

τέλη 4ου
έως
1ος αι. π.Χ.

Φαίνεται ότι γύρω στο 260 π.Χ. άρχισε μια περίοδος παρακμής για τα μεταλλεία της Λαυρεωτικής που είχαν χρηματοδοτήσει την αθηναϊκή δημοκρατία. Ο Στράβων μαρτυρεί ότι στο τέλος του 1ου αιώνα π.Χ. τα μεταλλεία είχαν επικεντρωθεί στην ανάκτηση αργύρου από την ανακύκλωση των απορριμμάτων που είχαν σωρευτεί στη διάρκεια των κλασικών χρόνων. Απαιτήθηκε όμως η δημιουργία μιας νέας τεχνολογικής εφαρμογής: Τα κυκλικά τριβεία παρέτειναν τις μεταλλουργικές δραστηριότητες των αρχαίων για δύο τουλάχιστον αιώνες.

ΤΑ ΚΥΚΛΙΚΑ ΤΡΙΒΕΙΑ ΤΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ

— Η συμβολή τους
στην παραγωγή αργύρου
και μολύβδου

01

Κυκλική κατασκευή αρχαίου τριβείου στο Δημολιάκι. Ισχυρά διαταραγμένη, έχει συναρμολογηθεί από τεμάχια μαρμάρου. Το αυλάκι στην άνω επιφάνεια φέρει συνεχόμενες κοιλότητες και οι αρμοί του δεν έχουν στεγανοποιηθεί. Φωτογραφία του συγγραφέα.

ΓΙΩΡΓΟΣ Δ. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Διπλ. Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργός, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Το ιστορικό πλαίσιο των μεταλλείων μετά το τέλος του 4ου αι. π.Χ.

Περί το τέλος του 4ου αιώνα π.Χ. επέρχεται ραγδαία πτώση της μεταλλευτικής δραστηριότητας στη Λαυρεωτική, όπως επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι από το 307 π.Χ. και μετά δεν απογράφονται νέες παραχωρήσεις μεταλλείων από το κράτος σε ιδιώτες¹. Σε αυτό συνέβαλε η εξάντληση των εύκολων στην εξόρυξη κοιτασμάτων μικρού βάθους², η κυριότερη όμως αιτία ήταν η πολιτική αστάθεια. Είναι πιθανόν ότι τα μεταλλεία έπαυσαν σταδιακά να λειτουργούν από την αρχή του 3ου αιώνα π.Χ., τα τελευταία ίσως μετά την απαγόρευση κοπής νομισμάτων από τον Αντίγονο Γονατά το 262 π.Χ. Η άποψη αυτή ενισχύεται από τις ανασκαφές της Βελγικής Αρχαιολογικής Σχολής στον Θορικό, κατά τις οποίες λύχνοι που βρέθηκαν μέσα σε στοές του μεταλλείου χρονολογούνται το αργότερο μέχρι το 260 π.Χ.³

Μετά από μια παρατεταμένη περίοδο αργίας των μεταλλείων και των προσαρτημένων σε αυτά εργαστηρίων, η ανάκαμψη άρχισε ίσως στις αρχές του 2ου αιώνα π.Χ., όταν οι Αθηναίοι ανέκτησαν σε κάποιο βαθμό την ανεξαρτησία τους και έκοψαν ξανά αργυρά νομίσματα, τα τετράδραχμα *new style*. Τότε ίσως άρχισαν να λειτουργούν και τα μεταλλεία, αν και αυτό δεν είναι αρχαιολογικά επιβεβαιωμένο. Στα αρχαία κείμενα, η μοναδική μνεία σε μεταλλεία προέρχεται από τον Ποσειδώνιο —μέσω του Αθήναιου— και αναφέρεται σε επανάσταση των δούλων στο τέλος του 2ου αιώνα π.Χ., κατά την οποία οι στασιαστές φόνευσαν «τους επί των μετάλλων φύλακας»⁴ και οχυρώθηκαν στο Σούνιο. Ωστόσο η λέξη «μετάλλων» —που στην αρχαιότητα σήμαινε «μεταλλείων»— μπορεί εδώ να χρησιμοποιείται ως τοπωνύμιο χαρακτηρισμού της περιοχής, χωρίς να εννοεί οπωσδήποτε εν ενεργεία μεταλλεία. Όσον αφορά, όμως, τα εργαστήρια εμπλουτισμού μεταλλευμάτων⁵ και τα συγκροτήματα καμινείας⁶, διαπιστώθηκε από ανασκαφές ότι πολλά από αυτά ήταν ενεργά στη διάρκεια της Ελληνιστικής και της Ρωμαϊκής περιόδου⁷.

Ως προς τη φύση των δραστηριοτήτων στην εποχή της παρακμής των μεταλλείων είναι διαφωτιστική η αναφορά του Στράβωνος, ο οποίος περιγράφει την κατάσταση στη Λαυρεωτική στο τέλος του 1ου αιώνα π.Χ. Σύμφωνα με αυτή, πηγή αργύρου δεν ήταν πλέον η εξόρυξη μεταλλεύματος από τα μεταλλεία, αλλά η ανακύκλωση απορριμμάτων — εκβολάδων και σκωριών⁸. Η ανακύκλωση απορριμμάτων ήταν σαφώς ευκολότερη από την εκμετάλλευση των μεταλλείων και χωρίς επιχειρηματικούς κινδύνους, καθώς απορρίμματα υπήρχαν άφθονα και, σε



αντίθεση με τα υπόγεια μεταλλεύματα, ήταν ορατά στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι εκβολάδες ήταν τεμάχια πολύ φτωχού μεταλλεύματος, που είχαν εξαχθεί από τα μεταλλεία και είχαν απορριφθεί κατά τη χειροδιαλογή κοντά στην έξοδο στούν και φρεάτων. Περιείχαν μόνο 6–7% μόλυβδο, αλλά μπορούσαν να υποστούν κατεργασία εμπλουτισμού στα παλιά συγκροτήματα επίπεδων πλυντηρίων χωρίς καμία αλλαγή τεχνικής, επειδή αποτελούνταν από τα ίδια ορυκτά με το πλούσιο πρωτογενές μέταλλο. Όσο για τις σκωρίες, οι οποίες είχαν σωρευτεί και αυτές στη διάρκεια των κλασικών χρόνων, τα αποθέματά τους ήταν πολύ μεγάλα, περί τα 2 εκατομμύρια τόνους, και είχαν αρκετά υψηλή περιεκτικότητα σε μόλυβδο, κατά μέσον όρο 10,5%, αλλά ήταν φτωχές σε άργυρο, με περίπου 40 γρ. αργύρου ανά τόνο σκωρίας. Ο Κορδέλλας, που συνέλαβε την ιδέα να τις ανατρίξει στα μέσα του 19ου αιώνα, διαπίστωσε ότι μόνο μικρές ποσότητες είχαν αναληφθεί κατά την αρχαιότητα από τους σωρούς για ανάτριξη, επειδή ήταν δύσπικτες και η διαδικασία δύσκολη⁹. Στις σκωρίες στις οποίες αναφέρεται ο Στράβων, εμείς πάντως πρέπει να συμπεριλάβουμε και το λιθαργύρο, ο οποίος ήταν είδος σκωρίας που παραγόταν στη διάρκεια της κυπέλλωσης¹⁰.

Επομένως, σύμφωνα με τα δεδομένα που διαθέτουμε, στην περίοδο παρακμής των μεταλλείων, οι δραστηριότητες παραγωγής αργύρου επικεντρώθηκαν στην εκμετάλλευση παλαιών απορριμμάτων, ανεξαρτήτως εάν δευτερευόντως λειτουργούσαν κατά περιόδους και μεταλλεία. Αυτή η ανατρεπτική αλλαγή στις πηγές παραγωγής μετάλλων δημιούργησε την ανάγκη αναπροσαρμογής της παραγωγικής διαδικασίας των κλασικών χρόνων και υπήρξε κίνητρο για την ανάπτυξη εξειδικευμένης τεχνολογίας ανακύκλωσης. Στη συνέχεια του άρθρου θα εξετάσουμε τις νέες τεχνικές που εφαρμόστηκαν και τον ιδιαίτερο ρόλο που έπαιξε στην ανάκτηση αργύρου από απορρίμματα η εισαγωγή μιας νέας τεχνολογικής εφαρμογής, των κυκλικών τριβείων της Λαυρεωτικής, η οποία παρέτεινε τις μεταλλουργικές δραστηριότητες των αρχαίων για δύο τουλάχιστον αιώνες.

Τα κυκλικά τριβεία της Λαυρεωτικής και οι αρχικές υποθέσεις

Στην περιοχή των αρχαίων μεταλλείων της Λαυρεωτικής υπάρχουν κατασκευές κυκλικής μορφής από επιμελώς συναρμολογημένα τεμάχια μαρμάρου, οι οποίες φέρουν στην άνω επιφάνειά τους ένα αυλάκι διαμέτρου περίπου 6,5 μ. (20 αρχαίων ολυμπιακών ποδών) και πλάτους 15–20 εκ. Στις περισσότερες περιπτώσεις μέσα στο αυλάκι είχαν σκαλιστεί συνεχόμενες κοιλότητες διαμέτρου περίπου 15 εκ. και διαφορετικού βάθους, οι οποίες έχουν σαφή ίχνη φθοράς. Εκτός από τρεις κατα-

02

Αναπαράσταση λειτουργίας κυκλικού τριβείου με κατακόρυφη μυλόπετρα, που, κινούμενη από γάιδαρο, αλέθει τα τεμάχια λιθαργύρου. Το τριμμένο υλικό μεταφέρεται στη συνέχεια στο επίπεδο πλυντήριο (στο βάθος της εικόνας), προκειμένου να διαχωριστούν και να ανακτηθούν τα ψήγματα αργύρου με ροή νερού πάνω σε ξύλινο ρείθρο.

03α–γ

Τρεις κυκλικές κατασκευές από το Αρύ Λαυρεωτικής σε σχετικά καλή κατάσταση διατήρησης με ακέραια την περιφέρειά τους. Φωτογραφία του συγγραφέα.

σκευές που σώθηκαν σε καλή κατάσταση, οι άλλες έχουν ισχυρά διαταραχθεί: μικρό ή μεγάλο μέρος της περιφέρειάς τους απουσιάζει, τεμάχια μαρμάρου από αυτά που τις συνθέτουν έχουν μετακινηθεί από την αρχική τους θέση, ενώ σε ορισμένες σώζονται μόνο δύο τρία από αυτά. Είναι χαρακτηριστικό ότι όλες οι κατασκευές βρίσκονται σε περιοχές όπου κατά την Κλασική περίοδο σποσδήποτε είχε αναπτυχθεί μεταλλουργική δραστηριότητα, όπως αποδεικνύεται από την παρουσία σκωριών και ενδεχομένως από υπολείμματα αρχαίων καμίνων.

Δύο ισχυρά διαταραγμένες κατασκευές, μία στα Μεγάλα Πεύκα και μία δεύτερη στο Δημολιάκι (εικ. 1), ανέσκαψαν οι Κ. Κονοφάγος και Η. Mussche το 1968, ενώ αποκάλυψαν μερικώς μία τρίτη στο Μπερτσέκο. Στα συμπεράσματά τους υποστήριζαν ότι πρόκειται για ρείθρα που χρησιμοποιούνταν στον εμπλουτισμό λεπτά λειοτριβημένων μεταλλευμάτων αργυρούχου μολύβδου¹¹, στα οποία, δηλαδή, οι αρχαίοι μεταλλευτές απομάκρυναν το στείρο από το χρήσιμο ορυκτό με ροή νερού. Τις κατασκευές αυτές ονόμασαν «ελικοειδή πλυντήρια», επειδή παρατήρησαν ότι είχαν την περιφέρειά τους ανοικτή σε κάποιο μήκος και ενδεχομένως το αυλάκι παρουσίαζε μικρή κλίση και υψομετρική διαφορά περί τα 10 εκ. στα δύο άκρα του, ήταν δηλαδή ελικοειδούς μορφής. Η παρουσία των σκαλιστών κοιλοτήτων στο αυλάκι (Δημολιάκι και Μπερτσέκο) θεωρήθηκε κάτι ανάλογο με τα εμπόδια που παρεμβάλλονται συνήθως στη ροή νερού μέσα στα ρείθρα εμπλουτισμού, ενώ η απουσία τους στα Μεγάλα Πεύκα αποδόθηκε σε μη ολοκλήρωση της κατασκευής. Στην ίδια αιτία αποδόθηκε και η απουσία συστηματικής κλίσης.

Ωστόσο, πέραν της απουσίας συστηματικής κλίσης στο αυλάκι, και άλλα χαρακτηριστικά των κατασκευών είναι ασυμβίβαστα με αυτή την υπόθεση: Καταρχήν, τα τμήματα του αυλακίου πάνω στους διαδοχικούς λίθους δεν έχουν στεγανοποιηθεί μεταξύ τους, όπως θα συνέβαινε αν κυκλοφορούσε νερό. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την τακτική που εφαρμόζαν αδιαλείπτως οι αρχαίοι στα συγκροτήματα εμπλουτισμού, όπου πλυντήρια και δεξαμενές ήταν σχολαστικά στεγανοποιημένα με ειδικό επίχρισμα. Ένα άλλο στοιχείο, για το οποίο διατυπώνεται προβληματισμός και από τους ίδιους τους συγγραφείς, είναι ότι απουσιάζει οποιαδήποτε υδραυλική διάταξη συνδεδεμένη με την εγκατάσταση, όπως η δεξαμενή τροφοδοσίας του υποτιθέμενου ρείθρου και οι αγωγοί νερού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η υπόθεση των «ελικοειδών πλυντηρίων» έγινε αντικείμενο διεξοδικής κριτικής σε μεταγενέστερο άρθρο, το οποίο συνυπέγραψε και ο εκ των αρχικών μελετητών και ανασκαφείς των κατασκευών Η. Mussche¹². Στο άρθρο αυτό εξετάζονται διεξοδικά οι αδυναμίες της υπόθεσης και οι συγγραφείς οδηγούνται στο συμπέρασμα ότι τα «ελικοειδή πλυντήρια ήταν μια πρώιμη δοκιμαστική προσπάθεια των αρχαίων που θεωρήθηκε δαπανηρή και μη παραγωγική και εγκαταλείφθηκε». Ωστόσο, αυτές οι κατασκευές δεν ήταν τόσο σπάνιες όσο θεωρήθηκε αρχικά, και σήμερα έχουν εντοπιστεί δέκα ή και περισσότερες που φαίνεται ότι λειτούργησαν παραγωγικά και όχι δοκιμαστικά.

Ιδιαίτερης σημασίας ήταν οι ανασκαφές της Τσαίμου στην περιοχή Αρύ τη δεκαετία του 2000¹³, οι οποίες έφεραν στο φως τρεις καλά διατηρημένες κατασκευές απολύτως οριζόντιες, κλειστές κυκλικές (εικ. 3), σε αντίθεση με ό,τι θα συνέβαινε εάν επρόκειτο για ρείθρα εμπλουτισμού, όπου το νερό τροφοδοτείται στο ένα άκρο μαζί με το τριμμένο μέταλλευμα και εκρέει από το άλλο. Όσα αναφέρθηκαν αποτελούν αποδείξεις ότι οι κατασκευές δεν ήταν πλυντήρια, ούτε χρησιμοποιούσαν νερό, αλλά χρησιμοποιούνταν για κάποια διαδικασία «εν ξηρώ».

Η Τσαίμου θεώρησε τις κατασκευές που ανέσκαψε διαφορετικές ως προς τη χρήση και τη λειτουργία από αυτές των Κονοφάγου και Mussche. Με βάση την παρατήρηση ότι στη γειτονία μιας κατασκευής εντόπισε «συσσωματωμένο εμπλουτισμένο μέταλλευμα», υποστήριξε ότι ήταν διατάξεις, όπου τριμμένο μέταλλευμα που περιείχε και λιθάργυρο αναμειγνυόταν με άργιλο και νερό με σκοπό να συσσωματωθεί και να πλινθοποιηθεί για την τροφοδοσία των καμίνων μολύβδου. Κατά την ερμηνεία της, η ανάμειξη γινόταν με την κίνηση αναδευτήρων μέσα στο κυ-



04

Κυκλικό τριβείο από την πόλη Blandy-les-Tour της Γαλλίας. Χρησίμευε για την έκθλιψη μήλων προς παραγωγή μηλίτη οίνου και χρονολογείται στον 16ο–17ο αι. Φωτ.: Conseil Général de Seine-et-Marne / Patrick Loison.

05

Τμήμα από το αυλάκι κυκλικού τριβείου (Αρύ III) στο οποίο διακρίνονται σαφώς οι αυλακώσεις που σχηματίστηκαν έξω από αυτό από την κύλιση της μολόπετρας. Στον πυθμένα του αυλακίου διακρίνονται, επίσης, υπολείμματα των κοιλοτήτων που έχουν φθαρεί σχεδόν ολοκληρωτικά κατά τη λειτουργία. Φωτογραφία του συγγραφέα.

06

Τριμμένος λιθάργυρος, συσσωματωμένος από το χρόνο. Φωτογραφία του συγγραφέα.

07

Μακροφωτογραφία από τεμάχιο τριμμένου λιθάργυρου, συσσωματωμένο από το χρόνο, από την περιοχή των κυκλικών τριβείων στο Αρύ. Η διάσταση των κόκκων είναι μικρότερη των 0,2 χιλ. (200 μμ).

κλικό αυλάκι¹⁴. Η παρουσία τριμμένου μεταλλεύματος είναι στοιχείο συμβατό με την υπόθεσή της, αλλά όχι αποδεικτικό, διότι στα συγκροτήματα εμπλουτισμού, όπως αυτό στο οποίο ανήκει και η κυκλική κατασκευή, είναι αναμενόμενο να υπάρχει τριμμένο υλικό και μάλιστα συσσωματωμένο από το χρόνο. Από λειτουργικής πλευράς, η ανάμειξη στερεών υλικών μπορεί να γίνει ευκολότερα στο δάπεδο με φτυάρι, παρά σε αυλάκι με κοιλοότητες, στις οποίες άλλωστε μέρος του υλικού θα εγκλωβιζόταν εμποδίζοντας την ανάμειξη. Επιπλέον η υπόθεση της Τσαίμου δεν υποστηρίζεται με άλλα επιχειρήματα, πέραν της ύπαρξης τριμμένου υλικού, και δεν έχει ιστορικό προηγούμενο, ούτε τεχνολογική συνέχεια στο χρόνο.

Συμπερασματικά, καμία ένδειξη δεν επιτρέπει να κάνουμε διάκριση μεταξύ των διαφόρων κατασκευών ως προς τη μορφή και τη λειτουργία τους. Είναι όμοιες μεταξύ τους ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις και συναντώνται πάντα σε τόπους όπου υπάρχουν τεκμήρια μεταλλουργικής δραστηριότητας. Είναι επομένως εύλογο να θεωρήσουμε ότι εξυπηρετούσαν τον ίδιο σκοπό και αρχικά ήταν όλες οριζόντιες κυκλικές κατασκευές, σε μερικές από τις οποίες τεμάχια μαρμάρου απομακρύνθηκαν από τη θέση τους, όπως συμβαίνει στα περισσότερα αρχαία μνημεία. Είναι πολύ πιθανό κάποιες να καταστράφηκαν από τις εξεγέρσεις των δούλων περί το 100 π.Χ., ενώ άλλες εμφανώς διαταράχθηκαν από τους νεότερους μεταλλευτές στο β' μισό του 19ου αιώνα.

Στο παρόν άρθρο εκθέτουμε επιχειρήματα που τεκμηριώνουν ότι οι δέκα προαναφερθείσες κατασκευές δεν είναι ούτε πλυντήρια ούτε αναμεικτικές διατάξεις, αλλά κυκλικά τριβεία με όρθια μολόπετρα που κυλιέται στο αυλάκι¹⁵. Στη σύγχρονη τεχνική ορολογία τριβεία αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται ως *edge runner mills*, δηλαδή τριβεία με μολόπετρα κινούμενη επί της ακμής της. Στη συνέχεια, θα τοποθετήσουμε τη νέα εφεύρεση στο ιστορικό της πλαίσιο και θα αναδείξουμε τη σχέση της με τις δραστηριότητες ανακύκλωσης παλαιών απορριμμάτων που επικράτησαν μετά την παρακμή των μεταλλείων, δηλαδή μετά το τέλος του 4ου αιώνα π.Χ. και, ιδιαίτερα, στη Ρωμαϊκή περίοδο, όπως αναφέρει και ο Στράβων.

Τρόπος λειτουργίας των κυκλικών τριβείων

Η εικόνα 2 είναι σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας των κυκλικών τριβείων. Μια όρθια μολόπετρα κυλιέται μέσα στο αυλάκι και συντριβεί με το βάρος της το προς άλεση υλικό. Η μολόπετρα περιστρέφεται ελεύθερα με άξονα έναν οριζόντιο βραχίονα, που διαγράφει κυκλική τροχιά γύρω από κολονίσκο στο κέντρο της κατασκευής, καθώς προωθείται είτε με τη μυϊκή δύναμη του ανθρώπου, είτε το πιθανότερο από υποζύγιο.

Η κίνηση μολόπετρας μέσα στο κυκλικό αυλάκι τεκμηριώνεται από την παρουσία αυλακώσεων που σχηματίστηκαν κατά τη συμπτωματική έξοδό της από αυτό και την κύλισή της για ένα διάστημα πάνω στο εσωτερικό κράσπεδο. Αυτό παρατηρείται σαφώς στην κατασκευή του συγκροτήματος Αρύ III και οφείλεται στο ότι, υπό το βάρος της μολόπετρας, μερικοί λίθοι έγειραν προς τα έξω, αποκλίνοντας από την περιφέρεια του κύκλου (εικ. 5). Κατά συνέπεια, η μολόπετρα —ακολουθώντας πάντα την κυκλική της τροχιά— βγήκε από το αυλάκι και χάραξε για ένα διάστημα μια αβαθή αυλακώση δίπλα σε αυτό. Οι αυλακώσεις έχουν λειανθεί από την κύλιση και δεν αφήνουν αμφιβολία ότι δημιουργήθηκαν από την επαναλαμβανόμενη διέλευση τροχού μεγάλου βάρους πάνω στο μάρμαρο, κι αυτός είναι ο λόγος που μοιάζουν με ίχνη τροχών αμάξης σε λιθόστρωτο δρόμο. Σε άλλη κατασκευή, από το συγκρότημα Αρύ IV, η μολόπετρα δεν βγήκε τελείως από το αυλάκι, αλλά προκάλεσε τη διεύρυνσή του, δημιουργώντας κλιμακωτές αυλακώσεις διαφορετικού βάθους στην εσωτερική του παρειά. Αυτές οι βλάβες πρέπει να σωρευτήκαν κατά την τελευταία περίοδο λειτουργίας των τριβείων, όταν πλέον οι μεταλλευτές, κρίνοντας ασύμφορη την επισκευή τους, τις εγκατέλειψαν οριστικά. Ίσως αυτό να συνδέεται με την εξάντληση των ανακυκλωσίων απορριμμάτων ή με την παύση κοπής νομισμάτων στο τέλος του 1ου αιώνα π.Χ.

Οι συνέπειες της μακροχρόνιας κύλισης της μυλόπετρας στο αυλάκι γίνονται, επίσης, αντιληπτές από τη σοβαρή φθορά που έχει προκαλέσει στη διατομή του: οι κοιλοότητες που ήταν σκαλισμένες μέσα σε αυτό υπέστησαν φθορά και σε ορισμένες περιπτώσεις μετά βίας διακρίνονται στον πυθμένα του (εικ. 5). Αυτό οφείλεται στο ότι η μυλόπετρα όπως και το υλικό που αλεθόταν ήταν σκληρά και έφθειραν το μάρμαρο. Συγκρίνοντας τη μορφή του αυλακιού διαφόρων τριβείων, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει αντίστροφη σχέση μεταξύ του βάθους του και του βάθους των κοιλοτήτων (εικ. 12): όσο βαθύτερο γίνεται το αυλάκι λόγω της φθοράς του κατά τη λειτουργία, τόσο μικρότερο απομένει το βάθος των κοιλοτήτων που είναι σκαλισμένες μέσα σε αυτό, με αποτέλεσμα με τη χρήση να τείνουν να εξαφανιστούν.

Σε ανακοινώσεις μου¹⁶, έχω δείξει ότι το κυκλικό τριβείο φαίνεται να είναι εξέλιξη του *trapetum*, το οποίο ήταν κατά πάσα πιθανότητα ελληνική εφεύρεση με το όνομα «ελαιοτρόπιον». Το *trapetum* και το κυκλικό τριβείο του Λαυρίου έχουν εντυπωσιακές ομοιότητες. Κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η κύλιση όρθιου ή όρθιων τροχών μέσα σε κυκλικό αυλάκι και μοναδική διαφορά τους είναι η διάμετρος του αυλακιού. Για τη μετάβαση από το *trapetum* στο κυκλικό τριβείο του Λαυρίου, αρκεί το αυλάκι να αποσπαστεί και να απομακρυνθεί από τον κεντρικό κολονίσκο. Η εξέλιξη αυτή ήταν σχεδόν αυτονόητη και συντελέστηκε ασφαλώς λόγω της ανάγκης να αυξηθεί το βάρος της μυλόπετρας για τη λειοτριβήση σκληρών υλικών. Η συνακόλουθη αύξηση του μεγέθους της μυλόπετρας οδήγησε αναγκαστικά σε αυλάκι μεγαλύτερης διαμέτρου, με αποτέλεσμα να αυξηθεί ανάλογα προς το μήκος του αυλακιού και η δυναμικότητα του τριβείου. Η εξέλιξη αυτή εισπάγη για πρώτη φορά την κυκλική κίνηση στα τριβεία των μεταλλείων και επέτρεψε την κίνηση με υποζύγιο.

Η παρουσία κοιλοτήτων στο αυλάκι αποτελεί ιδιομορφία των κυκλικών τριβείων του Λαυρίου και δικαιολογείται ως εξής: Με το πέρασμα της μυλόπετρας πάνω στο υλικό, τα λεπτά τεμαχίδια, που δημιουργούνται από τη σύνθλιψη, περνούν λόγω της βαρύτητας μέσα από τα διάκενα που υπάρχουν ανάμεσα στα χονδρότερα τεμαχία για να καταλήξουν στο βάθος των κοιλοτήτων, όπου παραμένουν παγιδευμένα. Έτσι μπορούσε να αποφευχθεί η υπερλειοτριβήση που δυσχεραίνει τον μετέπειτα εμπλουτισμό (δημιουργία *slimes*). Συγχρόνως αυξάνονταν η απόδοση της λειοτριβήσης, καθώς στην επιφάνεια έμεναν διαρκώς εκτεθειμένα τα χονδρά τεμαχία —και μόνον αυτά— για να τεμαχιστούν στον επόμενο γύρο της μυλόπετρας. Πρόκειται για το φυσικό φαινόμενο της διαστρωμάτωσης, δηλαδή της ταξινόμησης των τεμαχίων κατά μέγεθος αυξανόμενο από κάτω προς τα πάνω, κάτι που ασφαλώς είχαν παρατηρήσει οι αρχαίοι μεταλλευτές κατά τη συνεχή ενασχόλησή τους με τριμμένα υλικά και προφανώς το εκμεταλλεύτηκαν. Έτσι επινόησαν τις κοιλοότητες, οι οποίες —κατ' αναλογία προς ένα κόσκινο— απομάκρυναν συνεχώς το λεπτότερο κλάσμα του υλικού από τη δράση της μυλόπετρας, αποτρέποντας την περαιτέρω λειοτριβήσή του.

Με τα σημερινά δεδομένα, τα κυκλικά τριβεία της Λαυρεωτικής είναι τα αρχαιότερα γνωστά στον κόσμο. Ωστόσο, κυκλικά τριβεία με παρόμοια μορφή και διαστάσεις, χρησιμοποιήθηκαν αργότερα σε Ασία, Ευρώπη και Αμερική για την κατεργασία γεωργικών προϊόντων και φυτών με βιομηχανικές χρήσεις, καθώς και σε μεταλλεία¹⁷. Η αποδεδειγμένη χρονική τους παρουσία έχει ως εξής: Στην Κίνα, όπου χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα για την αποφλοίωση ρυζιού, η αρχαιότερη αναφορά τους βρίσκεται σε γραπτό κείμενο του τέλους του 2ου αιώνα μ.Χ. Εντοπίζονται, επίσης, στην Ινδία. Στη Γαλλία υπάρχουν απομεινάρια τέτοιων μύλων από τον Μεσαίωνα και μετά, κυρίως για την παραγωγή μπλίτη οίνου (εικ. 4) και για την αποφλοίωση λιναριού. Εικονίζονται επίσης σε πίνακα του Cézanne μπροστά σε μεταλλείο. Στην Αυστρία εντοπίστηκαν σε δάσος, όπου χρησιμοποιούνταν πιθανώς για παραγωγή τανίνης από βελανίδια (εικ. 13, 14). Κατά τους δύο τελευταίους αιώνες χρησιμοποιήθηκαν στην Αγγλία για λειοτριβήση μεταλλευμάτων μολύβδου σε μεταλλεία (εικ. 11). Στη Β. Αμερική χρησιμοποιήθηκαν κατά τον 18ο–19ο,

08

Έγκλεισμα αργύρου/μολύβδου μέσα σε λιθάργυρο. Φωτογραφία του συγγραφέα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

09

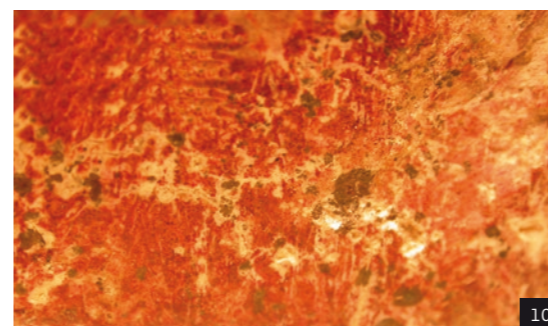
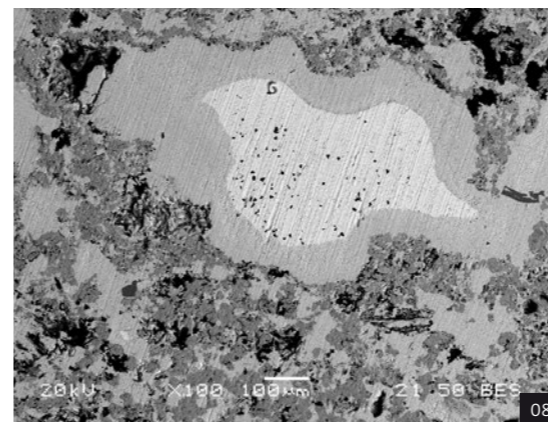
Τεμάχιο πλακοειδούς λιθάργυρου και τομή. Φωτογραφία του συγγραφέα.

10

Μακροφωτογραφία τεμαχίου πλακοειδούς λιθάργυρου (PbO-red) με πολυάριθμα μεταλλικά εγκλείσματα (ψήγματα) αργύρου/μολύβδου διαστάσεων περίπου 1 χιλ. και κάτω.

11

Κυκλικό τριβείο στην Αγγλία, από τα μεταλλεία Odin, με πιθανό έτος κατασκευής το 1823. Χρησίμευε για τη λειοτριβήση μεταλλεύματος μολύβδου. Αντί για αυλάκι υπάρχει κυκλική πίστα διαμέτρου 5,5 μ. και πλάτους 37,5 εκ., συναρμολογημένη από τέσσερα χυτοσιδηρά (μαντεμένια) τεμάχια. Η μυλόπετρα έχει διάμετρο 1,80 μ. και η περιφέρειά της προστατεύεται από στεφάνη από το ίδιο υλικό. Φωτ.: Stephen Wood.



ίσως και τον 20ο αιώνα για λειοτριβήση μεταλλευμάτων και για την έκθλιψη μύλων, ενώ υπάρχει και σχετικός ζωγραφικός πίνακας του William Sidney Mount (εικ. 15). Στη Ν. Αμερική χρησιμοποιήθηκαν επίσης τους δύο τελευταίους αιώνες στα μεταλλεία μολύβδου/αργύρου και χρυσού, κυρίως στη Χιλή, γι' αυτό και είναι επίσης γνωστά ως *Chilean mills*. Καμπυλωτά κατάλοιπα μαρμάρων με αυλάκι βρέθηκαν στο Παγγαίον όρος, ανάμεσα σε σκουριές της Κλασικής περιόδου και σχετίζονται πιθανώς με δραστηριότητες εξαγωγής χρυσού από σιδηρομεταλλεύματα¹⁸.

Χρήση των κυκλικών τριβείων. Η τεχνολογία ανάκτησης αργύρου από το λιθάργυρο και η παραγωγή εμπορικού μολύβδου

Το μοναδικό υλικό που εντοπίστηκε ως υπόλειμμα στο αυλάκι των διαφόρων τριβείων της Λαυρεωτικής είναι ο λιθάργυρος, προσκολλημένος στον πυθμένα και τις παρειές του. Υπόλειμματα τριμμένου λιθάργυρου βρέθηκαν και στον εσωτερικό χώρο της κατασκευής και εξωτερικά, σε άμεση γειτνίαση με αυτή. Ο λιθάργυρος έχει μερικώς μετασχηματιστεί σε ανθρακικό μολύβδο και συσσωματώθηκε με την επενέργεια του διοξειδίου του άνθρακα των μετεωρικών υδάτων και της ατμόσφαιρας, ακριβώς όπως συμβαίνει και με τον ασβέστη που μετατρέπεται σε ανθρακικό ασβέστιο. Πρωτογενές μέταλλευμα ή άλλο υλικό δεν εντοπίστηκε στον εσωτερικό χώρο των τριβείων. Επομένως, πρέπει να δεχθούμε ότι το υλικό που υποβαλλόταν σε λειοτριβήση στα κυκλικά τριβεία της Λαυρεωτικής ήταν λιθάργυρος. Η λειοτριβήση του λιθάργυρου φαίνεται κατ' αρχήν παράδοξη, διότι είναι δύσκολο να γίνει αντιληπτό για ποιο σκοπό τον έτριβαν οι αρχαίοι. Η λειοτριβήση είναι εξαιρετικά κοπιαστική, χρονοβόρα και δαπανηρή εργασία και δικαιολογείται μόνο στο πλαίσιο μιας εξαιρετικά κερδοφόρου παραγωγικής διαδικασίας, η οποία θα περιγραφεί στη συνέχεια. Για την κατανόσή της πρέπει να προαναφερθεί ότι στην πράξη της κυπέλλωσης, κατά την απομάκρυνση του λιθάργυρου από την κουπέλλα, συμπαρασύρονται μικρές ποσότητες αργυρούχου μολύβδου που στερεοποιούνται κατόπιν στο εσωτερικό του ως «εγκλείσματα», δηλαδή ψήγματα. Εκτός από αυτά, πολύ λεπτότερα εγκλείσματα σχηματίζονται και από τον άργυρο που διαλύεται μέσα στο τήγμα του λιθάργυρου και αποβάλλεται κατά τη στερεοποίηση. Τα εγκλείσματα μέσα στο λιθάργυρο συνιστούν προφανώς σοβαρή απώλεια στην ανάκτηση του αργύρου¹⁹. Στην εικόνα 10 παρατηρούνται μεταλλικά εγκλείσματα στη μάζα λιθάργυρου, τα οποία περιέχουν μολύβδο και άργυρο. Μερικά από αυτά έχουν μέγεθος 1 χιλ. ή μεγαλύτερο και είναι σαφώς ορατά διά γυμνού οφθαλμού, αλλά τα περισσότερα είναι λεπτότερα, μικρότερα των 0,5 χιλ. Οι αρχαίοι μεταλλουργοί είχαν διαπιστώσει την παρουσία τους και τα εκμεταλλεύτηκαν. Στην περίοδο ακμής των μεταλλείων στα κλασικά χρόνια, τα κομμάτια λιθάργυρου που διαπιστώνονταν ως πλούσια σε εγκλείσματα ανακυκλώνονταν κατευθείαν στην κάμινο τήξης. Στα χρόνια όμως της παρακμής των μεταλλείων, η ανακύκλωση του λιθάργυρου έγινε η βασική δραστηριότητα παραγωγής αργύρου και εφαρμόστηκε σε μεγάλη κλίμακα στα αποθέματα που ήταν διαθέσιμα, χρησιμοποιώντας τεχνική εμπλουτισμού, ανάλογη προς αυτή που περιγράφει ο Διόδωρος ο Σικελιώτης για την ανάκτηση χρυσού από χρυσοφόρα πετρώματα στην Αίγυπτο²⁰. Δηλαδή, για να ανακτήσουν τα εγκλείσματα, οι μεταλλουργοί άλεθαν το λιθάργυρο κάτω των 0,5 χιλ. ώστε να τα αποδεσμεύσουν και, εν συνεχεία, τα διαχώριζαν με υδρομηχανικό εμπλουτισμό στα επίπεδα πλυντήρια. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται από την ανεύρεση λεπτά τριμμένων λιθάργυρων στις ανασκαφές αρχαίων εργαστηρίων και σε μικρούς σωρούς μέσα και έξω από τα αρχαία επίπεδα πλυντήρια. Αν αγνοήσουμε αυτή την εκδοχή, δεν υπάρχει καμία άλλη λογική εξήγηση γιατί έτριβαν οι αρχαίοι το λιθάργυρο.

Δεν αποκλείεται η ανάκτηση αργύρου από το λιθάργυρο στην περίοδο της παρακμής να άρχισε από τα παλιά συγκροτήματα πλυντηρίων που ήταν προσαρτημένα στα μεταλλεία και τότε πλέον είχαν εγκαταλειφθεί. Αυτό συμφωνεί με την αρχαιολογικά διαπιστωμένη λειτουργία τους σε μια δεύτερη, μεταγενέστερη χρο-

νική περίοδο, η οποία χαρακτηρίζεται από την παρουσία τριμμένου λιθαργύρου²¹. Ο λιθαργύρος έπρεπε συνήθως να μεταφερθεί από μακριά, δηλαδή από τους χώρους καμινείας όπου είχε παλαιότερα αποτεθεί, αλλά, παρά το κόστος μεταφοράς, τα παλιά συγκροτήματα εμπλουτισμού είχαν το πλεονέκτημα να διαθέτουν τον αναγκαίο εξοπλισμό: αφενός τα τριβεία —συνδυασμό πλάκας και βαριοπούλας (*mortar and pestle*) και παλινδρομικών τριβείων (*Olynthus mills*)— και αφετέρου τα επίπεδα πλυντήρια με τις δεξαμενές τους.

Ωστόσο, οι εγκαταστάσεις θραύσης-λειοτριβήσης αυτών των συγκροτημάτων αποδείχθηκαν ανεπαρκείς για την περίπτωση του λιθαργύρου. Ήταν κατάλληλες για να τριβουν σε μέγεθος κάτω των 3 χιλ., ικανοποιητικό για το πρωτογενές μετάλλευμα, δεν είχαν όμως τη δυνατότητα να τριβουν το λιθαργύρο κάτω των 0,5 χιλ. για την αποδέσμευση και των πιο λεπτών εγκλεισμάτων του, με συνέπεια τη μεγάλη απώλεια αργύρου κατά το επόμενο στάδιο του διαχωρισμού στα επίπεδα πλυντήρια. Ένα δεύτερο μειονέκτημα ήταν η μικρή παραγωγική ικανότητα των παλαιών τριβείων, η οποία δεν επέτρεπε μεγάλης κλίμακας εκμετάλλευση του λιθαργύρου.

Τη λύση στα προβλήματα αυτά έδωσε τελικά η χρήση των κυκλικών τριβείων της Λαυρεωτικής. Το κυκλικό τριβείο ήταν η ιδανική μηχανή, εξαιρετικά αποδοτική και παραγωγική για τη λεπτή λειοτριβήση του λιθαργύρου (εικ. 7). Η φωτογραφία αποτυπώνει τεμάχιο τριμμένου λιθαργύρου, συσσωματωμένου από το χρόνο, από την άμεση γειτονιά ενός κυκλικού τριβείου και δείχνει ότι η λειοτριβήση του λιθαργύρου είναι ομοιόμορφη και εξαιρετικά λεπτή, κάτω των 0,2 χιλ. Την ομοιομορφία του προϊόντος εξασφάλιζε βεβαίως η παρουσία των κοιλοτήτων στο αυλάκι, αποτρέποντας την υπερλειοτριβήση.

Μετά την ανακάλυψη του κυκλικού τριβείου, αναπτύχθηκαν νέα συγκροτήματα κατάλληλα για την ανακύκλωση του λιθαργύρου, αυτή τη φορά όχι στα μεταλλεία, αλλά κοντά σε συγκροτήματα καμίνων, όπου ήταν διαθέσιμα τα αποθέματα λιθαργύρου. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονταν κατά βάση ένα κυκλικό τριβείο, όπου τριβόταν ο λιθαργύρος, και ένα επίπεδο πλυντήριο, όπου διαχωρίζονταν τα ψήγματα αργύρου/μολύβδου. Επακολουθούσε κυπέλλωση για την ανάκτηση του αργύρου από τον μολύβδο. Μικρές τεχνικές τροποποιήσεις επήλθαν και στο επίπεδο πλυντήριο ώστε να κατεργάζεται, παράλληλα με το λιθαργύρο, και εκβολάδες.

Από τη διαδικασία διαχωρισμού των εγκλεισμάτων στα επίπεδα πλυντήρια προέκυπτε μια μεγάλη ποσότητα απαργυρωμένου λιθαργύρου ως «απόρριμμα». Στην πραγματικότητα δεν ήταν απόρριμμα, αλλά χρησιμοποιούνταν στη συνέχεια για την παραγωγή εμπορικού μολύβδου, καθώς ο μολύβδος είχε αποκτήσει μεγάλη αξία στα ρωμαϊκά χρόνια, λόγω της χρήσης του σε υδραυλικές εφαρμογές. Η ανάκτηση του απαργυρωμένου λιθαργύρου για παραγωγή εμπορικού μολύβδου σε φρεατώδεις καμίνους είναι εύκολη, με μόνη ιδιομορφία ότι δεν παράγεται σκωρία η οποία είναι χρήσιμη για την καλή λειτουργία της καμίνου τήξεως. Ως λύση του προβλήματος, φορτωνόταν στην κάμινο και μικρή ποσότητα σκωρίας που, σύμφωνα με τον Κορδέλλα, είχε απολφθεί από τους αρχαίους σωρούς²². Φορτωνόταν επίσης και συμπτύκωμα που προερχόταν από εμπλουτισμό εκβολάδων και, για το λόγο αυτό, στα νέα συγκροτήματα διατηρήθηκε το παλαιό συγκρότημα θραύσης-λειοτριβήσης, που αποτελούνταν από συνδυασμό τριβείων πλάκας/βαριοπούλας (*mortar and pestle*) και παλινδρομικών τριβείων (*Olynthus mills*).

Το πότε εμφανίστηκαν τα κυκλικά τριβεία στη Λαυρεωτική δεν είναι προς το παρόν γνωστό με ακρίβεια, επειδή δεν υπάρχει ακριβής χρονολόγηση των κατασκευών βασισμένη σε κεραμικά ευρήματα, αλλά μόνο ενδείξεις που παραπέμπουν αόριστα στην Ελληνιστική και τη Ρωμαϊκή εποχή. Σε δύο δείγματα σκωρίας προερχόμενα από το άνω στρώμα ανασκαφής στο εσωτερικό καμίνου του συγκροτήματος Αρύ II, που περιλαμβάνει και κυκλικό τριβείο, εξετάστηκε η ηλικία με άνθρακα 14 και προσδιορίστηκε στο διάστημα μεταξύ 203 και 46 π.Χ.²³. Στο διάστημα αυτό πρέπει να τοποθετήσουμε το πέρας λειτουργίας των καμίνων. Η ραδιοχρονολόγηση χαρακτηρίζεται από μεγάλη χρονική αοριστία, αν ωστόσο συνδυαστεί με τα



12α



12β



12γ

12α-γ

Τμήματα από τρία διαφορετικά κυκλικά τριβεία: το αυλάκι έχει βαθύνει κατά τη χρήση σε διαφορετικό βαθμό, με αποτέλεσμα να μειώνεται το βάθος των κοιλοτήτων μέχρι την ολοκληρωτική εξαφάνισή τους (12γ). Φωτογραφία του συγγραφέα.

13

Υπολείμματα κυκλικού τριβείου μέσα σε δάσος στην Άνω Αυστρία (Otttnang). Πιθανότατα χρησίμευε για τη λειοτριβήση βαλανιδιών και φλούδας βαλανιδιάς (*tan bark*) για τη βυρσοδεψία. Αγνωστη ηλικία. Φωτ.: Willi Gross.

14

Τα υπολείμματα κυκλικού τριβείου της εικόνας 13 συναρμολογημένα μέσα σε κήπο.



13



14



15
Έκθλιψη μήλων για παραγωγή μηλίτη οίνου στο Long Island, ΗΠΑ. Λεπτομέρεια από έργο του William Sidney Mount, 1840–1841. Στην εικόνα διακρίνονται ο γεωργός και δύο παιδιά πάνω στο βραχίονα του μύλου, προφανώς για να προσθέσουν βάρος στη μυλόπετρα. The Metropolitan Museum of Art. Φωτ.: Wikimedia Commons.

ιστορικά, αρχαιολογικά και τεχνολογικά δεδομένα που εκθέσαμε, μας επιτρέπει να τοποθετήσουμε λογικά την ανακάλυψη των κυκλικών τριβείων περί το 200 π.Χ.

Συμπέρασμα

Στο παρόν άρθρο επιχειρήθηκε μια σκιαγράφηση της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής ιστορίας του Λαυρίου κατά τους αιώνες παρακμής των μεταλλείων, από τις αρχές της Ελληνιστικής περιόδου μέχρι την εποχή που ο Στράβων περιόδευσε την Αττική, περί το τέλος του 1ου αιώνα π.Χ. Στο πλαίσιο της συνοπτικής περιγραφής του Στράβωνος και σύμφωνα με τα ιστορικά, αρχαιολογικά και τεχνολογικά δεδομένα, η διαδικασία παραγωγής αργύρου και μολύβδου κατά την περίοδο αυτή δεν στηριζόταν πλέον στα μεταλλεία αλλά στην ανακύκλωση παλαιών απορριμμάτων.

Η μελέτη αυτή προσπαθεί να δώσει αναλυτική απάντηση σε ερωτήματα που έχουν τεθεί από αρχαιολόγους και άλλους ερευνητές: α) Γιατί δεν βρέθηκαν αποθέματα λιθαργύρου από τους νεότερους μεταλλευτές κατά την αναγέννηση του Λαυρίου στο β' μισό του 19ου αιώνα και σε τι οφείλεται η αινιγματική παρουσία υπολειμμάτων τριμμένου λιθαργύρου στις σύγχρονες ανασκαφές αρχαίων πλυντηρίων²⁴, και β) Γιατί, όπως διαπίστωσε και ο Κορδέλλας²⁵, τα τεράστια αποθέματα σκωριών της Κλασικής περιόδου παρέμειναν πρακτικά άθικτα και δεν ανακυκλώθηκαν παρά ελάχιστα από τους αρχαίους μεταλλευτές του 3ου–1ου αιώνα π.Χ.

Στη βάση της προηγούμενης συζήτησης προέχει ως νέα τεχνολογία το κυκλικό τριβείο του Λαυρίου, του οποίου η ανακάλυψη επέτρεψε τη μαζική εκμετάλλευση των παλαιών αποθεμάτων λιθαργύρου, με σκοπό την ανάκτηση του αργύρου που περιεχόταν στο εσωτερικό του υπό μορφή ψηγμάτων. Το τριβείο αυτό, που σύμφωνα με τα τρέχοντα δεδομένα έκανε για πρώτη φορά την εμφάνισή του στη Λαυρεωτική, χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα λεπτής και ομοιόμορφης άλεσης, χάρη στην πρωτότυπη κατασκευή του με τις κοιλότητες, και από υψηλή παραγωγικότητα. Για την αποτελεσματικότητα και την υψηλή του παραγωγικότητα κυρίως, το συναντούμε αργότερα στην Ασία, την Ευρώπη και την Αμερική, σε ένα πλήθος εφαρμογών επεξεργασίας αγροτικών και μεταλλευτικών προϊόντων.

* Οι φωτογραφίες 1, 3, 5 και 12 δημοσιεύονται με άδεια που μου είχε παραχωρήσει η τότε Β' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων.

Σημειώσεις

- Crosby 1950, σ. 190.
- Η εκμετάλλευση των βαθύτερων κοιτασμάτων απαιτούσε συχνά όρυξη φρεάτων σε βάθος άνω των 100 μ. και ενδεχομένως συναντούσε τον υδροφόρο ορίζοντα.
- Mortier 2011, σ. 130.
- Αθίναιος, *Δειπνοσοφισταί* VI.272 e–f.
- Τα συγκροτήματα εμπλουτισμού κατά την Κλασική περίοδο ήταν προσαρτημένα στα μεταλλεία και χρησιμοποιούνταν για τον εμπλουτισμό των φτωχών μεταλλευμάτων. Η διαδικασία ήταν η εξής: Το φτωχό μέταλλευμα θραυόταν σε μέγεθος κάτω των 20 χιλ. πάνω σε μαρμάρινες πλάκες και στη συνέχεια τριβόταν κάτω των 3 χιλ., «σε μέγεθος ορόβου», σε παλινδρομικά τριβεία τύπου Ολύθνου. Το τριμμένο υλικό αποτελούνταν από τεμαχίδια του χρήσιμου ορυκτού (γαλνίτη ή κερουσίτη), που περιείχε τον αργυρούχο μολύβδο, και από στέφρα τεμαχίδια (ασβεσίτη, χαλαζία, άργιλο κ.λπ.). Στη συνέχεια μεταφερόταν στα επίπεδα πλυντήρια για διαχωρισμό με ροή νερού πάνω σε ξύλινο ρείθρο, όπου τα τεμαχίδια του χρήσιμου ορυκτού, που ήταν τα βαρύτερα, παρέμειναν παγιδευμένα πάνω στο ρείθρο και συλλέγονταν ως συμπύκνωμα, ενώ τα τεμαχίδια των στείρων μαζί με την ιλύ, ως ελαφρότερα, παρασύρονταν από το νερό και απομακρύνονταν ως απόρριμμα (πλυντήρι). Για αναλυτική περιγραφή, βλ. Κονοφάγος 1980, σ. 223–246 και Παπαδημητρίου 2001, σ. 659–678.
- Το αργυρούχο μέταλλευμα και το συμπύκνωμα από τα πλυντήρια

υποβάλλονταν σε αναγωγική τήξη με ξυλάνθρακα σε φρεατώδεις καμίνους. Από αυτές εξάγονταν ο αργυρούχος μολύβδος που περιείχε τον άργυρο (1 έως 4 κιλά αργύρου ανά τόνο μολύβδου) και η σκωρία που προερχόταν από τις προσμίξεις και απορριπτόταν σε σωρούς. Στη συνέχεια ο αργυρούχος μολύβδος υποβαλλόταν σε κυπέλλωση για ανάκτηση του αργύρου. Η κυπέλλωση πραγματοποιούνταν σε θολωτή κάμινο, παρόμοια με μικρό χωριάτικο φούρνο, εμψυσώντας αέρα με τη βοήθεια φυσερών στην επιφάνεια του αργυρούχου μολύβδου που περιεχόταν σε κατάσταση τήξης μέσα σε πυρίμαχο αγγείο, την κουπέλλα. Κατά την εμψύσηση ο μολύβδος οξειδωνόταν επιλεκτικά, σχηματίζοντας λιθαργύρο (οξειδίο του μολύβδου), που επέπλεε ως λεπτή στοιβάδα στην επιφάνεια και απομακρύνονταν ρέοντας συνεχώς έξω από την κουπέλλα, ενδεχομένως υποβοηθούμενος από τους μεταλλουργούς με ξέστρα ή με σιδηρές ράβδους, πάνω στις οποίες έμεινε προσκολλημένος. Η εμψύσηση αέρα συνεχιζόταν για ώρες μέχρις ότου οξειδωθεί όλος ο μολύβδος και συγκεντρωθεί στον πυθμένα της κουπέλλας ο άργυρος, ο οποίος –λόγω μικρής χημικής συγγένειας με το οξυγόνο– δεν οξειδώνεται. Ο άργυρος περιείχε αρκετές ακαθαρσίες και υποβαλλόταν σε νέα κυπέλλωση, ώστε να αποκτήσει καθαρότητα άνω του 98,5%. Για αναλυτική περιγραφή, βλ. Κονοφάγος 1980, σ. 274–303.

- Λιάγκουρας / Κακαβογιάννης 1976, σ. 24–43 και Κακαβογιάννης 1984, σ. 49–55 και Οικονομάκου 1997, σ. 47–53 και Τσαίμου 2007, σ. 217–225.
- Στράβων, *Αττικά* 9.1.23.
- Κορδέλλας 1865, σ. 18 και 34.
- Τα αποθέματα λιθαργύρου που σχηματίστηκαν κατά την Κλασική περίοδο πρέπει να ήταν της τάξεως του 1 εκατ. τόνων, αλλά δεν έφθασαν στη νεότερη εποχή, επειδή τα εκμεταλλεύθηκαν εξαντλητικά οι αρχαίοι. Ο λιθαργύρος ήταν ενδιαφέρουσα πηγή αργύρου, καθώς περιείχε, ενδεικτικά, 170–200 γρ. αργύρου ανά τόνο λιθαργύρου ή περισσότερο, με τη μορφή εγκλεισμάτων (ψηγμάτων).
- Κονοφάγος / Mussche 1970, σ. 2–19.
- Rehren κ.ά. 2002, σ. 27–46.
- Τσαίμου 2007, σ. 217–225.
- Τσαίμου 2008, σ. 435–451.
- Παπαδημητρίου 2015, σ. 149–157. Επίσης, βλ. Papadimitriou 2016, σ. 113–118.
- Παπαδημητρίου 2015, σ. 149–157. Επίσης, βλ. Papadimitriou 2016, σ. 113–118.
- Παπαδημητρίου 2015, σ. 149–157. Επίσης, βλ. Papadimitriou 2016, σ. 113–118.
- Photos κ.ά. 1987, σ. 178–190.
- Papadimitriou 2008, σ. 799–819.
- Διόδωρος Σικελιώτης III.12–14.
- Papadimitriou 2008, σ. 799–819.
- Κορδέλλας 1865, σ. 18, 34.
- Tsaimou κ.ά. 2015, σ. 113–127.
- Rehren κ.ά. 1999, σ. 299–308.
- Κορδέλλας 1865, σ. 18 και 34.

Βιβλιογραφία

- Αθίναιος, *Δειπνοσοφισταί* VI. 272 e–f.
Crosby 1950: Crosby M., «The Leases of the Laurion Mines», *Hesperia* XIX/3 (1950), σ. 189–312.
Διόδωρος Σικελιώτης III.12–14.
Κακαβογιάννης 1984: Κακαβογιάννης Ε., «Λαυρεωτική», *Αρχαιολογικόν Δελτίον* 39 (1984), σ. 49–55.
Κονοφάγος / Mussche 1970: Κονοφάγος Κ. / Η. Mussche, «Τα ελικοειδή πλυντήρια των Αρχαίων Ελλήνων εις το Λαύριον», *Πραγματεία της Ακαδημίας Αθηνών* 29/2, Αθήναι 1970, σ. 2–19.
Κονοφάγος 1980: Κονοφάγος Κ., *Το Αρχαίο Λαύριο και η ελληνική τεχνική παραγωγή του Λαυρίου*, Εκδοτική Ελλάδα, Αθήνα 1980.
Κορδέλλας 1865: Κορδέλλας Α., *Περί των σκωριών και της μεταλλουργικής βιομηχανίας εν Ελλάδι*, Αθήναι 1865, σ. 18, 34.
Λιάγκουρας / Κακαβογιάννης 1976: Λιάγκουρας Α. / Κακαβογιάννης Ε., «Ευρήματα Λαυρεωτικής», *Αρχαιολογικά Ανάλεκτα εξ Αθηνών* IX–1 (1976), σ. 24–43.
Mortier 2011: Mortier S., «Late Classical and early Hellenistic Finds from Cistern No 1 at Thorikos», στο R. Docter (επιμ.), *Thorikos 10 – Reports and Studies*, Ghent University, Department of Archaeology, 2011, σ. 129–140.
Οικονομάκου 1997: Οικονομάκου Μ., «Εργαστήριο τήξεως μεταλλεύματος στον όρμο Ασημάκη Σουσίου», *Ορυκτός Πλούτος* 103 (1997), σ. 47–53.

- Παπαδημητρίου 2001: Παπαδημητρίου Γ.Δ., «Πρόσθετα στοιχεία για την αρχιτεκτονική και την λειτουργία των εγκαταστάσεων εμπλουτισμού στο Αρχαίο Λαύριο», στο Ι. Μπασιάκος / Ε. Αλούπη / Γ. Φακορέλλης (επιμ.), *Αρχαιολογικές Μελέτες για την Ελληνική Προϊστορία και Αρχαιότητα*, Ελληνική Αρχαιομετρική Εταιρεία και Εταιρεία Μεσοσηνακών Αρχαιολογικών Σπουδών, Αθήνα 2001, σ. 659–678.
Παπαδημητρίου 2015: Παπαδημητρίου Γ., «Μία νέα άποψη για τα λεγόμενα "Ελικοειδή πλυντήρια του Λαυρίου" και τις μεταλλουργικές διεργασίες που συνδέονται με αυτά», στο Α.Δ. Στεφανής (επιστ. επιμ.), *Πρακτικά 1Ε' Επιστημονικής Συνάντησης ΝΑ Αττικής, 17–20 Οκτωβρίου 2013*, Καλύβια Θεοικού Αττικής 2015, σ. 149–157.
Papadimitriou 2008: Papadimitriou G.D., «Litharge: Waste or useful material? An intriguing material revisited», στο N. Zacharias / M. Georgakopoulou / K. Polykreti / G. Fakorellis / T. Vakoulis (επιμ.), *Proceedings of the 5th Symposium of the Greek Archaeometric Society*, Papazissis, Athens 2008, σ. 799–819.
Papadimitriou 2016: Papadimitriou G.D., «The so called "helicoidal ore washeries of Laurion": their actual function as circular mills in the process of beneficiation of silver and lead contained in old litharge stocks», στο E. Photos–Jones σε συνεργασία με τους Y. Bassiakos, E. Filippaki, A. Hein, I. Karatasios, V. Kilikoglou και E. Kouloumpi (επιμ.), *Proceedings of the 6th Symposium of the Hellenic*

- Society for Archaeometry*, May 16–18, 2013 (BAR International Series, 2780), 2016, σ. 113–118.
Photos κ.ά. 1987: Photos E. / Koukouli–Chrysanthaki E. / Tylecote R.F. / Gialoglou G., «Precious Metal Extraction in Palaia Kavala», στο *Proceedings of the International Symposium «Old World Archaeometallurgy»* (Der Anschritt, 7), Heidelberg 1987, σ. 178–190.
Rehren κ.ά. 1999: Rehren T. / Vanhove D. / Mussche H. / Oikonomakou M., «Litharge from Laurion. A medical and metallurgical commodity from South Attika», *L'Antiquité classique* 68 (1999), σ. 299–308.
Rehren κ.ά. 2002: Rehren T. / Vanhove D. / Mussche H. (2002), «Ores from the ore washeries in the Lavriotiki», *Metalla* 9/1 (Bochum 2002), σ. 27–46.
Στράβων, *Αττικά* 9.1.23.
Τσαίμου 2007: Τσαίμου Κ.Γ., «Αρύ Λαυρεωτικής», *Αρχαιολογικόν Δελτίον* 62 (2007), σ. 217–225.
Τσαίμου 2008: Τσαίμου Κ.Γ., «Νέα στοιχεία για την εμπλουτιστική διαδικασία των αργυρούχων μεταλλευμάτων στο αρχαίο Λαύριο», στο Α.Δ. Στεφανής (επιστ. επιμ.), *Πρακτικά 1Β' Επιστημονικής Συνάντησης ΝΑ Αττικής*, Καλύβια 2008, σ. 435–451.
Tsaimou κ.ά. 2015: Tsaimou C. / Tsakiridis P.E. / Oustadakis P., «Analytical and technological evaluation of ancient lead slags from Lavrion, Attika, Greece», *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 15/2 (2015), σ. 113–127.