



## **ΠΩΣ ΑΝΤΕΞΑΝ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΣΩΝ ΑΙΩΝΩΝ ΟΙ ΣΙΔΕΡΕΝΙΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΚΑΙ ΓΟΜΦΟΙ ΤΩΝ ΝΑΩΝ ΤΗΣ ΑΚΡΟΠΟΛΗΣ**

Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα δόθηκε στο τέλος μιας πολύχρονης και κοπιαστικής ερευνητικής εργασίας. Ήταν ένα ερώτημα που γεννήθηκε στην πορεία της έρευνας των σιδερένιων συνδέσμων. Είναι γνωστές σε όλους τους ερευνητές οι δυσκολίες που συναντούν, όταν ξεκινούν κάποια εργασία. Πολλές φορές δε γνωρίζουν από πού να αρχίσουν. Σε παρόμοιες περιπτώσεις ο ερευνητής νιώθει σαν να βρίσκεται σε πυκνό σκοτεινό δάσος, ψάχνοντας να ανακαλύψει κάποιο μονοπάτι που θα τον βγάλει στο ξέφωτο. Είναι όμως καλά κρυμμένο κάτω από πυκνή φυλλωσιά και χρειάζεται πολύ σκληρή δουλειά για να το ανακαλύψει. Όταν το βρει, τότε αρχίζει να δένει τις σκέψεις και τους συλλογισμούς του, για να καταλήξει σε απρόσμενα συμπεράσματα και απαντήσεις.

**Γ. Βαρουφάκης**

Επικ. Καθηγητής Παν/μίου Αθηνών



Το ίδιο συνέβηκε στην περίπτωση των σιδερένιων συνδέσμων και γόμφων του Παρθενώνα και του Ερεχθείου.

Όταν, πριν από μερικά χρόνια, οι υπεύθυνοι μηχανικοί για την αποκατάσταση των μνημείων της Ακρόπολης κ.κ. Μανώλης Κορρές και Κώστας Ζάμπας με κάλεσαν για να μελετήσω τα μεταλλικά αυτά στοιχεία, αναρωτήθηκα τι θα μπορούσα να προσφέρω περισσότερο, όταν πριν από μένα τρεις εξαιρετικοί επιστήμονες ερευνητές, όλοι τους πανεπιστημιακοί δάσκαλοι — ο Κ. Λειβαδεύς, ο Κ. Κονοφάγος και ο Γ. Παπαδημητρίου —, τα είχαν ήδη μελετήσει και είχαν καταλήξει σε πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Και όμως, στην πορεία της έρευνας ήρθαν στο φως στοιχεία, που συμπληρώνουν, μα ακόμα και διορθώνουν απόψεις και συμπεράσματα των παραπάνω εξαιρετών ερευνητών. Ένα από αυτά είναι και η αποκάλυψη του μεγάλου μυστικού της εξαιρετικής αντο-

χής των σιδερένιων συνδέσμων και γόμφων στη διάβρωση, και ιδιαίτερα αυτή των τελευταίων δεκαετιών. Σε τούτο συνέβαλε και το γεγονός ότι η ομάδα των παραπάνω μηχανικών αντικατέστησε όλους τους αρχαίους συνδέσμους και γόμφους με νέους από κράμα τιτανίου πολύ μεγαλύτερης αντιαβρωτικής ικανότητας. Έτσι μου δόθηκε η ευκαιρία να εξετάσω μεγάλον αριθμό συνδέσμων και να καταλήξω σε ενδιαφέροντα, αλλά και πιο θετικά, συμπεράσματα.

Την εργασία μου αυτή βοήθησε πολύ και η μελέτη αρχαίων κειμένων, που αναφέρονται στη χρήση σιδερένιων συνδέσμων στην ανέγερση ναών, τειχών και οχυρωματικών έργων. Έτσι, ο Θουκυδίδης αναφέρει στην Ιστορία τού Πελοποννησιακού πολέμου ότι, αμέσως μετά τους Μηδικούς πολέμους, για την ανέγερση των τειχών του Πειραιά: «...δε χρησιμοποιήσαν κόνιαμα και χαλίκι, αλλά σίδηρο και μολύβι...» («...έντόν δὲ οὔτε χάλιξ οὔτε πηλὸς ἦν, ἀλλὰ ἐνωκοδομημένοι μεγάλοι λίθοι καὶ ἐν τομῇ ἐγγύησι, σιδήρῳ πρὸς ἀλλήλους τὰ ἔξωθεν καὶ μολύβῳ δεδεμένοι...»), όπως δηλαδή και στην περίπτωση των ναών της Ακρόπολης<sup>1</sup>. Είναι να θαυμάζει κανείς τη μεγάλη εμπειρία και γνώση των αρχαίων σε θέματα διάβρωσης, αλλά και προστασίας, του τόσο ευαίσθητου αυτού μετάλλου, κλεισμένου μέσα σε μολύβι. Μονάχα στην ανέγερση πρόχειρων οχυρωματικών έργων οι αρχαίοι δε φρόντιζαν να προστατεύουν τους χρησιμοποιούμενους σιδερένιους συνδέσμους με μολύβδο. Τέτοια περίπτωση είναι το περιτείχιμα των Συρακουσών από τους Αθηναίους κατά τη γνωστή εκστρατεία των τελευταίων στη Σικελία. Σε κάποιο, λοιπόν, σημείο της ιστορίας του, ο Θουκυδίδης αναφέρει: «... Ετοίμαζαν ακόμη κι όσα χρειαζόνταν για τον περιτείχιμο των Συρακουσών, πλινθιά και σίδερα...» («...καὶ τάλλα ἐς τὸν περιτείχιμον, πλινθιά καὶ σίδηρον, ἠτοίμαζον, καὶ όσα ἔδει...»<sup>2</sup>. Για το «περιτείχιμα» αυτό, που έστησαν οι Αθηναίοι, μόνο για την πολιορκία και όχι ως μόνιμο τείχος, ήταν φυσικό να αρκείσσουν σε πρόχειρη κατασκευή. Αλλά μόνο γι' αυτό. Σε όλες τις άλλες οικοδομικές κατασκευές

χρησιμοποιούσαν, όπως αποδεικνύεται, μολύβι για την προστασία του σιδήρου.

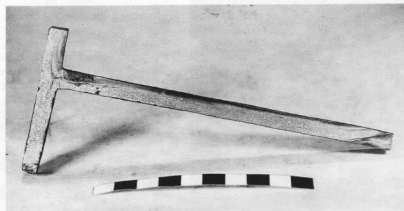
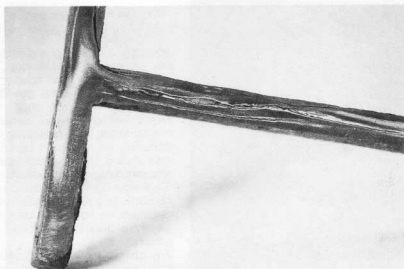
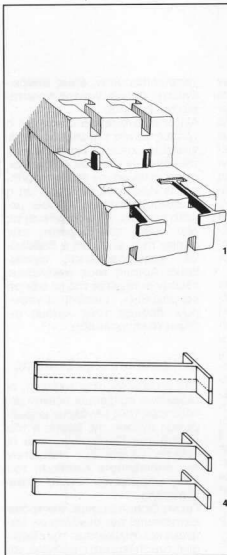
Αξίζει να αναφερθεί ακόμη ότι ο τρόπος αυτός κατασκευής ήταν γνωστός στους Βαβυλωνίους, τουλάχιστον από τον 7ο προχριστιανικό αιώνα, αν όχι και νωρίτερα. Ο Ηρόδοτος αναφέρει ότι η Βασίλισσα Νίτωκρης έφτιαξε μεγάλη γέφυρα, για να συνδέσει τις δύο όχθες του Ευφράτη στις οποίες ήταν χτισμένη η Βαβυλώνα, χρησιμοποιώντας ογκόλιθους. Αυτούς τους ογκόλιθους έδεσαν οι τεχνίτες της με σίδηρο και μολύβι («...οικοδόμειε γέφυραν, δέουσα τούς λίθους σιδήρῳ τε καὶ μολύβῳ...»<sup>3</sup>).

## Μακροσκοπικές εξετάσεις

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1, οι σιδερένιοι σύνδεσμοι έδεσαν μεταξύ τους τους μεγάλους μαρμαρίνους όγκους της βάσης ή του γέιους του Παρθενώνα, ενώ οι κάθετοι γόμφοι δεν επέτρεπαν την οποιαδήποτε ολισθήση του ενός μαρμαρίνου όγκου πάνω στον άλλο.

Για να διαπιστώσουμε τον τρόπο κατασκευής των συνδέσμων, λιείναμε και στυβώσαμε την εξωτερική τους πλευρική επιφάνεια, και μετά την προσβάλαμε με κάποιο χημικό μέσο, όποτε αποκαλύφθηκε η μακροδομή της εικόνας 2. Όλα δείχνουν ότι ο σύνδεσμος αυτός αποτελείται από οκτώ περιπίου ταινίες μαλακού σιδήρου (λευκές λεπτές λωρίδες) και σκληρού χάλυβα (μαύρες λωρίδες), που συγκολλήθηκαν με σφυρηλασία σε διάτρητη κατάσταση. Παρόμοιες μορφές βρήκαμε σε πολλούς άλλους συνδέσμους. Την ίδια μακροδομή είχε διαπιστώσει και ο Κ. Λειβαδεύς<sup>4</sup>.

Σε άλλες περιπτώσεις εμφανίστηκε, μετά από την ίδια διαδικασία, η μακροδομή της εικόνας 3. Η λευκή μονόχρωμη εμφάνιση της υποδηλώνει ότι ο σύνδεσμος είχε κατασκευαστεί από μαλακό σίδηρο και όχι, όπως της εικόνας 2, από συνδυασμό μαλακών και σκληρών ταινιών. Το ίδιο αναφέρουν και οι Κονοφάγος και Παπαδημητρίου στη σχετική μελέτη τους γύρω από ένα μικρό σύνδεσμο από το Ερεχθείο<sup>5</sup>. Αν, ωστόσο, ο ερευνητής δεν εξετάσει σε βάθος το οποιοδήποτε σιδερένιο σφυρηλατο αντικείμενο, κινδύ-



νεύει να οδηγηθεί σε λανθασμένα συμπεράσματα ως προς τον αριθμό και την ποιότητα των αρχικών μεταλλικών ταινιών που αποτέλεσαν την πρώτη ύλη για την κατασκευή του. Για να πραγματοποιήσουμε την εξέταση αυτή, ζητήσαμε, και τελικά λάβαμε, την άδεια από τις αρχαιολογικές αρχές να κόψουμε αρκετούς συνδέσμους κατά τη διαμήκη φορά, όπως δείχνει το σχέδιο της εικόνας 4.

Πραγματικά, με την κατάλληλη προετοιμασία της εσωτερικής επιφάνειάς τους, αποκαλύφθηκε μια τελείως διαφορετική δομή. Στην εικόνα 5 φαίνεται η αληθινή δομή του συνδέσμου, που, ενώ αρχικά (εικ. 2) έδειχνε να αποτελείται από οκτώ στρώσεις, στην πραγματικότητα συνίσταται από μία στρώση μαλακού σιδήρου συγκολλημένη ανάμεσα σε δύο στρώσεις σκληρού χάλυβα.

Στην εικόνα 6 βλέπουμε την αντί-

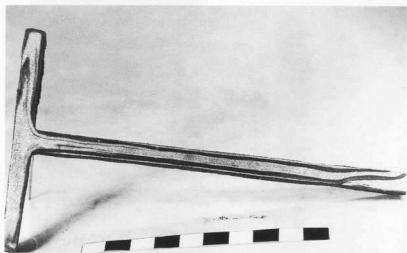
θετη μακροδομή. Εδώ έχουμε μια σκληρή στρώση χάλυβα, συγκολλημένη ανάμεσα σε δύο στρώσεις μαλακού σιδήρου. Αποδεικνύεται έτσι ότι ο σύνδεσμος της εικόνας 3 δεν είναι μαλακός σίδηρος, όπως φάνηκε αρχικά, αλλά είναι και πάλι συνδυασμός μαλακού σιδήρου και σκληρού χάλυβα.

Πειραματική έρευνά μας έδειξε, εξάλλου, ότι η τελική εμφάνιση της εξωτερικής μακροδομής του συνδέσμου είναι πάντοτε, όπως είδαμε και παραπάνω, διαφορετική από την πραγματική εσωτερική δομή. Και τούτο γιατί, όταν ο σιδηρουργός συγκολλάει σε διάπυρη κατάσταση τις μεταλλικές ταινίες και στη συνέχεια σφυρηλατεί την πλάκα που κατασκευάσε, για να τη διαμορφώσει σε σύνδεσμο ή γόμφο, δίνει δυνατά χτυπήματα με το σφυρί, ενώ ταυτόχρονα την περιστρέφει συνεχώς με την τσιμπίδα του, προκει-

μένω να επιτύχει ομοιογένεια και καλό τελικό προϊόν. Με αυτόν τον τρόπο όμως προκαλεί άθελά του επικάλυψη του σκληρού χάλυβα από το μαλακό σίδηρο, ή το αντίθετο, και ιδιαίτερα στα πλευρά του συνδέσμου ή του γόμφου. Αν, λοιπόν, ο ερευνητής περιορίσει τη μελέτη του στην επιφάνεια, υπάρχει κίνδυνος να παραπλανηθεί. Και αυτό ακριβώς έγινε στο παρελθόν.

## Η χημική σύνθεση και η αντιδιαβρωτική αντοχή των συνδέσμων και γόμφων

Η χημική εξέταση των συνδέσμων και γόμφων έδειξε ότι, εκτός από τον άνθρακα, που σκόπιμα είχε προστεθεί από τους αρχαίους μεταλλουργούς για να μετατρέψουν το σίδηρο σε σκληρό χάλυβα, όλα τα άλλα ξένα στοιχεία, και ιδιαίτερα του θείου, βρίσκονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.



5



6

Η μεγάλη αυτή καθαρότητα του σιδήρου, που χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη, και ιδιαίτερα η πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (η μέγιστη περιεκτικότητα μόλις φτάνει τα 0.004%) έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην αύξηση της αντιδιαβρωτικής αντοχής των συνδέσμων και γόμφων.

Οι αρχαίοι, όπως είδαμε και πιο πάνω, προστάτευαν το σίδηρο με μόλυβδο, εφαρμόζοντας τη γνωστή διαδικασία της «μολυβδοχόησης». Ο βομβαρδισμός της Ακρόπολης από τον Μοροζίνη, τον 17ο αιώνα, προκάλεσε φοβερή έκρηξη στον Παρθενώνα, όταν βόμβα ανατίναξε τα πυρομαχικά που φύλαγαν εκεί οι Τούρκοι. Το αποτέλεσμα ήταν να αποκαλυφθούν πολλοί σύνδεσμοι και γόμφοι, τόσο με το προστατευτικό τους στρώμα μόλυβδου όσο και χωρίς αυτό, μένοντας απροστάτευτοι για αιώνες, χωρίς ωστόσο να σκουριασουν. Τούτο θα πρέπει

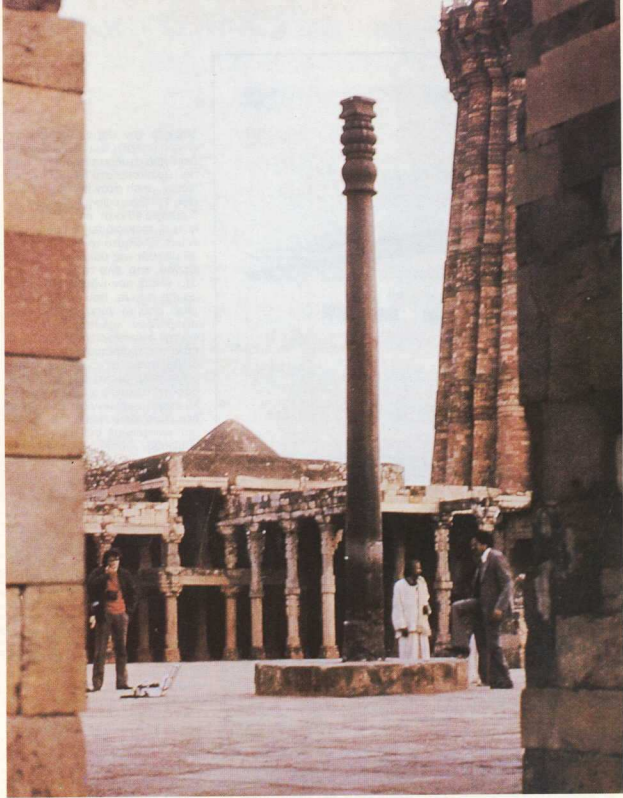
να αποδοθεί στη μεγάλη καθαρότητα του σιδήρου και ιδιαίτερα στην πολύ μικρή περιεκτικότητά του σε θείο.

Η ομάδα αναστήλωσης του Μπαλάνου, κατά το πρώτο τέταρτο του αιώνα μας, χρησιμοποίησε συνδέσμους και γόμφοι, που περιείχαν πάνω από δεκαπλάσια ποσότητα θείου, και σε πολλές περιπτώσεις δεν προστάτεψε το σίδηρο με μόλυβδο, όπως έκαναν οι αρχαίοι μεταλλοτεχνίτες. Το αποτέλεσμα ήταν να οξειδωθεί ο σίδηρος, να διογκωθεί, και με τη διόγκωσή του να προκαλέσει τις γνωστές φοβερές καταστροφές στα μνημεία της Ακρόπολης. Ευτυχώς, σήμερα όλοι οι σύνδεσμοι και γόμφοι, αρχαίοι και σύγχρονοι, αντικαταστάθηκαν από τιτανίουχους. Ένα κράμα ακριβό, αλλά πολύ ανθεκτικό στη διαβρωτική ενέργεια των αερίων, που συσπύονται το νέφος της Αθήνας. Ενδιαφέρουσα περίπτωση, που

ενισχύει την παραπάνω άποψη, είναι η ύπαρξη του περίφημου σιδερένιου στύλου του 4ου αι. μ.Χ., που βρίσκεται στο Νέο Δελχί των Ινδών, μέσα στον περίβολο ναού (εικ. 7). Έχει ύψος 7,5 μέτρα και διάμετρο 40 εκατ. και δεν έχει καθόλου σκουριάσει η επιφάνειά του σε όλο αυτό το διάστημα των 16 αιώνων της μακρόχρονης ζωής του, παρ' όλο το υγρό και ζεστό κλίμα των Ινδών. Μόνο μια μαύρη πατίνα, που τον προστατεύει από το γύρω εχθρικό του περιβάλλον, καλύπτει ομοιόμορφα την επιφάνεια του σιδήρου. Η αιτία της εξαιρετικής αυτής αντιδιαβρωτικής αντοχής του σιδήρου οφείλεται στη μεγάλη του καθαρότητα, και ιδιαίτερα στην πολύ μικρή περιεκτικότητά του σε θείο, που, όπως και στους αρχαίους ελληνικούς συνδέσμους και γόμφοι, δεν ξεπερνά τα 0.006%.

## Γενικά συμπεράσματα

Τα παραπάνω οδηγούν στο κρίσιμο ερώτημα: Ποια ήταν η προέλευση τόσο καθαρών μεταλλευμάτων; Οι Κ. Κονοφάγος και Γ. Παπαδημητρίου<sup>6</sup> θεωρούν βέβαιο ότι ο σίδηρος παραγόταν στο Λαύριο από τα εκεί εξορυσσόμενα μεταλλεύματα σιδήρου. Αυτό είναι πολύ φυσικό, αφού το Λαύριο βρίσκεται τόσο κοντά στην Αθήνα, και την εποχή εκείνη αποτελούσε ένα από τα μεγαλύτερα μεταλλουργικά κέντρα του τότε γνωστού κόσμου, για την παραγωγή όχι μόνο αργύρου και μολύβδου, αλλά και χαλκού και σιδήρου. Είναι επίσης ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι οι παραπάνω ερευνητές και ο αρχαιολόγος κ. Ευάγγ. Κακαβγιάννης βρήκαν στο Λαύριο μάζες σπογγώδους σιδήρου με μορφή ημιφαιρική, που οφείλεται στο κίλο σχήμα του πυθμένα των τότε μεταλλουργικών κλιβάνων. Σε δείγματα, που είχαν την καλοσύνη να μου παραχωρήσουν, διαπίστωσα ότι περιείχαν αρκετό θείο (0.217%)<sup>7</sup>, εκτός από ένα (του κ. Γ. Παπαδημητρίου), το οποίο είχε 0.014%, που μπορεί να θεωρηθεί αρκετά χαμηλό ποσοστό, αλλά που δεν παύει να είναι πάνω από το διπλάσιο εκείνου των συνδέσμων των ναών της Ακρόπολης.



Θα πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι οι μάζες αυτές του σπογγώδους σιδήρου προέρχονται από αποτυχημένες χυτεύσεις εκκαμινεύσεως. Πολύ πιθανό την εποχή εκείνη να υπήρχαν στο Λαύριο και μεταλλεύματα σιδήρου με ακόμη χαμηλότερο θείο. Δεν αποκλείεται ωστόσο η εισαγωγή μεταλλευμάτων στο Λαύριο από άλλες περιοχές, είτε του ελλαδικού είτε του ξένου χώρου, μεγάλης καθαρότητας σε ξένες ακαθαρσίες και

ιδιαίτερα σε θείο, για εκκαμινεύσή τους στις εκεί καλά οργανωμένες μεταλλουργικές εγκαταστάσεις, ή ακόμη και ημικατεργασμένου σιδήρου για μεταποίηση είτε στο Λαύριο είτε στην Αθήνα. Προσωπικά, έχω διαπιστώσει ότι σιδηρομεταλλεύματα της Λακωνίας είναι πλούσια σε σίδηρο και συγχρόνως πολύ καθαρά σε ό,τι αφορά ξένες ακαθαρσίες και ιδιαίτερα στο θείο (όχι πάνω από 0.006%).

Είναι, λοιπόν, πολύ πιθανό να χρησιμοποιήθηκαν και τα πολύ καθαρά σιδηρομεταλλεύματα της Λακωνίας για την κατασκευή των συνδέσμων των ναών της Ακρόπολης. Βέβαια μπορεί να υπάρξει και αντίλογος: η Σπάρτη δε θα επέτρεπε την εξαγωγή μεταλλευμάτων στη μεγάλη της αντίπαλο, την Αθήνα. Όμως, όταν άρχισαν τα έργα αποκατάστασης των κτισμάτων της Ακρόπολης, αμέσως μετά τα Μηδικά, οι οικο-



νομικές και διπλωματικές σχέσεις ανάμεσα στις δύο πόλεις δεν ήταν τέτοιες ώστε να αποτρέψουν τις εμπορικές συναλλαγές. Επιπλέον η Σπάρτη θα επιδιώκε και αυτή μετά τον πόλεμο να βελτιώσει τα οικονομικά της, εξάγοντας μεταλλεύματα αλλά και άλλες πρώτες ύλες στην Αθήνα, όταν μάλιστα η τελευταία πλήρωνε με το τότε σκληρό αττικό νόμισμα. Αλλά ακόμη και όταν οι σχέσεις ανάμεσα στις τότε υπερδυναμείς θα είχαν οξυνθεί, τίποτε δε θα εμπόδιζε τη συνέχιση των εμπορικών συναλλαγών τους ως τις παραμονές της μοιραίας αναμέτρησης.

Και κάτι ακόμη, που ενισχύει την παραπάνω άποψη της χρήσης ξένων μεταλλευμάτων. Ένας από τους σιδερένιους γόμφους ήταν φωσφορούχος (0.160%, ενώ σιδηρούς δεν ξεπερνούσε τα 0.035%). Ήταν η δεύτερη φορά που ανακάλυπτα την ύπαρξη φωσφορούχου σιδήρου στον ελλαδικό χώρο. Η πρώτη ήταν πριν από δεκαπέντε χρόνια, όταν εξετάζοντας 19 σιδερένιους τρίποδες της Ολυμπίας, διαπίστωσα ότι ο ένας από αυτούς ήταν φωσφορούχος (0.200%)<sup>8</sup>. Η έρευνά μου εκείνη είχε οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι τα μόνα μεταλλεύματα στον ελλαδικό, αλλά και στον γύρω χώρο, που περιέχουν φωσφόρο σε υψηλά ποσοστά (έως και 1%) απαντούν μόνο στο δυτικό τμήμα της Κρήτης. Έχω προσωπική εμπειρία στο θέμα, γιατί, όταν λειτουργούσαν οι υψικάμνοι της Χαλκουργικής, χρησιμοποιήσαμε μεταλλεύματα από πολλές περιοχές της χώρας μας. Ανάμεσά τους ήταν και τα φωσφορούχα της Κρήτης. Είχαμε τότε εκκαίνευσες περί τους 10.000 τόκους στην υψικάμνο, αλλά διακοφίσαμε, γιατί ο φωσφόρος μάς δημιούργησε προβλήματα στην παραγωγή συρματουργικών προϊόντων. Με άλλα λόγια, ο φωσφορούχος γόμφος θα είχε παραχθεί μάλλον με την εκκαίνευση φωσφορούχων μεταλλευμάτων της Κρήτης, κι αυτό αποτελεί μία ακόμη μαρτυρία, ότι στο μεταλλουργικό κέντρο του Λαυρίου χρησιμοποιούσαν ως πρώτη ύλη παραγωγή σιδήρου, εκτός από τα εγχώρια μεταλλεύματα, και άλλα, εισαγωγής. Αυτό εξάλλου γίνεται και σήμερα σε όλα τα μεγάλα και σύγχρονα πα-

ραγωγικά κέντρα σιδήρου και χάλυβα, που για το λόγο αυτό βρίσκονται εγκατεστημένα κοντά στη θάλασσα.

Άλλα ενδιαφέροντα συμπεράσματα της μελέτης αυτής:

1) Οι αρχαίοι Έλληνες μεταλλουργοί χρησιμοποιούσαν για την παραγωγή σιδερένιων συνδέσμων και γόμφων σκόπιμα ένα συνδυασμό ταινιών μαλακού σιδήρου και σκληρού χάλυβα, και ποτέ μόνο μαλακό σίδηρο ή μόνο σκληρό χάλυβα. Αυτό θα έκαναν μάλλον και για την παραγωγή άλλων και εργαλείων.

2) Η εξαιρετική αντιδιαβρωτική του αρχαίου σιδήρου οφείλεται στη μεγάλη καθαρότητά του και ιδιαίτερα στην πολύ χαμηλή περιεκτικότητά του σε θείο. Τούτο αποτελεί το μεγάλο μυστικό, αλλά και την απάντηση στο αρχικό μας ερώτημα, γιατί άντεξαν οι σιδερένιοι σύνδεσμοι τόσους αιώνες στο γύρω διαβρωτικό περιβάλλον.

Και τέλος κάτι πολύ σημαντικό:

Οι μελέτες, τόσο οι δικές μου όσο και των συναδέλφων, καταλήγουν σε ένα πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα: Αντίθετα απ' ό,τι πίστευαν για πολλά χρόνια πολλοί ερευνητές, ολόκληρη η Ελλάδα, και όχι μονάχα το Λαύριο, αποτελούσε ένα μεγάλο και αξιόλογο μεταλλουργικό κέντρο παραγωγής αργύρου, μολύβδου, χαλκού, αλλά και σιδήρου και χάλυβα.

## Βιβλιογραφία

1, και 2. Θουκυδίδης, «Η Ιστορία του Πελοποννησιακού πολέμου», 1. 93, και 6. 88.

3. Ηρόδοτος, 1. 186.

4. Λεβαδέου Κ., «The Structural Iron of the Parthenon», Journal of the Iron and Steel Institute, January 1956, Vol. 182, 49-66.

5. Σύνδεσμοι του Εργεθίου κατασκευάστηκαν με τεχνική που εναθρίσκαιτα στο Μεσαίωνα στα «δαμασκήνα σπαθιά». Ακαδημία Αθηνών, 1981, Τόμος 56, 173-190.

6. Κονοφάγος Κ. και Παπαδημητρίου Γ., «Η Τεχνική Παραγωγής του Σιδήρου και Χάλυβος από τους Αρχαίους Έλληνες στην Αττική κατά την Κλασική Περίοδο». Ακαδημία Αθηνών, 1981, Τόμος 56, 148-172.

7. Δείγματα από αρχαία μεταλλεία της Λακωνίας μου έδωσε ο κ. Ι. Μπασιόκας για χημική εξέταση. Στην περιοχή αυτή έχει διαπιστώσει μεγάλη δραστηριότητα στην παραγωγή σι-

δήρου κατά τους κλασικούς χρόνους.

8. Βαρουφάκης Γ., «Χημική και Μεταλλουργική Έρευνα γύρω από 19 Σιδερένια Ποδιά Τριπόδων της Γεωμετρικής Εποχής», Διατριβή για Υψηλούς, Απρίλιος 1979.

## How the Iron Clamps and Dowels of the Temples of the Athenian Acropolis Have Resisted to the Century-long Corrosion?

G. Varoufakis

The writer examines the iron clamps and dowels of Parthenon and Erechthion from a metallurgical and chemical perspective. The investigation has led to very significant results regarding: a) the possible number of strips used as raw material, and b) the procedure followed by ancients to weld them into a plate and subsequently into final double-T clamps or dowels. It turns out that they seem to have intentionally employed a combination of mild and hard steel strips welded together by hot hammering. Occasionally, a hard steel strip would be sandwiched between two mild iron ones or a mild iron strip between two hard steel layers. Macro investigation of longitudinal inner sections of these clamps proved useful in assessing their structure as compared to the conventional analysis which is confined to their external surface. The reason is that overlapping, caused during hot shaping, often produces false images which are easily misconstrued.

Extensive chemical analyses revealed that impurities were extremely low, especially sulphur content (0.005%); this must have had played an increasing effect on their high corrosion resistance. On the contrary, mild structural steel used by the Balanos team during restoration, and containing sulphur more than 10 times as much, showed a weak corrosion resistance with the known detrimental consequences on the monuments of Acropolis.

The high corrosion resistance of the ancient clamps and dowels suggests that iron ores of high purity must have been used as raw material. Investigation carried out by the writer strengthens the view that such clean ores could exist at Lavrion at that remote times, but most probably they were also imported from other parts of Greece or abroad. Laconia could be a principal source of rich and clean ones, and the writer does not think that the then existing political tension between Athens-Sparta would have been a real obstacle in the field of their commercial relations.

Finally, he hopes that this research will plug some of the gaps in our understanding of iron working in the Greek antiquity.