεως στὰ μάρμαρα τῶν ναῶν καὶ τῶν θεάτρων καὶ ἄλλων ἀρχαίων κτηρίων. Τὸ μεγάλο μῆκος στοῶν καὶ φρεάτων ποὺ ὀρυχθῆκαν π. χ. στὰ Μεταλλεῖα τοῦ Λαυρίου πείθουν γιὰ τὸ ἴδιο. Τὰ ἔργα αὐτὰ ἔγιναν ἀσφαλῶς μὲ τὴ βοήθεια βελονῶν ἀπὸ χάλυβα καὶ μάλιστα ἀπὸ βαμμένο χάλυβα.

Ἡ ἄμεση ἀπόδειξη τῆς χρησιμοποίησεως τοῦ χάλυβος στὴν Ἀρχαία Ἑλλάδα εἶναι σπάνια, γιὰτὶ ὁ σίδηρος καὶ ὁ χάλυψ ὀξειδώνονται καὶ δὲν εἶναι εὔκολο νὰ

* C. CONOPHAGOS - G. PAPADIMITRIOU, **La technique de production de fer et d'acier par les Grecs anciens en Attique pendant la période classique.**

ἀποφανθεῖ κανείς για τὰ ὀξειδωμένα εὐρήματα ἂν ἦταν ἀπὸ τὸ ἓνα ἢ τὸ ἄλλο ὑλικό, μὲ βία τῆ σημερινῆ ἐπιστημονικῆ τεχνικῆ [23].

Ὁ Κ. Λιβαδεὺς ἐμελέτησε τὸ 1943 συνδέσμους καὶ γόμφους ἀπὸ τὸ Ναὸ τοῦ Παρθενῶνος καὶ κατέληξε στὸ συμπέρασμα ὅτι τὸ ὑλικό τῆς κατασκευῆς των εἶναι «μερικῶς μὲν ἐκ μαλακοῦ σιδήρου καὶ μερικῶς ἐκ χάλυβος καὶ σκωριῶν» [3]. Ἀναφέρει ἐξάλλου ὅτι ὁ W. Cambell τὸ 1931 εἶχε καταλήξει προηγουμένως στὸ ἴδιο συμπέρασμα.

Οἱ ἀνακοινοῦντες, σὲ μιὰ σύγχρονη ἀνακοίνωσή τους στὴν Ἀκαδημία μὲ τίτλο «Οἱ χαλύβδινοι σύνδεσμοι τοῦ Ἑρεχθείου κατασκευάστηκαν μὲ τεχνικὴ πὺξαναβρίσκεται στὸ Μεσαίωνα στὰ Δαμασκηνὰ σπαθιά», ἐμελέτησαν ἀρχαίους συνδέσμους καὶ γόμφους τοῦ Ἑρεχθείου καὶ ἀπόδειξαν ὅτι οἱ ἀρχαῖοι χρησιμοποιοῦσαν ἀπὸ τότε τὴν ἐμφανιζομένη στὸν Μεσαίωνα τεχνικὴ τῶν «Δαμασκηνῶν σπαθιῶν» [4].

Θὰ ὑπενθυμίσουμε μερικὰ μόνον κείμενα πὺξ ἔχουν σχέση μὲ τὸ χάλυβα καὶ τὴ βαφή του, γνωστὰ ἀπὸ τὰ ἔργα ἀρχαίων συγγραφέων [5-8].

Ἡ βαφή τοῦ χάλυβος ὑποδηλοῦται στὸν Ὅμηρο, στοὺς γνωστοὺς στίχους πὺξ ἀναφέρονται στὴν τύφλωση τοῦ Κύκλωπος [9].

Ὁ Ἡσίοδος χρησιμοποιεῖ τὴ λέξη «ἀδάμας» μὲ τὴν ἔννοια τοῦ ἀδάμαστου.

Ἦπνοεῖ ἀσφαλῶς τὸ χάλυβα πὺξ ἔχει ὑποστῆ σκλήρυνση μὲ βαφή [10].

Θὰ περιορισθοῦμε, για τὸν 5^ο αἰῶνα π. Χ. στὴ φράση τοῦ χρησιμοῦ τῆς Πυθίας πρὸς τοὺς Ἀθηναίους για τὴν εἰσβολὴ τοῦ Ξέρξη.

(Ἡροδότου, VII, 141) [11] :

«Ὀὺ δύναται Παλλὰς Δί' Ὀλύμπιον ἐξιλάσασθαι,

λισσομένη πολλοῖσι λόγοις καὶ μήτιδι πυκνῇ

3 σοὶ δὲ τόδ' αὔτις ἔπος ἐρέω, ἀδάμαντι πελάσας.

Τῶν ἄλλων γὰρ ἀλίσκομένων ὄσα Κέκροπος οὖρος

ἐντὸς ἔχει κενθμών τε Κιθαιρῶνος ζαθέοιο,

6 τοίχος τριτογενεῖ ξύλινον διδοὶ ἐδρύοπα Ζεὺς

.

12».

Ὁ τρίτος στίχος μπορεῖ νὰ μεταφρασθεῖ :

«γιατὸ σένα ἰδοὺ μιὰ ἄμεση συμβουλή, ἀνθεκτικὴ σὰν τὸ βαμμένο χάλυβα».

Ἡ παραγωγή τοῦ σιδήρου καὶ τοῦ χάλυβος εἶχε τεράστια σημασία γιὰ τοὺς ἀρχαίους, διότι μ' αὐτὰ κατασκευαζόταν μεγάλος ἀριθμὸς ἐργαλείων καὶ ὄπλων. Ὁ τρόπος, ὅμως, μὲ τὸν ὁποῖον παράγονταν δὲν ἦταν μέχρι τώρα γνωστός.

Εἶχαμε τὴν τύχη νὰ καταλήξουμε σὲ μία ἱκανοποιητική, πιστεύουμε, περιγραφή τῶν σταδίων παραγωγῆς τοῦ σιδήρου καὶ χάλυβος στὴν Ἀττικὴ τὸν 5^ο αἰῶνα π. Χ., χάρις κυρίως σὲ ὀρισμένα ὑπολείμματα καμινείας σιδήρου ποὺ συλλέξαμε στὴν κοιλάδα τῆς Σούρτζας στὸ Λαύριο, στὴ θέση «Ἀσκληπιακὸν» τὸ 1978, κατὰ τὴ διάρκεια τῶν σχετικῶν ἀνασκαφῶν μας. Καὶ τοῦτο σὲ συνδυασμὸ μὲ τὴν ἐρευνά μας ἐπὶ τῶν συνδέσεων τοῦ Ἐρεχθείου καὶ τὴ σχετικὴ μας ἀνακοίνωση τὴν ὁποία ἀναφέραμε [4].

Οἱ ἀνασκαφές μας στὸ Λαύριο ἀναφέρονται λεπτομερῶς στὸ βιβλίο «Τὸ Ἄρχαιον Λαύριο» τοῦ καθηγ. κ. Κ. Κονοφάγου, σελ. 375 - 389 [12].

Οἱ ἀνασκαφές ἔγιναν ἀπὸ τὸ Ἐργαστήριον Μεταλλογνωσίας τοῦ Ε. Μ. Π. μὲ τὴν ἐποπτεία τῆς Ἐφορίας Ἀρχαιοτήτων Ἀττικῆς. Ἐκ μέρους τοῦ Πολυτεχνείου τὴν ἀνασκαφὴ παρακολούθησε ὁ καθηγητὴς τῆς Ἐδρας κ. Κ. Κονοφάγος, ἡ βοηθὸς τῆς Ἐδρας ἀρχαιολόγος δεσποινὶς Κ. Τσαϊμου καὶ ὁ Δρ. μηχανικὸς κ. Γ. Παπαδημητρίου.

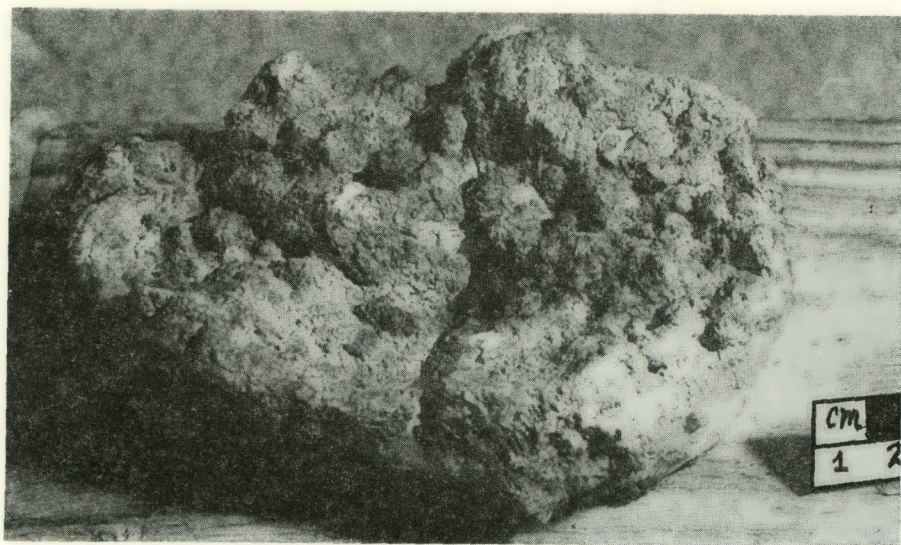
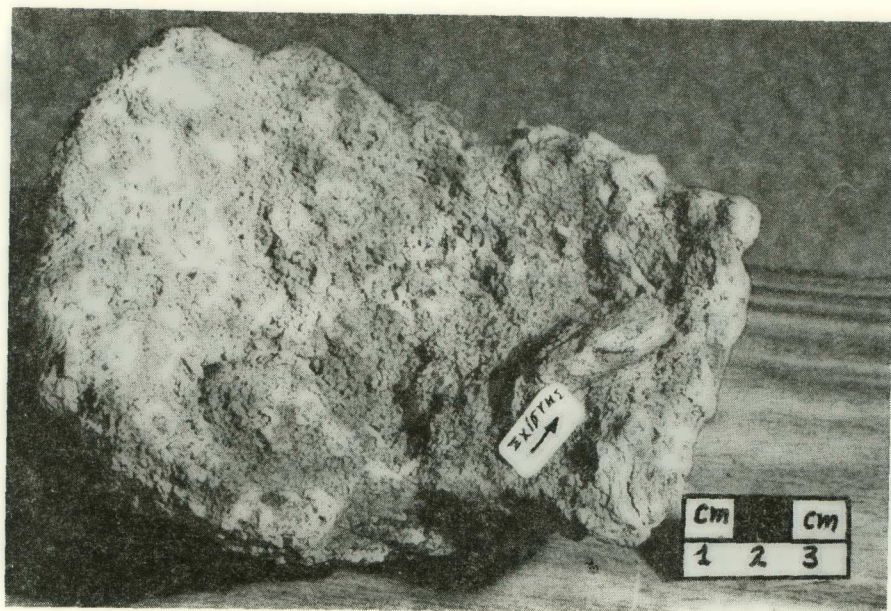
Κατὰ τὴ διάρκεια τῶν ἀνασκαφῶν τὰ μέλη τοῦ Ἐργαστηρίου τοῦ Ε. Μ. Π., βρῆκαν σὲ ἀπόσταση 300 m ἀπὸ τὸ χῶρο τῆς ἐργασίας δεκαπέντε ἡμισφαιρικὰ τεμάχια ἀποτελούμενα ἀπὸ μετάλλευμα σὲ προχωρημένο στάδιο ἀναγωγῆς τῶν ὀξειδίων τοῦ σιδήρου.

Τὰ τεμάχια αὐτὰ θὰ ὀνομάσουμε «συντήγματα ἐξ ἀναγωγῆς γιὰ τὴν παραγωγή σπογγώδους σιδήρου» ἢ γιὰ συντομία ἀπλῶς «συντήγματα».

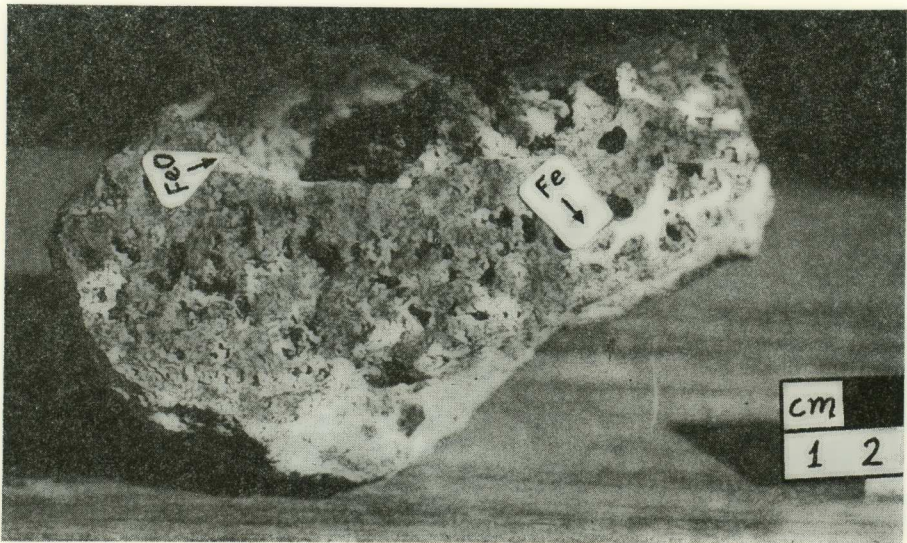
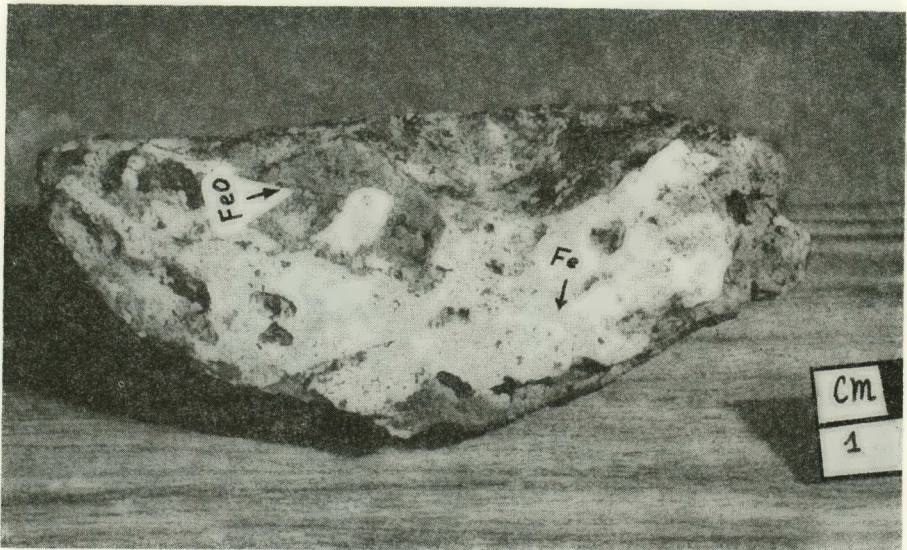
Τὰ τεμάχια αὐτὰ βρέθηκαν σκορπισμένα σὲ μία ἀκτίνα 50 περίπου μέτρων. Ἔδιναν τὴν ἐντύπωση ὅτι ἐκεῖ κοντὰ ὑπῆρχε ἀρχαία μεταλλουργία σιδήρου. Δὲν μπορέσαμε νὰ ἐντοπίσουμε ὑπολείμματα σχετικῶν καμίνων, γιὰτὶ ἡ περιοχὴ ἔχει ἀνασκαφθεῖ ἀπὸ τοὺς νεώτερους μεταλλευτὲς τοῦ Λαυρίου καὶ εἶναι καλυμμένη ἀπὸ σωροὺς λίθων. Σποραδικῶς, πάντως, τέτοια τεμάχια εὐρίσκονται σ' ὅλη τὴν κοιλάδα τῆς Σούρτζας (εἰκ. 1 καὶ 2).

Δύο ἄλλα τεμάχια, ὅμοια στὴ μορφή μὲ τὰ προηγούμενα ἀλλ' ὅπου ἡ ἀναγωγή προχώρησε μέχρι τὴν παραγωγή μεταλλικοῦ σιδήρου, βρέθηκαν ἀπ' τὰ μέλη τοῦ Ἐργαστηρίου στὸ χῶρο τῆς ἀνασκαφῆς (εἰκ. 3 καὶ 4).

Πρέπει νὰ παρατηρήσουμε ὅτι καὶ στὰ τεμάχια ποὺ εἶχαν ὑποστῆ μερικὴ ἀναγωγή μερικὲς φορὲς παρατηρεῖται καὶ ὀλίγος σπογγώδης σίδηρος.



Εικ. 1 και 2. Ήμισφαιρικά συντήγματα μεταλλεύματος σε προχωρημένη κατάσταση άναγωγής, μέχρι και το FeO . Βρέθηκαν στην κοιλάδα της Σούρεζας 300 m από το χώρο των άνασκαφών μας.

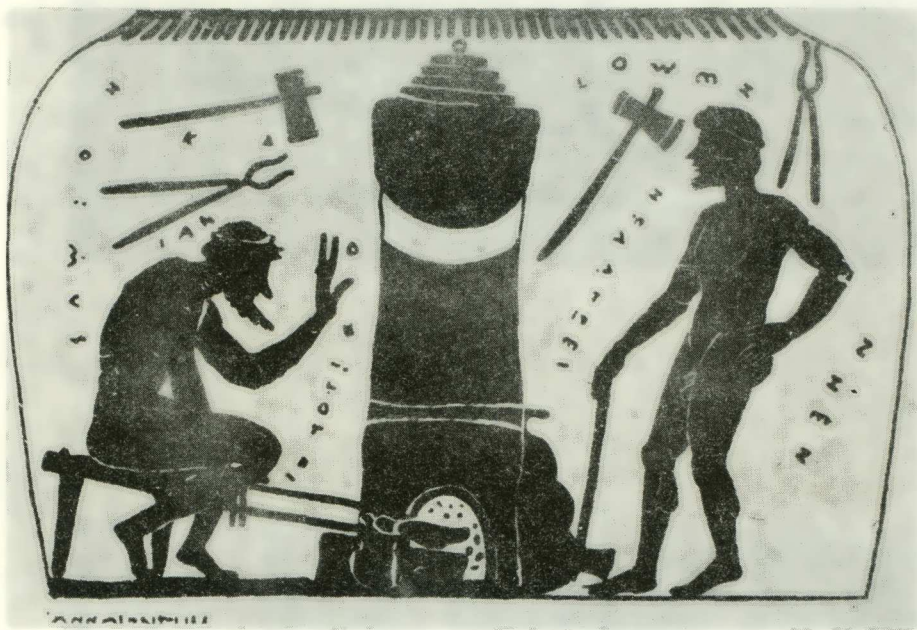


3 και 4. Ήμισφαιρικά συντήγματα σπογγώδους σιδήρου και σκωρίας.
Βρέθηκαν στο χώρο των ανασκαφών του «'Ασληπιακού».

Πενήντα άλλα τεμάχια βρέθηκαν ανεξάρτητα με τη δική μας έρευνα, από την αρχαιολόγο της Βελγικής Αποστολής P. Spitaels στην είσοδο των αρχαίων μεταλλείων στο Θορικό, και μάλιστα σε προϊστορικό έδαφος [13].

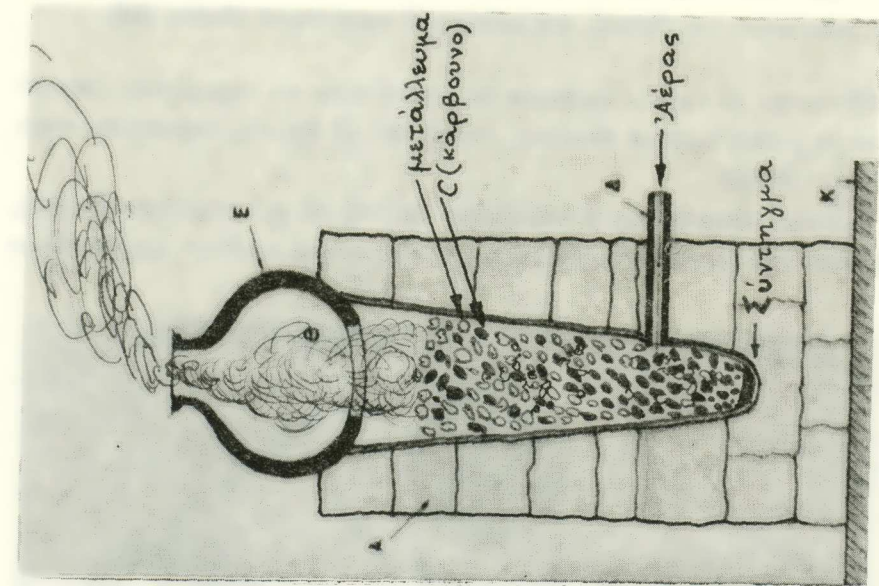
Έξετάσαμε τα αρχαία ευρήματα και συνδυάσαμε τα πειραματικά αποτελέσματα με τη μελέτη αρχαίων κειμένων, καθώς και με αρχαίες παραστάσεις καμίνων πάνω σε αγγεία.

Ίδιαίτερη σημασία έχει η παράσταση καμίνου επί μελανομόρφου οίνοχόης, που βρίσκεται στο Βρετανικό Μουσείο, και της οποίας καμίνου προσδιορίσαμε

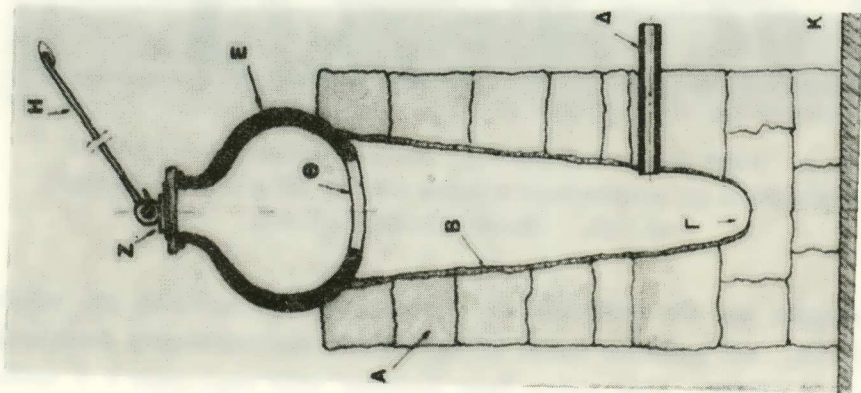


Είκ. 5. Παράσταση μεταλλουργικής καμίνου σφρηλατήσεως σιδήρου. Άγγειογραφία επί μελανομόρφου οίνοχόης του 510-500 π. Χ., που βρέθηκε στο Vulci. (Μουσείο Λονδίνου, Β 507).

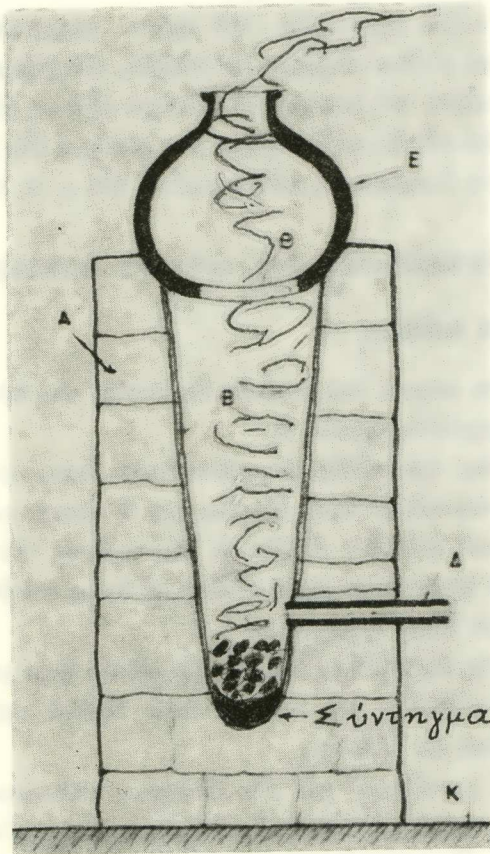
τή λειτουργία και τόν σκοπό (είκ. 5). Διαπιστώσαμε ότι πρόκειται για κάμινο σφρηλασίας, που συνδέεται άμεσα με την πρωτογενή μεταλλουργία παραγωγής σιδήρου και χάλυβος. Περί τούτου όμως δμιλοῦμε στην παράγραφο 1.2 καθώς και στη σύγχρονη ανακοίνωσή μας με τίτλο «Έρμηνεία του χρησιμοποιούμενου αγγείου από τους αρχαίους Έλληνες στο στόμιο των καμίνων κατά την κλασική περίοδο» [14].



Ειχ. 6β.
↓



Ειχ. 6α.
↓



Είχ. 6γ.

- α) Αναπαράσταση φρεατοειδούς αρχαίας καμίνου άναγωγής σιδηρομεταλλεύματος.
 β) Μετά τη φόρτωση, στην άρχή της μεταλλουργικής κατεργασίας άναγωγής.
 γ) Περί τὸ τέλος της μεταλλουργικής κατεργασίας της άναγωγής.
- A : Τοιχώματα καμίνου από σχιστολίθους.
 B : Έπένδυση από άργιλοϋχο ύλικό.
 Γ : Πυθμένας καμίνου, όπου σχηματίζεται τὸ σύντηγμα της άναγωγής.
 Δ : Άκροφύσιο τοῦ φουσεροῦ.
 E : Κεραμικό έπιστόμιο (διάτρητο στὸν πυθμένα κεραμικό άγγείο).
 Z : Μεταλλικό κάλυμμα κεραμικοῦ έπιστομίου.
 Η : Άγγιστροειδής ράβδος.
 Θ : Διάτρητος πυθμένας κεραμικοῦ έπιστομίου.

Πρὶν ὅμως ἐκθέσουμε τις παρατηρήσεις, ἐξετάσεις καὶ συλλογισμοὺς ποὺ μᾶς ὀδήγησαν στὸ τελικὸ συμπέρασμα τοῦ τρόπου κατεργασίας τῶν μεταλλευμάτων μέχρι τὸ τελικὸ στάδιο παραγωγῆς χάλυβος, θεωρήσαμε προτιμότερο γιὰ τὴν καλύτερη παρουσίαση τοῦ θέματος νὰ δώσουμε ἀμέσως τὴ σύνθεση (I) στὴν ὁποία καταλήξαμε. Θὰ τὴν δικαιολογήσουμε στὴ συνέχεια (II) παραθέτοντας ὅλα τὰ στοιχεῖα στὰ ὁποῖα βασίσαμε τὴ σύνθεση αὐτὴ ἀπὸ κάθε δυνατὴ ἄποψη.

I. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ - ΣΥΝΘΕΣΗ

I. 1. Ἀναγωγή τοῦ σιδήρου.

Τὴν πιθανότερη μορφή τῆς καμίνου ἀναγωγῆς τῶν σιδηρομεταλλευμάτων δίνουμε στὴν ἀναπαράσταση τῆς εἰκ. 6.

Ἦταν, ἀσφαλῶς, φρεατώδης κατασκευασμένη ἐκτὸς τοῦ ἐδάφους. Αὐτὸς ὁ τύπος καμίνου ἐφαρμοζόταν κατὰ δεκάδες τὸν 5^ο αἰῶνα στὸ Λαύριο γιὰ τὴν παραγωγή ἀργυρούχου μολύβου. (Βλέπε Κ. Κονοφάγου «Τὸ Ἀρχαῖο Λαύριο», σελ. 290 [12]. Ἦταν κτισμένη μὲ σχιστόλιθους καὶ ἔφερε ἐπένδυση ἀπὸ ἀργιλοῦχο ὑλικό. Στὸ κάτω μέρος ἔφερε ἀκροφύσια).

Ἡ διάμετρος τῆς φρεατώδους καμίνου γιὰ σίδηρο ἦταν στὸ κατώτερο μέρος 15 cm περίπου. Ὁ πυθμῆνας τῆς καμίνου ἦταν ἐλαφρὰ κοίλος. Τὸ ὕψος της κατ' ἐκτίμηση, θὰ ἦταν 80 - 120 cm.

Ὁ ἀέρας ποὺ χρειαζόταν γιὰ τὴν ἀναγωγή παραγόταν μὲ τὴ βοήθεια φουσερῶν, ποὺ ἦταν γνωστὰ στὸ Λαύριο, καὶ χρησιμοποιόνταν σ' ὅλες τις μεταλλουργίες τῆς ἐποχῆς. Χαρακτηριστικὸ παράδειγμα εἶναι οἱ κάμινοι τήξεως ὅπως καὶ κυπελλώσεως τῆς μεταλλουργίας μολύβδου - ἀργύρου [12]. Ἐνα τέτοιο φουσερὸ φαίνεται καθαρὰ καὶ στὴν παράσταση τῆς καμίνου τῆς οἰνοχόης (εἰκ. 5).

Πάντως, ὅπως ἀναφέραμε, δὲν ἔχουν ἀνευρεθεῖ μέχρι σήμερα εἰρήπια καμίνου παραγωγῆς σιδήρου στὸ Λαύριο.

Στὴν κάμινο ἀναγωγῆς ποὺ ἀναπαραστήσαμε ἢ κατεργασία γινόταν ὡς ἑξῆς :

Στὴν ἀρχὴ γινόταν προθέρμανση τῆς καμίνου. Οἱ ἀρχαῖοι μεταλλουργοὶ ἐγέμιζαν τὴν κάμινο σὲ ἀρκετὸ ὕψος μὲ ξύλα καὶ ὕστερα μὲ ξυλάνθρακα καὶ μὲ τὴ βοήθεια φουσερῶν ὕψωναν σταδιακὰ τὴ θερμοκρασία, ὥστε νὰ ἐπέλθει ξήρανση τῆς ἐπενδύσεως καὶ τελικῶς πύρωσή της.

Κατόπιν τροφοδοτοῦσαν ξυλάνθρακα σὲ ὕψος 40 - 50 ἐκ. περίπου καὶ φουσοῦσαν ἀέρα γιὰ νὰ φθάσει ἡ θερμοκρασία σὲ ὑψηλὰ ἐπίπεδα, διατηρώντας τὴ στάθμη τοῦ ξυλάνθρακα περίπου σταθερή.

Ἐπακολουθοῦσε ἡ τροφοδοσία μεταλλεύματος ἀνακατεμένου μὲ ξυλάνθακα.

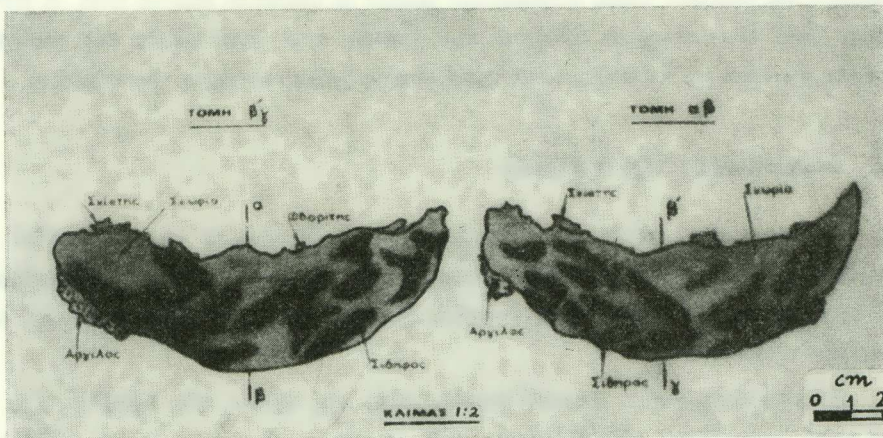
Ἐπολογίζουμε ὅτι ἔπρεπε νὰ ἦταν σὲ ποσοστὸ 70% περίπου κατὰ βάρος τοῦ μεταλλεύματος.

Τὸ μέταλλευμα ποὺ χρησιμοποιοῦσαν ἦταν πολὺ καθαρὸ. Στὴν περιοχὴ τῆς Σούρεζας εἶναι αἱματίτης (α - Fe_2O_3) ἢ λειμωνίτης ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Πιθανότατα ἡ κάμιнос ἐγέμιζε ὡς ἐπάνω, ἐπειδὴ ὁ τρόπος αὐτὸς ἐπέτρεπε καλὴ προθέρμανση τοῦ φορτίου ἀπὸ τὸν ἀνερχόμενον καπνὸ.

Στὴν ἐπιφάνεια ἔριχναν τεμάχια σχίστου ποὺ ἦταν πυρίμαχος, γιὰ νὰ περιορίσουν τὶς ἀπώλειες ἀπὸ ἀκτινοβολία πρὸς τὰ πάνω.

Θεωροῦμε σχεδὸν βέβαιο ὅτι ἡ κάμιнос ἔκλεινε στὸ στόμιό της μ' ἓνα πυρί-



Εἰκ. 7. (Σχέδιο τῶν εἰκ. 3 καὶ 4).

Ἡμισφαιρικὸ σύντηγμα σπογγώδους σιδήρου. Στὸ ἐσωτερικὸ τοῦ συντήγματος σπογγώδης μεταλλικὸς σίδηρος καὶ σκωρία. Στὴν ἄνω κοίλη ἐπιφάνεια τεμαχίδια σχίστου καὶ φθορίτου. Στὴν κάτω κυρτὴ ἐπιφάνεια ὑπολείμματα ἀπὸ τὴν ἀργιλοῦχο ἐπέκδυση τῆς καμίνου.

μαχο κεραμικὸ ἀγγεῖο μὲ κινητὸ κάλυμμα, γιὰ τὸ ὁποῖο μιλοῦμε ἰδιαίτερος σὲ ἄλλη σύγχρονη ἀνακοίνωσή μας [14].

Ἐπολογίσαμε ὅτι τὸ μέταλλευμα, ποὺ τὸ τροφοδοτοῦσαν μὲ 70% ξυλάνθακα σὲ ὕψος 60 ἐκ., δίνει ἀκριβῶς τὸ τυπικὸ ἡμισφαιρικὸ προϊόν ποὺ βρήκαμε.

Ἐτσι ὕστερα ἀπὸ 6-10 ὥρες περίπου τὸ μέταλλευμα συντηκόταν, κατέβαινε καὶ σχηματίζε στὸν πυθμένα τῆς καμίνου τὸ ἡμισφαιρικὸ σύντηγμα (βλ. εἰκ. 1-4 καὶ 7).

Μέσα στο τεμάχιο αυτό ο σίδηρος που προήλθε από την αναγωγή του μεταλλεύματος είχε συσσωματωθεί αρκετά, ώστε να δώσει τεμάχια συνεχῆ από «σπογγώδη» μεταλλική μάζα, ανακατωμένα με σκωρία [15].

Δὲν πρέπει, βεβαίως, να θεωρηθεῖ ὅτι στὰ συντήγματα ὁ σίδηρος εἶχε φθάσει σὲ κατάσταση τήγματος.

Ἡ ἡμισφαιρική μορφή τοῦ τεμαχίου καὶ ἡ κοίλη μορφή τῆς ἄνω ἐπιφανείας ὁφείλονται στὴ διαφοροποιημένη ταχύτητα καθόδου τοῦ φορτίου στὸ κέντρο τῆς καμίνου καὶ στὴν περιφέρεια, ὅπου ἡ τριβὴ μὲ τὶς παρειὲς τῆς καμίνου εἶναι σημαντικότερη.

Στὸ τέλος τῆς κατεργασίας, ὅταν ὅλος ὁ ξυλάνθρακας εἶχε καταναλωθεῖ, ἄφηναν τὴν κάμινο νὰ ψυχθεῖ καὶ ἐξῆγαν τὸ σύντηγμα τοῦ σιδήρου εἴτε ἀπὸ τὸ στόμιο τῆς καμίνου, ἀφοῦ ἀφαιροῦσαν πρῶτα τὸ κεραμικὸ δοχεῖο, εἴτε, τὸ πιθανότερο, ἀπὸ ἓνα πλευρικὸ ἄνοιγμα ποὺ ἔκαναν στὸ κάτω μέρος τῆς καμίνου. Τὸ ἄνοιγμα αὐτὸ τὸ ἔκλειναν κατὰ τὴν ἐπόμενη χρησιμοποίηση τῆς καμίνου.

I. 2. Διαχωρισμὸς τῆς σκωρίας.

Τὸ παραπάνω σύντηγμα (βλέπε εἰκ. 3, 4, 7) ἔπρεπε νὰ καθαριθεῖ μὲ σφυρηλασία, γιὰ νὰ ἀποχωριθεῖ ἡ σκωρία καὶ νὰ γίνῃ πλήρης συσσωμάτωση τοῦ σπογγώδους σιδήρου, ὅπως ἀκριβῶς γινόταν καὶ στὸν Μεσαίωνα γιὰ τὴν κατεργασία τῶν blooms.

Αὐτὴ ἡ κατεργασία ἀπαιτεῖ θερμοκρασία τῆς τάξεως τῶν 1200⁰C. Γιὰ τὸ λόγο αὐτὸ χρειάζοταν νέα θέρμανση τοῦ τεμαχίου. Φαίνεται ὅτι οἱ Ἕλληνες χρησιμοποίησαν γι' αὐτὸ τὸν σκοπὸ μιὰ πρωτότυπη κάμινο, ποὺ δώσαμε ἤδη στὴν εἰκ. 5, ἀπὸ ἀρχαία οἰνοχόη.

Ἡ κάμινο αὐτὴ εἶναι φρεατώδης καὶ οὐσιαστικὰ «ἐστία» ξυλάνθρακος γιὰ τὴ θέρμανση τῶν συντηγμάτων. Πράγματι στὴν παράσταση βλέπουμε ὅτι τὸ τεμάχιο ποὺ κρατᾷ ὁ σιδηρουργὸς μὲ τὴν τσιμπίδα ἔχει ἀκριβῶς τὴν ἴδια μορφή μὲ τὰ ἀνηγμένα συντήγματα ποὺ ἀναφέραμε.

Τὸ τεμάχιο βυθιζόταν στὸ ἐσωτερικὸ τῆς καμίνου, χάρις στὸ πλευρικὸ ἀρκετὰ μεγάλο ἄνοιγμα, ἀνάμεσα στὰ διάπυρα τεμάχια τοῦ ξυλάνθρακος, καὶ παρέμενε μέχρις ὅτου ἡ σκωρία φθάσει σὲ κατάσταση σχετικῆς ρευστότητας. Τὸ τεμάχιο τὸ ἔβγαζαν καὶ τὸ σφυρηλατοῦσαν γιὰ νὰ ἀπομακρύνουν τὴ σκωρία. Ἡ κατεργασία ἐπαναλαμβάνονταν ἐν ἀνάγκη, μέχρι πλήρους ἀφαιρέσεως τῶν

σκωριῶν ἀπὸ τὸ συσσωματωμένο σίδηρο. Σ' αὐτὸ τὸ σημεῖο ἡ γνώμη μας συμπίπτει μὲ ἐκείνη τοῦ Κ. Λιβαδέα [3], ὁ ὁποῖος ὅμως δὲν ἐγνώριζε τὴν προέλευση τῶν τεμαχίων. Ἀντιθέτως, ἡ γνώμη τοῦ Κ. Λιβαδέα γιὰ τὴ χρήση τοῦ ἀγγείου στὸ στόμιο τῆς καμίνου νομίζουμε πὼς εἶναι ἀπαράδεκτη, γιὰ μεταλλουργικούς λόγους, τοὺς ὁποίους θὰ ἀναφέρουμε στὴν παράγραφο II. 1.

I. 3. Παραγωγή τοῦ χάλυβος.

Μετὰ τὸ διαχωρισμὸ τοῦ σιδήρου ἀπὸ τὴ σκωρία τίθεται τὸ μεγάλο θέμα τῆς παραγωγῆς τοῦ χάλυβος. Ὁ χάλυψ παρασκευαζόταν ἀναμφισβήτητα μὲ ἐνανθράκωση. Πῶς, δὲν ἦταν ὡς τώρα γνωστὸ ἀπὸ εὐρήματα ἢ σαφῆ κείμενα.

Ἐπάρχει, πάντως, ἓνα εὐρημα ποὺ ρίχνει ἀρκετὸ φῶς στὸ πρόβλημα αὐτό.

Στὴ δεύτερη σύγχρονη ἀνακοίνωσή μας στὴν Ἀκαδημία, γιὰ τοὺς συνδέσμιους, ἀποδείξαμε ὅτι οἱ ἀρχαῖοι χρησιμοποιοῦσαν στὴν περίπτωση αὐτὴ μία μέθοδο ποὺ εἶναι οὐσιαστικῶς ἡ τεχνικὴ τῶν «δαμασκηῶν σπαθιῶν». Οἱ σύνδεσμοι ἀποτελοῦνται ἀπὸ λεπτὰ φύλλα πάχους 2-3 χμ. σιδήρου καὶ χάλυβος ἐναλλάξ. Τοῦτο ὀδηγεῖ στὸ γεγονὸς ὅτι ὁ χάλυψ παραγόταν ὑπὸ μορφῇ λεπτῶν φύλλων. Τοῦτο πάλι ἀποδεικνύει ὅτι πρόκειται γιὰ ἐνανθρακωμένα λεπτὰ φύλλα σιδήρου. Ἡ ἐνανθράκωση ἔφθανε σὲ ὅλο τὸ βάθος τῶν φύλλων.

Κατόπιν συγκλοοῦσαν τὰ φύλλα μὲ αὐτογενῆ συγκόλληση μὲ τὴ βοήθεια σφυρηλασίας. Ἐπακολουθοῦσαν στρέψεις, ἀναδιπλώσεις καὶ πάλι σφυρηλασία.

Ἀναρωτηθήκαμε σὲ τί εἶδους κάμινο γινόταν ἡ ἐνανθράκωση τῶν φύλλων, ποὺ ἀπαιτεῖ θερμοκρασία τῆς τάξεως τῶν 800 - 900° C [16].

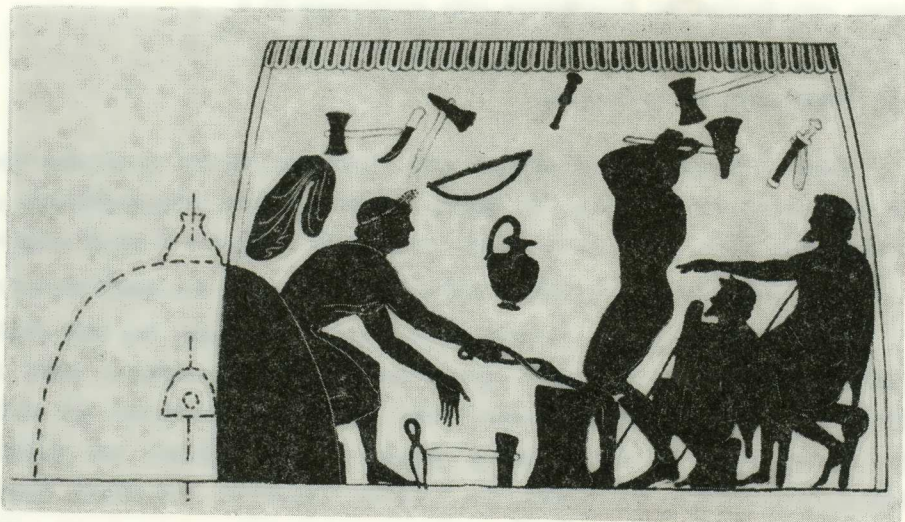
Πιστεύουμε ὅτι θὰ χρησιμοποιοῦσαν καμίνο τοῦ εἶδους τῶν κεραμικῶν καμίνων, ποὺ ἦταν σὲ διαρκῆ πρακτικὴ ἀπὸ αἰῶνες.

Στὶς καμίνο αὐτὲς ὀπτήσεως τῶν ἀγγείων ἐπιτυγχάνονται συνήθως θερμοκρασίες τῆς τάξεως τῶν 800 - 1000° C. Τὰ λεπτὰ φύλλα τοποθετοῦνται μέσα σὲ σφραγισμένα ἀγγεῖα μὲ ἀρκετὴ ποσότητα σκόνης ξυλάνθρακος. Σὲ λίγες ὥρες ὑπάρχει ἡ δυνατότητα ὀλικῆς ἐνανθρακώσεως τῶν φύλλων.

Στὴν παράσταση τοῦ ἀττικοῦ ἀγγείου τοῦ 5ου αἰῶνος σφυρηλατήσεως τοῦ σιδήρου γιὰ μορφοποίηση (εἰκ. 8) παρατηρήσαμε ὅτι ἀριστερὰ καὶ κάτω ὑπάρχει μία χαρακτηριστικὴ κάμινο, ὅμοια μὲ ἐκείνη τὴν ὁποία χρησιμοποιοῦσαν γιὰ τὴν ὀπτηση τῶν ἀγγείων. (Βλ. τὴν σύγχρονη ἀνακοίνωσή μας ἐπὶ τῶν καμίνων

αὐτῶν) [14]. Συμπληρώσαμε, καθ' ὑπόθεσιν, τὴν κάμινον τῆς παραστάσεως αὐτῆς.

Νομίζουμε ὅτι, πιθανῶς, ὁ καλλιτέχνης θυμίζει ὅτι στὸ ἐργαστήριον αὐτὸ σφυρηλασίας τοῦ σιδήρου καὶ τοῦ χάλυβος γινόταν καὶ ἐνανθράκωση ἐργαλείων σιδήρου.



Εἰκ. 8. Ἔργασία σφυρηλατήσεως σιδήρου. Ἄγγειογραφία ἐπὶ μελανομόρφου ἄττικου ἀμφορέως τοῦ 510 - 500 π. Χ., ποῦ βρέθηκε στὸ Orvieto. (Μουσεῖο Βοστώνης, 018035). Ἀριστερὰ καὶ κάτω συμπληρώσαμε μὲ διακομμένη γραμμὴ, καθ' ὑπόθεσιν τὴν κάμινον.

II. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ, ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΛΛΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΑΜΕ

II. 1. Ἡ μορφή τῆς καμίνου.

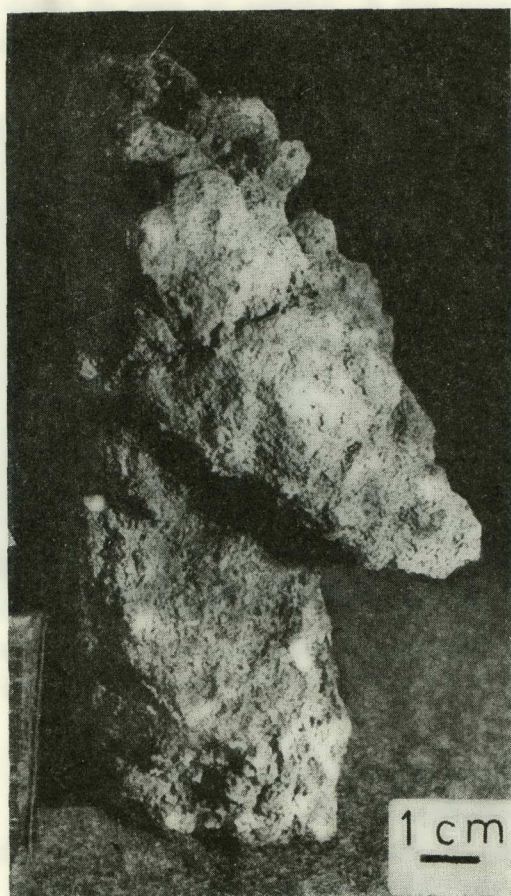
Τὸ σχῆμα τῶν συντηγημάτων ἀποδεικνύει τὴν κάθοδον τοῦ φορτίου στὸ ἐσωτερικὸν κάμινου, ἢ ὁποῖα εἶναι ἀσφαλῶς φρεατώδης.

Σὲ ὁρισμένα, μάλιστα, ἀπὸ τὰ συσσωματώματα διακρίνεται κατὰ τόπους ἢ ἀρχικὴ στρωμάτωση, ποῦ ἔχει καμφθεῖ πρὸς τὶς παρειὰς κατὰ τὴν κάθοδον τοῦ φορτίου.

Βρέθηκε ἐπίσης ἓνα τεμάχιο μὲ ἀνώμαλον σχῆμα, ποῦ ἀποδεικνύει ὅτι σὲ ὁρισμένες περιπτώσεις τὸ φορτίον δὲν κατέβαινε ὁμοίομορφα. Ἡ ἀνωμαλία αὐτὴ εἶναι γνωστὴ στὴ λειτουργία τῆς φρεατώδους καμίνου καὶ ἀπὸ τὴν πράξιν (εἰκ. 9).

Τὰ δύο παραπάνω πείθουν ὅτι ἡ μορφή τῆς καμίνου ἦταν φρεατώδης.

Ὅτι ἡ φρεατώδης αὐτὴ κάμιнос ἦταν ἐκτὸς τοῦ ἐδάφους στηρίζεται στὸ ὅτι οἱ τεχνικοὶ τοῦ Λαυρίου εἶχαν μεγάλη πείρα τῶν καμίνων αὐτῶν καὶ συγκεκοιμένως γιὰ τὰ μεταλλεύματα μολύβδου. Ἐξάλλου ἡ τοποθέτηση τῶν ἀκροφυ-



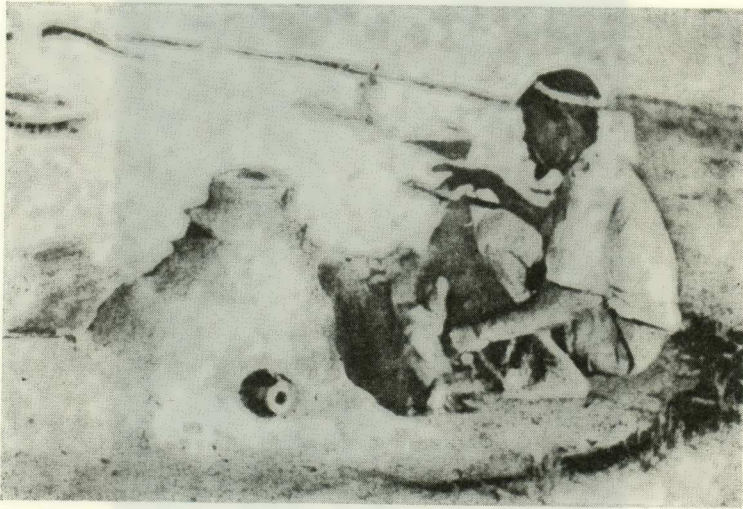
Εἰκ. 9. Σύντηγμα μὲ ἀνώμαλο σχῆμα, λόγω ἀνωμαλίας στὴν κάθοδο τοῦ φορτίου μέσα στὴ φρεατώδη κάμινο ἀναγωγῆς.

σίων εἶναι πολὺ εὐκολότερη ἐκτὸς τοῦ ἐδάφους. Ἐπίσης ἡ μικρὴ ἐσωτερικὴ διάμετρος τῆς καμίνου καὶ τὸ ὕψος της ἐπέβαλλαν νὰ εἶναι ἐκτὸς τοῦ ἐδάφους.

Τονίζουμε τοῦτο, γιατί οἱ πρωτόγονοι κάμινοι ἀναγωγῆς, καὶ σὲ σημερινούς πρωτόγονους λαοὺς τῆς Ἀφρικῆς, ἦταν συχνὰ ἐντὸς τοῦ ἐδάφους, ἀλλὰ πολλὲς φορὲς ἔξω ἀπὸ αὐτό, τελείως ἢ μερικῶς, ὅπως φαίνεται καὶ στὴν εἰκόνα 10 [1].

Τὸ θέμα τοῦ σκοποῦ τοῦ κεραμικοῦ ἀγγείου στὸ στόμιο τῆς καμίνου ποὺ σχεδιάσαμε ἀποδεικνύεται ἀπὸ τὶς ἀναπαραστάσεις πολλῶν καμίνων τῆς ἐποχῆς, τοῦτο δὲ ἀποτελεῖ ἰδιαίτερο θέμα ἀνακοινώσεώς μας, τὴν ὁποία ἤδη ἀναφέραμε [14].

Πάντως ἡ ἄποψη τοῦ Κ. Λιβαδέα γι' αὐτὸ τὸ ἀγγεῖο εἶναι ἐσφαλμένη. Λέγει: « . . . ἐντὸς τοῦ ὑπερκειμένου δοχείου . . . κατακεράννυνται συντηκόμενα



Εἰκ. 10. Πρωτόγονος κάμινος παραγωγῆς σπογγώδους σιδήρου, ἰθαγενῶν νοτίου Ροδεσίας, στὶς ἀρχές τοῦ αἰῶνα μας [1].

τὰ εἰργασμένα ἐκ τῆς σφυρηλασίας τεμάχια τοῦ σιδήρου πρὸς περαιτέρω ἀποχωρισμὸν τῶν ὑποληφθεισῶν σκωριῶν. . . » [3].

Ἡ τήξη, ὅμως, τῆς σκωρίας, ὅπως βρήκαμε πειραματικῶς, ἀπαιτεῖ θερμοκρασίες τῆς τάξεως τῶν 1300° C. Ἡ θέρμανση στὸ στόμιο τῆς καμίνου ἀπὸ τοὺς καπνοὺς δὲν μπορεῖ νὰ ὑπερβαίνει πρακτικῶς τοὺς 600° C.

Ὅτι ἡ κάμινος ἦταν κτισμένη μὲ σίσιτη, ὃ ὁποῖος εἶναι πυρίμαχος, εἶναι γνωστὸ καὶ ἀπὸ τὴν τεχνικὴ τῶν ἀρχαίων καμίνων μολύβδου στὸ Λαύριο.

II. 2. Τὸ φορτίο καὶ τὸ προϊόν.

Ἐτέθη ἐξάλλου τὸ ἐρώτημα ποιῆς ἐνώσεις συνθέτουν τὸ προϊόν τῆς κατεργασίας ἀναγωγῆς καὶ πῶς ἐξηγεῖται ἡ ὑπαρξη τεμαχίων σὲ κατάστασι ἡμιανα-

γωγής και δύο τεμάχιων, όπου η αναγωγή προχώρησε ως την παραγωγή μεταλλικού σιδήρου.

Πώς εξηγείται ιδιαίτερος ότι βρέθηκαν τόσα σχετικώς πολλά τεμάχια με μερική αναγωγή;

Τὰ δύο τεμάχια πού βρέθηκαν στις ανασκαφές του Ἀσκληπιακοῦ ἦταν, προφανῶς, χρήσιμα τεμάχια πού προήλθαν ἀπὸ μιὰ ἐπιτυχημένη ἐπιχείρηση παραγωγῆς σιδήρου. Ἀντιθέτως, τὰ πολλὰ εὐρήματα πού δὲν περιέχουν μεταλλικὸ σίδηρο ἦταν ἀποτυχίες καὶ ἀπορρίφθηκαν στὸν γύρω χῶρο ὡς ἄχρηστα. Ἔτσι ἐρμηνεύεται ἡ ἀφθονία τους στὴν κοιλάδα τῆς Σούρεζας. Τὴν ἴδια, ἐπίσης, ἐρμηνεῖα δίνουμε καὶ γιὰ τὰ πενήντα περίπου ἀνάλογα συντήγματα πού βρέθηκαν ἀπὸ τὴν P. Spitaels πεταμένα στὴν εἴσοδο ἐνὸς ἀρχαίου μεταλλείου, στοὺς πρόποδες τοῦ ὄρους Βελατούρι [13].

Ἡ μεταλλουργία σιδήρου ἦταν τέχνη ἐξαιρετικὰ δύσκολη καὶ οἱ ἀποτυχίες ἦταν ἀσφαλῶς συχνές.

Γνωρίζουμε ὅτι οἱ ἀρχαῖοι στὶς καμίνους των (τόσο κεραμικὲς ὅσο καὶ μεταλλουργικὲς) τοποθετοῦσαν κοντὰ στὴν κορυφή τους μορφές ἀπὸ «ἀποτρόπαια» ἐναντίον τῆς βασκανίας. (Βλ. Πολυδεύκος - Ὀνομαστικόν, VII - 108) [17]. Πράγματι, σὲ μιὰ δύσκολη μεταλλουργικὴ τεχνικὴ ἡ τύχη ἔπαιξε σημαντικὸ ρόλο.

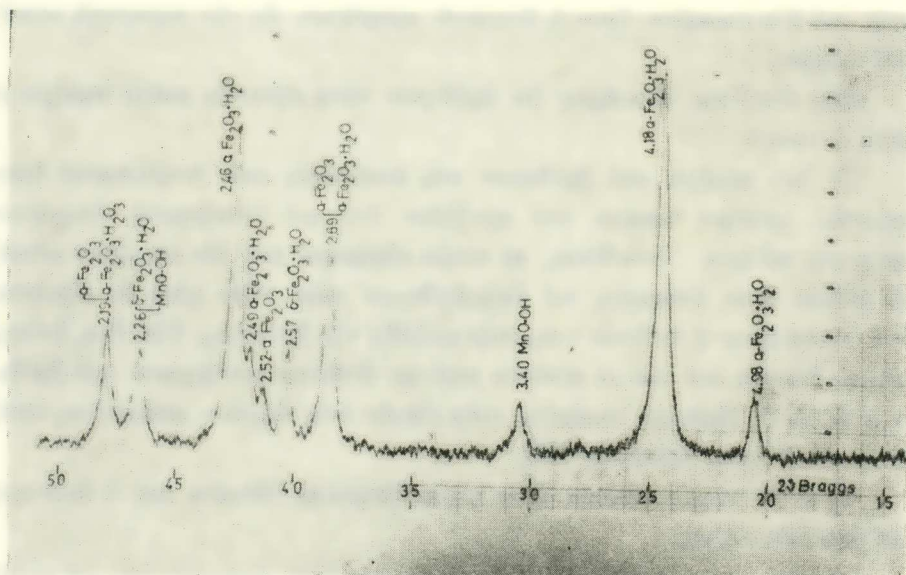
Τὰ ὀρυκτά. Ὑπάρχουν στὸ Λαύριο καθαρὸτατα ὀρυκτὰ σιδήρου. Τὰ ὀξειδωμένα σιδηρομεταλλεύματα τῆς Σούρεζας, πού βρίσκονται ὀλίγες ἑκατοντάδες μέτρα ἀπὸ τὸν τόπο τῶν εὐρημάτων, στὴν κλιτὴ τῆς κοιλάδας, περιέχουν τὸ σίδηρο ὡς αἱματίτη (Fe_2O_3) ἢ γκαϊτίτη ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), (εἰκ. 11).

Οἱ κυριότερες προσμίξεις εἶναι ψευδάργυρος καὶ μόλυβδος σὲ μορφή ἀνθρακικῶν ὀρυκτῶν.

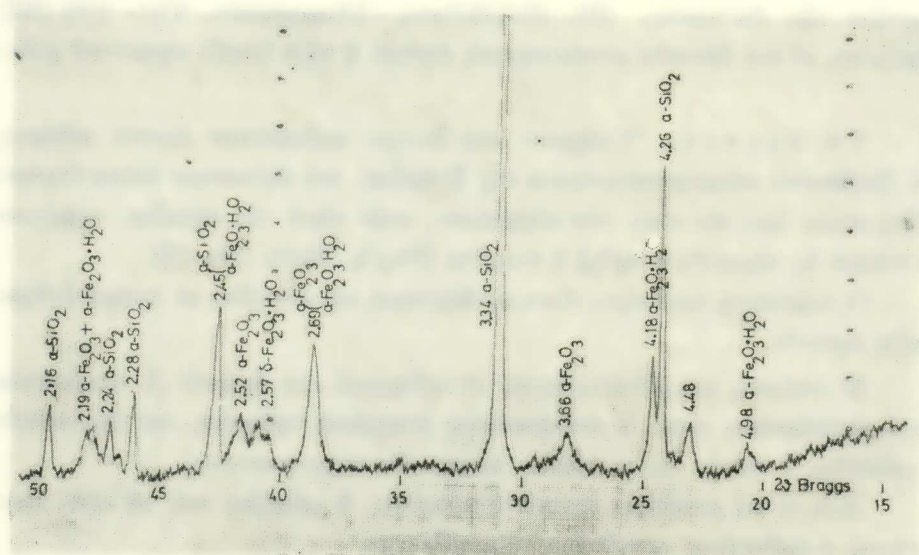
Ἡ ἀνάλυση τοῦ μεταλλεύματος με φθορισμὸ τῶν ἀκτίνων X ἀποδεικνύει ὅτι ὁ ψευδάργυρος εἶναι ἡ σπουδαιότερη μεταλλικὴ πρόσμιξη, καὶ ἀκολουθοῦν ὁ μόλυβδος, ὁ χαλκὸς καὶ τὸ νικέλιο, σὲ χαμηλὲς περιεκτικότητες.

Ἀπὸ τὰ μὴ μεταλλικὰ ὀρυκτὰ ὁ φθορίτης, ὁ χαλαζίας καί, σὲ λίγες περιπτώσεις, ὁ ἀσβεστίτης συνοδεύουν τὸ μέταλλευμα.

Ὅρισμένα τεμάχια μεταλλεύματος σιδήρου πού συλλέξαμε στὴν περιοχὴ τῶν εὐρημάτων δείχνουν ὅτι πρόκειται γιὰ αἱματίτη καὶ λειμωνίτη ἐξαιρετικῆς καθαρότητος. Καὶ οἱ ἀρχαῖοι διάλεξαν, ὅπως ἀποδεικνύεται ἀπὸ τὶς ἀναλύσεις τῶν συντηγμάτων, καθαρὸτατα μεταλλεύματα (εἰκ. 12).



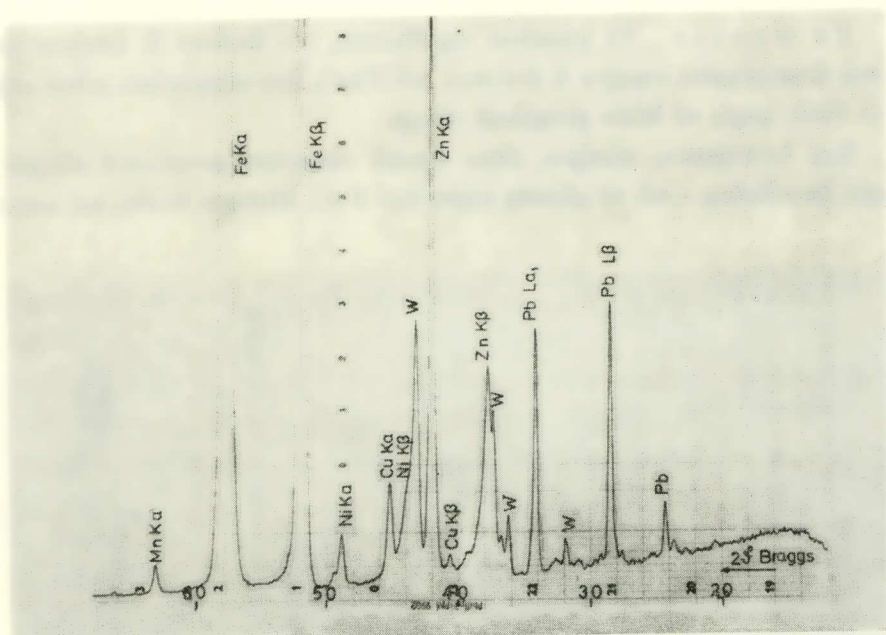
α



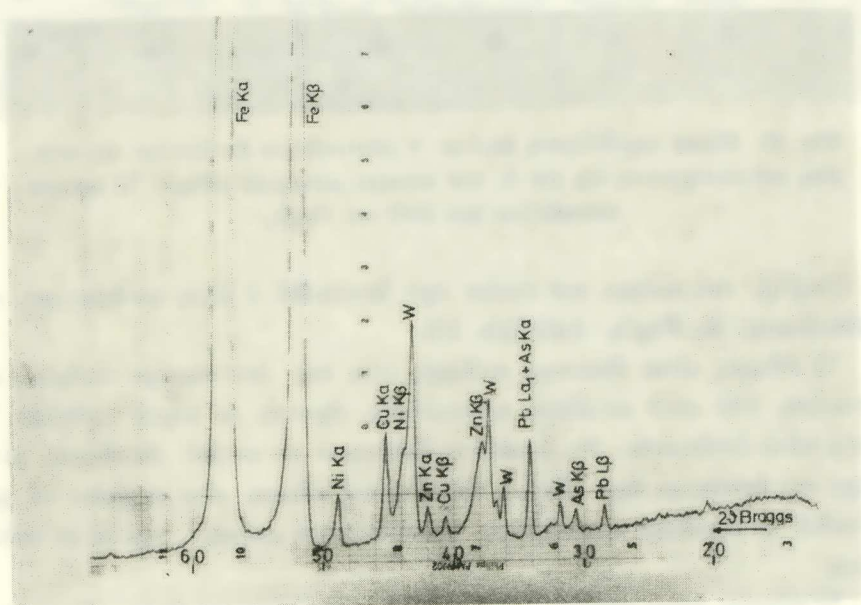
β

Εικ. 11. Φάσματα περιθλάσεως ακτίνων X (άκτινοβολία Κα του Κοβαλτίου) επί σιδηρομεταλλευμάτων της Σούρτζας.

- α) Πλούσιο λειμωνιτικό μετάλλευμα, αποτελούμενο κυρίως από γκαϊτίτη ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) και αίματίτη (Fe_2O_3).
- β) Πτωχότερο μετάλλευμα αίματίτου - λειμωνίτου που περιέχει και SiO_2 .



α



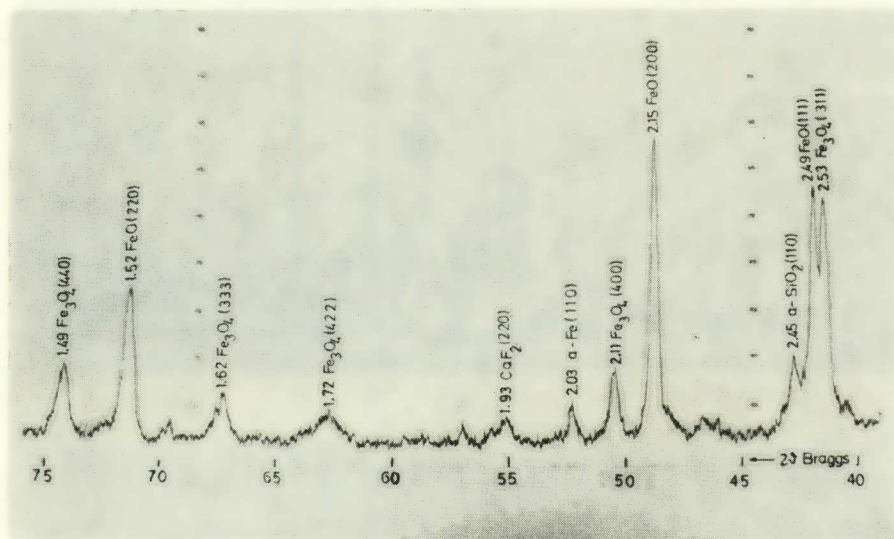
β

Είχ. 12. Φάσματα φθορισμού των άκτινών X (άκτινοβολία W, άναλυτής LiF) επί της σκωρίας και του μεταλλικού σιδήρου του συντήγματος της είχ. 3).

α) Σκωρίας. β) Μεταλλικού σιδήρου.

Τὸ π ρ ο ῖ ο ν . Τὰ φάσματα περιθλάσεως τῶν ἀκτίνων X ἀποδεικνύουν ὅτι στὰ ἀποτυχημένα τεμάχια ἡ ἀναγωγή τοῦ Fe_2O_3 ἔχει προχωρήσει μόνον μέχρι ὡς τὸ FeO , χωρὶς νὰ δώσει μεταλλικὸ σίδηρο.

Στὰ ἐπιτυχημένα τεμάχια, ὅπου ἔχουμε παραγωγή μεταλλικοῦ σιδήρου ἡ σκωρία ἀποτελεῖται κατὰ τὸ μέγιστο μέρος ἀπὸ FeO . Περιέχει ἐπίσης καὶ μαγνη-



Εἰκ. 13. Φάσμα περιθάλψεως ἀκτίνων X (ἀκτινοβολία $\text{K}\alpha$ Co) ἐπὶ τῆς σκωρίας τοῦ συντήγματος τῆς εἰκ. 3, πού περιέχει μεταλλικὸ σίδηρο. Ἡ σκωρία ἀποτελεῖται ἀπὸ FeO καὶ Fe_3O_4 .

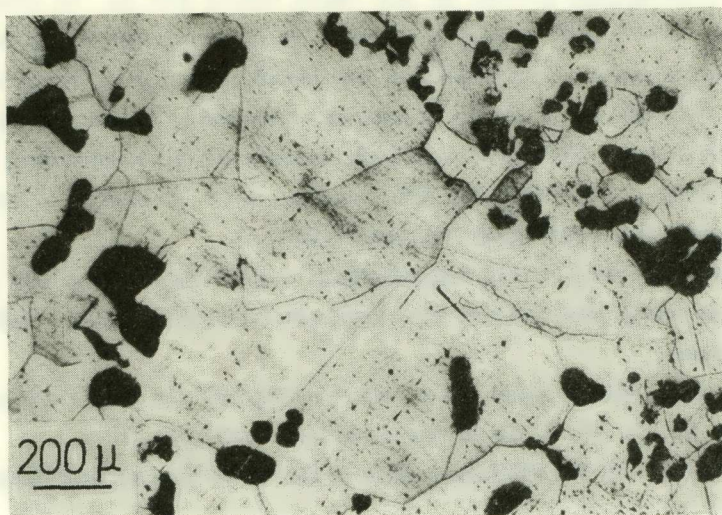
τίτη (Fe_3O_4), στὸ πλέγμα τοῦ ὁποίου ἔχει δεσμευθεῖ ὁ λίγος ψευδάργυρος τοῦ μεταλλεύματος, ὡς $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZnO}$ (εἰκ. 13).

Ὁ σίδηρος εἶναι ἰδιαίτερα καθαρὸς (εἰκ. 14). Δὲν περιέχει ἄνθρακα καὶ ἀποτελεῖται ἀπὸ πολὺ μεγάλους κρυστάλλους, ὁρατοὺς μὲ γυμνὸ ὀφθαλμὸ. Τὸ γεγονός αὐτὸ ἀποδεικνύει ὅτι ἡ κάμιμος ἀφηνόταν νὰ ψυχθεῖ ἐλευθέρως μὲ τὸ τεμάχιο στὸ ἐσωτερικὸ τῆς. Ἔτσι ὁ παραγόμενος σίδηρος εἶχε τὸ χρόνο νὰ κρυσταλλωθεῖ σὲ μεγάλους κρυστάλλους, ἦταν ἰδιαίτερα μαλακός, καὶ ὡς ἐκ τούτου ὄλκιμος.

Ὁ σίδηρος, ὅπως προέκυψε ἀπὸ ἀνάλυση φθορισμοῦ μὲ ἀκτίνες X, περιέχει 0.05% Ni καὶ 0.12% Cu , καθὼς καὶ ὀλίγο Zn καὶ Pb . Δὲν περιέχει καθόλου Si καὶ Mn (εἰκ. 12β).

Στὰ συντήγματα ἡ σκωρία φαίνεται ὅτι δὲν ἔφθανε σὲ κατάσταση ἀρκετῆς ρευστότητας.

Ἐνα ἄλλο γεγονός εἶναι ἐξαιρετικῶς ἐνδιαφέρον. Δὲν ὑπάρχει καθόλου χυτοσίδηρος. Τοῦτο ἀποδεικνύει ὅτι οἱ ἀρχαῖοι ἀπέφευγαν νὰ δημιουργοῦν μέσα



Εἰκ. 14. Μικροφωτογραφία σπογγώδους σιδήρου $\times 50$. Ἐντιδραστήριο Nital. Εὐμεγέθεις κόκκοι σιδήρου καὶ πόροι.

στὴν κάμινο ὑψηλῆς θερμοκρασίας, ποὺ θὰ ὀδηγοῦσαν σὲ μεγάλη ρευστότητα τῆς σκωρίας καὶ ἐνανθράκωση τοῦ προϊόντος, μὲ παραγωγή τοῦ εὐθραυστου καὶ ἀνεπιθύμητου χυτοσίδηρου.

II. 3. Τὰ ἀρχαῖα κείμενα.

Ἡ ὁρθότητα τῆς ἐρμηνείας μας ἐπιβεβαιώνεται ἀπὸ ἀρχαῖα κείμενα :

Τὸ σπουδαιότερο εἶναι τοῦ Ἰπποκράτη, ἀπὸ τὸ βιβλίον του περὶ Ἀσθeneϊῶν, ποὺ θεωρεῖται ὅτι ἀνήκει στὸ τέλος τοῦ 5ου ἕως τις ἀρχές τοῦ 4ου αἰώνα. Τὸ σχετικὸ ἀπόσπασμα παραβάλλει τὸ σχηματισμὸ τῆς λιθιάσεως μὲ τὴ συσσωμάτωση τοῦ σιδήρου [18] :

«ὥσπερ σίδηρος ἐκ τῶν λίθων καὶ τῆς γῆς συγκαιομένης γίνεται, καὶ ἐν μὲν τῇ πρώτῃ ἐς τὸ πῦρ ἐμβολῆ, κεκόλληται τῇ σκωρίῃ οἱ λίθοι καὶ ἡ γῆ πρὸς ἄλληλα. Καὶ ἐπὶ τὸ δεύτερον καὶ τὸ τρίτον ἐς τὸ πῦρ ἐμβληθῆ, ἡ μὲν σκωρίῃ ἔξω ἔρχεται τηκομένη ἐκ τοῦ σιδήρου καὶ ὄψει ὁρᾶται τὸ γενόμενον, ὃ δὲ σίδηρος λιμπάνεται (δηλ. ὑπολείπεται) ἐν τῷ πυρὶ καὶ συμπίπτει προσδιδοῦσης τῆς σκωρίῃς καὶ γίνεται στερεὸς καὶ πικνός».

Ἀπὸ τὸ κείμενο αὐτὸ διαπιστώνουμε τὴν ὕπαρξη τριῶν χωριστῶν σταδίων : Τὸ πρῶτο στάδιο εἶναι ἡ παραγωγή σιδήρου, σὲ μίγμα μὲ τὴ σκωρία. Εἶναι τὸ στάδιο πὸν περιγράψαμε ὅτι γινόταν στὴ φρεατώδη κάμινο ἀναγωγῆς τῆς εἰκ. 6.

Τὸ δεύτερο καὶ τρίτο στάδιο ἀναφέρεται στὴ σφυρηλάτηση τοῦ σιδήρου, πὸν ὅπως ὑποστηρίξαμε γινόταν σὲ μιὰ εἰδικὴ κάμινο (εἰκ. 5). Ἡ ἀναφορὰ τοῦ Ἱπποκράτη σὲ 2^ο καὶ 3^ο στάδιο, νομίζουμε ὅτι εἶναι σχετικὴ μὲ τὶς διαδοχικὲς σφυρηλατήσεις. Κατὰ τὴ σφυρηλάτηση τοῦ διαπύρου τεμαχίου ἔβλεπε κανεὶς τὴ σκωρία νὰ διαχωρίζεται σὲ σχεδὸν τετηγμένη κατάσταση, ἐνῶ ὁ σίδηρος γινόταν «στερεὸς καὶ πυκνὸς» λόγῳ ἀφαιρέσεως τῆς σκωρίας ἐκ τῆς σφυρηλασίας.

Ἡ Ὁσίχιος σὲ τὸ λεξικὸ τοῦ [19] ἀναφέρει ὅτι : «ἐλατρεύς : ὁ τὴν τρίτην πύρωσιν ἔχων τοῦ σιδήρου παρὰ τοῖς μεταλλεύσιν».

Θεωρεῖ δηλ. ὅτι ἡ τελικὴ σφυρηλάτηση, γιὰ τὴ διαμόρφωση τῶν τεμαχίων γιὰ χρησιμοποίησι, ἐπακολουθεῖ δύο προηγούμενα στάδια. Τοῦτο ἐπιβεβαιώνει ὅσα ἀναφέραμε.

Μιὰ τέτοια τελικὴ σφυρηλασία εἶναι γνωστὴ ἀπὸ τὴν παράσταση σὲ ἀττικὸ ἀγγεῖο (εἰκ. 8), γιὰ τὴν ὁποία μιλήσαμε καὶ στὴν παράγραφο I. 3.

Σχετικὸ μὲ τὴν ἐνανθράκωση εἶναι πιθανῶς τὸ κείμενο τοῦ Θεοφράστου :

«τὸ δὲ ἀγγεῖον ἐν ᾧ κατακεράννυσιν τὸν σίδηρον περίοδος καλεῖται . . .» [20].

Ἡ λέξις «κατακεράννυσιν» σημαίνει «κρᾶσιν».

Καὶ ἡ ἐνανθράκωση εἶναι οὐσιαστικῶς «κρᾶσις» τοῦ σιδήρου μὲ τὸν ἄνθρακα, πὸν δίνει χάλυβα.

Τίθεται ἀκόμη τὸ ἐρώτημα ἂν οἱ ἀρχαῖοι χρησιμοποιοῦσαν συλλιπάσματα, ἐπὶ παραδείγματι μάρμαρο (ἀσβεστίτη) ἢ ἄλλα, ὅπως ἀναφέρεται ἀπὸ δύο ἀρχαίους συγγραφεῖς, τὸν Θεόφραστο [21] καὶ τὸν Πλούταρχο [22]

Θεοφράστου, Περὶ λίθων, 9.

«κατὰ δὲ τὴν πύρωσιν οἱ μὲν (λίθοι) τήκονται καὶ ρέουσιν ὡσπερ οἱ μεταλλευτοί. ρεῖ γὰρ ἅμα τῷ ἀργύρῳ καὶ τῷ χαλκῷ καὶ σιδήρῳ καὶ ἡ λίθος ἢ ἐκ τούτων, εἴτ' οὖν διὰ τὴν ὑγρότητα τῶν ἐνυπαρχόντων εἴτε καὶ δι' αὐτούς. Ὡσαύτως δὲ καὶ οἱ πυρομάχοι καὶ οἱ μυλῆαι συρρέουσιν οἷς ἐπιτιθέασιν οἱ καίοντες».

Πλούταρχου, De prim. frigid. 19.

«οἱ χαλκεῖς τῷ πυρομένῳ καὶ ἀνατηκομένῳ σιδήρῳ μάρμαρον καὶ λατύπην παραπάσσουσι, τὴν πολλὴν ρύσιν ἐφιστάντες καὶ καταψύχοντες».

ἐπίσης, τοῦ ἰδίου, Qu. con v. III, 4.

«ὥσπερ ὁ μάρμαρος τοῦ διαπύρου σιδήρου τὸ καταψύχειν τὴν ἄγαν ὑγρότητα καὶ ῥύσιν ἀφαιρῶν εὔτονον ποιεῖ τὸ μαλασσόμενον αὐτοῦ καὶ τυπούμενον».

Ἐκ τῆς ἐξέτασης τῶν συντηγημάτων φαίνεται ὅτι οἱ ἀρχαῖοι προσέθεταν στὴν κάμινο ὀλίγο φθορίτη, γιὰ τὴν ταπείνωση τοῦ σημείου τήξεως τῆς σκωρίας. Ὁ φθορίτης ἀφθονεῖ στὴν περιοχὴ τῆς Σούρτζας καὶ τοῦ Λαυρίου.

Ὁλίγος φθορίτης ἀνιχνεύθηκε στὴ σκωρία τῶν τεμαχιῶν ποὺ περιέχουν μεταλλικὸ σίδηρο, καὶ σὲ ὁρισμένα ἀπὸ τὰ ἀποτυχημένα συντήγματα, ὅπου βρέθηκε στὴν ἐπιφάνεια τοῦ συντήγματος ὑπὸ μορφὴ τεμαχιδίων (βλέπε εἰκ. 7).

Ὅπως ἀναφέρουμε στὴν ἀνακοίνωσή μας γιὰ τοὺς συνδέσμους τοῦ Ἐρεχθίου [4], ὁ σίδηρος ποὺ παραγόταν στὸ Λαύριο χρησιμοποιήθηκε γιὰ τὴν κατασκευὴ τῶν συνδέσμων αὐτῶν.

Τὸ γεγονός αὐτὸ τὸ ἀποδείξαμε μὲ σύγκριση τῶν φασμάτων φθορισμοῦ τῶν ἀκτίνων X ποὺ δίνει τὸ μέταλλο τῶν συνδέσμων καὶ τὸ μέταλλο τῶν μεταλλικῶν συντηγημάτων. Ἀποδεικνύεται ὅτι καὶ στὶς δύο περιπτώσεις, ἔχουμε τὶς ἴδιες ἀκαθαρσίες: Ni, Cu (καὶ λίγο Zn καὶ Pb). Βλ. τὴ σχετικὴ ἀνακοίνωσή μας [4].

Ἀποδεικνύεται ἔτσι ὅτι ἡ παραγωγὴ σιδήρου πρέπει νὰ ἦταν σημαντικὴ ἀπὸ ἀπόψεως ποσότητας καὶ ποιότητας στὸ Λαύριο καὶ ὅτι παραγόταν σίδηρος καὶ γιὰ τὶς ἀνάγκες τῶν Ἀθηνῶν. Καὶ τοῦτο ἦταν φυσικό.

Ἡ σπουδαιότητα τοῦ σιδήρου ἦταν πολὺ μεγάλη στὴν περιοχὴ τοῦ Λαυρίου, γιὰ τὴ συνεχῆ κατασκευὴ ἐργαλείων σιδήρου καὶ χάλυβος χρήσιμων γιὰ τὴν ὀρυξὴ στοῶν καὶ φρεάτων στὰ μεταλλεῖα τοῦ «ἀργυρίτου».

R É S U M É

Dans cette communication, nous présentons les techniques utilisées par les Grecs anciens en Attique, pendant la période classique, pour produire du fer et de l'acier.

Le fer, l'acier et l'acier trempé sont maintes fois mentionnés par des auteurs aussi anciens qu'Hésiode et Homère [5 - 11]. Or, peu de textes anciens fragmentaires se réfèrent à la technique inconnue de production de ces métaux [17 - 22].

Nous avons pu établir de façon détaillée les étapes successives de l'extraction du fer à partir de ses minerais et de la production consécutive

de l'acier, grâce à l'examen détaillé d'un nombre important de trouvailles et de données.

1. Nous avons examiné 15 loupes en minerai de fer ayant subi une réduction très avancée des oxydes de fer (fig. 1, 2). Deux des loupes contenaient du fer métallique spongieux (fig. 3, 4). Les loupes ont été retrouvées lors des fouilles décrites en détail dans «Le Laurium antique et la technique grecque de la production de l'argent» du prof. C. Conophagos [12].

2. Nous avons examiné huit pièces en acier, crampons en double T et goujons servant à l'assemblage des blocs de l'Erechtheion. Il en est question dans une seconde communication à l'Académie [14].

3. Nous avons aussi étudié des textes anciens se référant à la métallurgie du fer [17 - 22] et des scènes figurant sur des vases attiques ou autres céramiques, qui représentent des artisans au travail dans des ateliers comportant des fours (fig. 5 et 8).

La production du fer comprenait deux phases.

Dans la première, les minerais riches en fer, constitués d'hématite et de limonite, fig. 11, subissaient une réduction par du charbon de bois dans un four vertical, fig. 6.

Le produit de la réduction était une loupe de fer spongieux et de scories, fig. 7.

La deuxième phase consistait en l'élimination de la scorie par liquéfaction et martelage répété, après chauffage dans un four vertical à charbon, actionné par des soufflets. Nous considérons que c'est cette phase qui est représentée par la scène figurant sur l'oenoché de Londres (fig. 5).

D'après l'examen des crampons de l'Erechtheion, la production de l'acier se faisait par cémentation de feuilles de fer de faible épaisseur. La cémentation devait se faire en chauffant à 800 ou 900°C les feuilles de fer en présence de charbon de bois finement broyé, dans des pots scellés en céramique.

Ces températures étaient celles pratiquées couramment dans les fours à céramiques, et ce même type de four devait servir pour la cémentation. Nous considérons que le four représenté en partie sur le

côté gauche de la scène du vase attique, fig. 8, rend cette opération dans une forge.

La production du fer spongieux était une opération délicate. Les loupes constituées uniquement d'oxydes de fer représentent des traitements de réduction manqués. Par contre les loupes de fer spongieux proviennent des traitements réussis.

Notre interprétation est en accord avec des textes anciens [17 - 22]. Le plus important est celui d'Hippocrate, mentionnant les étapes successives de réduction et d'élimination de la scorie par martelage. Hésychios, dans son dictionnaire, suggère que le chauffage final de fer, destiné au formage, succède à deux autres étapes de chauffage. Il s'agit, selon notre interprétation, de la réduction et de l'élimination des scories.

La production de l'acier par cémentation est également mentionnée par Hésychios. Il parle d'un vase où l'on forme un alliage de fer. La cémentation est effectivement formation d'alliage du fer avec le carbone, et comme nous l'avons soutenu, elle devait se faire dans un pot scellé, en présence de charbon de bois broyé.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. T. A. Ricard, The Primitive Smelting of Iron. American Journal of Archaeology, XLIII (1939) 85.
2. Γ. Ι. Βαρουφάκη, 'Ερευνητική 'Εργασία ἐπὶ τριῶν σιδηρῶν λογῶν τοῦ 7ου καὶ 6ου αἰῶνος π. Χ. 'Αρχαιολογικὸν Δελτίον **25** (1970) 100 καὶ Archiv. für das Eisenhüttenwesen **41** (1970) A 1023.
3. Κ. Λιβαδεύς ('Ανακ. Α. Βουρνάζου), 'Επὶ τῆς μεταλλουργίας τοῦ σιδήρου τοῦ Παρθενῶνος καὶ τῆς ἐρμηνείας χρήσεως ἀρχαίας καμίνου. Πρακτικὰ 'Ακαδ. 'Αθηνῶν (1943), σ. 338 - 343.
4. Κ. Κονοφάγου - Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Οἱ Χαλύβδινοι Σύνδεσμοὶ τοῦ 'Ερεχθείου κατασκευάσθησαν μὲ τεχνικὴ πού ξαναβρίσκεται στὸ Μεσαίωνα στὰ «Δαμασκηνὰ Σπαθιά». 'Ανακοίνωση, σύγχρονη μὲ τὴν παρούσα, στὴν 'Ακαδημία 'Αθηνῶν.
5. Πλούταρχος, π. Χ. Quaestionum convivalium, Συμποσιακῶν βιβλία Θ', VIII, 9, 3:
«σαρκὸς καθάπερ σιδήρου πυρὶ μαλασσομένης καὶ ρεούσης, εἶτα βαφὴν ὑπὸ ψυχροῦ καὶ στόμωσιν ἀναδεχομένης».
 ἐπίσης: de defectu oraculorum, Περὶ τῶν ἐκλελοιπῶτων χρηστηρίων 41, 47.
 De primo frigido, Περὶ τοῦ πρώτως ψυχροῦ 2, 20, κ.λπ.

6. Philon, De Somn. I, 6: *Περὶ τοῦ Θεοπέμπους εἶναι τοὺς ὄνειρους «οἷα σίδηρος ἐν χαλκῆως πεπτρωμένος ὕδατι ψυχρῷ, πρὸς τὸ κραταιότερον στομῶται».*
7. Ἴπποκράτης, De vict. rat. I, 4: *Περὶ διαίτης «τὸν σίδηρον περιτήκουσι πνεύματι ἀναγκάζοντες τὸ πῦρ, τὴν ὑπάρχουσαν τροφὴν ἀφαιρέοντες, ἀραιὸν δὲ ποιήσαντες παίουσι καὶ συνελαύνουσιν, ὕδατος δὲ ἄλλον τροφὴ ἰσχυρὸν γίνεται».*
8. Ἀριστοτέλης, Μετεωρολογικὰ IV, 6: *«τῆκεται δὲ καὶ ὁ εἰργασμένος σίδηρος, ὥστε ὑγρὸς γίνεσθαι καὶ πάλιν πῆγνυσθαι. καὶ τὰ στομῶματα ποιοῦσιν οὕτως· ὑφίσταται γὰρ καὶ ἀποκαθαίρεται κάτω ἢ σκωρία· ὅταν δὲ πολλάκις πάθῃ καὶ καθαρὸς γίνηται, τοῦτο στόμωμα γίνεται. οὐ ποιοῦσι δὲ πολλάκις αὐτὸ διὰ τὸ ἀπουσίαν γίνεσθαι πολλὴν καὶ τὸν σταθμὸν ἐλάττω ἀποκαθαίρομενον. ἔστι δ' ἀμείνων σίδηρος ὁ ἐλάττω ἔχων ἀποκαθαίρεισιν».*
9. Ὀμηρος, I 391: *«ὡς δ' ὅτ' ἀνὴρ χαλκὸς πέλεκυν μέγαν ἠὲ σκέπαρον εἰν ὕδατι ψυχρῷ βάπτῃ μεγάλα ἰάχοντα φαρμάσειν· τὸ γὰρ αὐτε σιδήρου γε κράτος ἐστίν».*
10. Ἡσίοδος, Θεογονία 161, 188, 239. Ἔργα 147.
11. Ἡροδότου, VII 141.
12. Κ. Κονοφάγου, Τὸ Ἀρχαῖο Λαύριο καὶ ἡ Ἑλληνικὴ Τεχνικὴ Παραγωγὴ Ἀργύρου. Ἀθῆναι, Ἐκδοτικὴ Ἑλλάδος (1980).
13. P. Spitaels, Insula 3: The finds and their chronological interpretation. (παράγραφος 3.1, Methods and Remarks, σελ. 66). «Thorikos» VII, 1970-1971. Gent (1978).
14. Κ. Κονοφάγου - Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Ἑρμηνεία τοῦ χρησιμοποιουμένου ἀγγείου ἀπὸ τοὺς Ἀρχαίους Ἑλληνες στὸ στόμιο τῶν καμίνων κατὰ τὴν κλασσικὴ περίοδο. Σύγχρονη μὲ τὴν παρούσα ἀνακοίνωση στὴν Ἀκαδημία Ἀθηνῶν.
15. Δ. Μούσουλος, Ἑξαγωγικὴ Μεταλλουργία. Τόμος I, II. Ἀθῆναι (1969).
16. Κ. Κονοφάγος, «Μεταλλογνωσία», Τόμος I (1964), II (1965), III (1967). Ἀθῆναι.
17. Πολυδεύκουσ, Ὀνομαστικόν. VII - 108.
18. Ἴπποκράτους, Περὶ Ἀσθενειῶν, βιβλίον IV.
19. Ἡσύχιος, Λεξικόν.
20. Θεόφραστος, Περὶ Μετάλλων 261 (ἢ Πολυδεύκουσ VII, 99).
21. Θεόφραστος, Περὶ Λίθων, 9.
22. Πλούταρχος, De primo frigido 19 καὶ Qu. con. III, 4.
23. T. Wertime - J. Muhly, «The Coming of the Age of Iron». New Haven and London Univ. Press (1980), τὸ ὅποιο περιέχει ὀλοκληρωμένη βιβλιογραφία, σχετικὰ μὲ τὴν ἱστορία τῆς τεχνικῆς παραγωγῆς σιδήρου καὶ χάλυβος.