

ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ.— Οί χαλύβδινοι σύνδεσμοι τοῦ Ἐρεχθείου κατασκευάσθηκαν μὲ τεχνική πού ξαναβρίσκεται στό Μεσαίωνα στή «Δαμασκηνά σπαθιά», ὑπό Κ. Κονοφάγου - Γ. Παπαδημητρίου*. Ἐνεκωνώθη ὑπό τοῦ Ἀκαδημαϊκοῦ κ. Περικλῆ Θεοχάρη.

Ἡ Ἐπιτροπή Συντηρήσεως τῆς Ἀκροπόλεως ἔχει ἀναλάβει τήν ἀναστήλωση τοῦ Ἐρεχθείου, μὲ δύο κυρίως σκοπούς: πρῶτον τὴ μεταφορὰ τῶν Καρυάτιδων μέσα στό Μουσεῖο τῆς Ἀκροπόλεως γιὰ τὴ διατήρησή τους, καὶ ἀντικατάστασή τους μὲ ὁμοιώματα, δεύτερον γιὰ νὰ ἀπαλλάξει τὰ διάφορα τμήματα τοῦ Ναοῦ ἀπὸ τοὺς σιδηρένιους συνδέσμους, χωρὶς συνήθως ἐπικάλυψη, πού χρησιμοποιήθηκαν κατὰ τὴν ἀναστήλωση ἀπὸ τὸν Ὅμιλο Μαλάμου στὶς ἀρχὲς τοῦ αἰῶνα.

Οἱ τελευταῖοι εἶχαν ὑποστῆ ὀξειδωση καὶ τὸ ὀξειδίο διογκούμενο προκαλοῦσε διάρρηξη τῶν μαρμαρίνων τμημάτων. Ὁ σίδηρος ἀντικαθίσταται τώρα ἐπιτυχῶς μὲ τιτάνιο πού εἶναι ἀνοξειδωτο.

Οἱ ἀρχαῖοι Ἕλληνες χρησιμοποιοῦσαν σιδηρένιους συνδέσμους, οἱ ὁποῖοι ἀμέσως μετὰ τὴν τοποθέτησή τους καλύπτονταν ἀπὸ παντοῦ μὲ χιτὸ μόλιβδο («μολιβδοχόσεις»). Τοῦτο ἐμπόδιζε τὴν ὀξειδωση τοῦ σιδήρου ἀπὸ τὸ ὀξυγόνο τοῦ ἀέρος καὶ γενικότερα προστάτευε ἀποτελεσματικὰ τὸ σίδηρο ἀπὸ τὴ διάβρωση, σύμφωνα μὲ τοὺς γνωστούς σχετικούς φυσικοχημικούς λόγους.

Ἀπὸ τοὺς ὀκτὼ ἀρχαίους συνδέσμους καὶ γόμφους, πού ἀναφέρουμε στὴν ἀνακοίνωσή μας, τρεῖς ἀρχαῖοι σύνδεσμοι παραδόθηκαν στοὺς ἀνακρινοῦντες τὸ πρῶτο ἔξάμηνο τοῦ 1980 καὶ μελετήθηκαν. Δύο ἄλλοι σύνδεσμοι καὶ τρεῖς γόμφοι παραδόθηκαν γιὰ ἐξέταση τὸν Ὀκτώβριο τοῦ ἴδιου ἔτους καὶ μελετήθηκαν μὲ τὸν ἴδιο τρόπο.

Ὅλοι οἱ παραπάνω σιδηροὶ σύνδεσμοι διατηρήθηκαν σὲ πολὺ καλὴ κατάσταση ἀπὸ πλευρῶς διαβρώσεως λόγω τῆς προστασίας τοῦ μολύβδου, καὶ καλύπτονται μόνο ἀπὸ ἓνα λεπτότατο στρώμα ὀξειδίου.

* C. CONOPHAGOS-G. PAPADIMITRIOU, *Les crampons en acier de l'Erechtheion ont été fabriqués selon la technique qu'on retrouve au Moyen Âge pour les «Épées Damassées».*

Ἡ μελέτη τῶν συνδέσμων καὶ γόμφων ἀποκάλυψε ὅτι μόνον ἓνας σύνδεσμος, (ὁ μικρότερος), εἶναι ἀπὸ σίδηρο. Ὅλοι οἱ ἄλλοι σύνδεσμοι καὶ γόμφοι περιέχουν καὶ χάλυβα μὲ διάφορες περιεκτικότητες σὲ ἄνθρακα.

Σύνδεσμοι καὶ γόμφοι ἀπὸ τὸν Παρθενώνα ἔχουν ἐξετασθεῖ παλαιότερα, τοῦτο δὲ ἀναφέρει συγκεκριμένα ὁ Κ. Λιβαδεὺς [4].

Ὁ Κ. Λιβαδεὺς διαπίστωσε ἀνομοιογένεια συστάσεως τοῦ ὑλικοῦ, τὸ ὁποῖο εἶναι «μερικῶς μὲν ἐκ μιλακοῦ σιδήρου καὶ μερικῶς ἐκ χάλυβος, (διαφόρου περιεκτικότητας σὲ ἄνθρακα) καὶ σκωριῶν».

Ἡ πρωτοτυπία αὐτῆς τῆς ἀνακοινώσεως συνίσταται στὴ διαπίστωση ὅτι κατὰ τὸ τέλος τοῦ 5^{ου} αἰῶνα π. Χ., ὁπότε ἔγινε ἡ ἀνέγερση τοῦ Ἑρεχθείου (421 - 405 π. Χ.), οἱ ἀρχαῖοι Ἑλληνας ἐγνώριζαν καὶ ἐφάρμοζαν τὶς ἀρχὲς τῆς τεχνικῆς τῶν λεγομένων «Δαμασκηῶν σπαθιῶν», τὰ ὁποῖα, ὡς γνωστόν, κατασκευάζονταν κατὰ τὸν Μεσαίωνα μὲ αὐτογενῆ συγκόλληση ἐναλλασσομένων λεπτῶν φύλλων σιδήρου καὶ χάλυβος. Τὴν τεχνικὴ αὐτὴ βλέπουμε σαφῶς στοὺς συνδέσμους τοῦ Ἑρεχθείου πού μελετήσαμε καὶ τὴν περιγράφουμε στὶς ἐπόμενες σελίδες.

Ἡ τεχνικὴ αὐτὴ ἀποδεικνύεται ὅτι ἦταν γνωστὴ τουλάχιστον ἀπὸ τὸν 5^ο αἰῶνα π. Χ. στὴν Ἀθήνα καὶ ἐφαρμοζόταν ἀναμφισβητήτως στοὺς συνδέσμους τῶν μεγάλων λαξευμένων λίθων τῶν ἀρχαίων κτηρίων.

Τοῦτο, ὅμως, σημαίνει ἐπὶ πλέον ὅτι ἡ τεχνικὴ αὐτὴ θὰ ἐφαρμοζόταν ἀσφαλῶς καὶ γιὰ ὄπλα καὶ ἐργαλεῖα πού ἀπαιτοῦν πολὺ μεγαλύτερη ἀντοχὴ καὶ ἐλαστικότητα ἀπὸ τοὺς συνδέσμους.

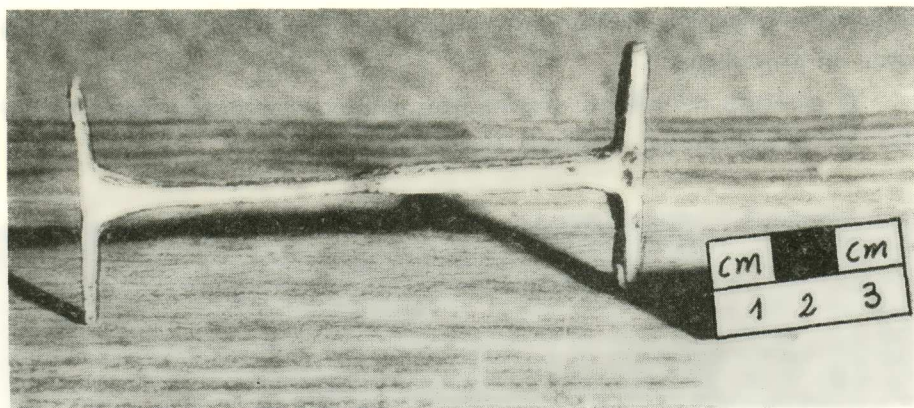
ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ

α) Εὐρήματα ἀπὸ σίδηρο.

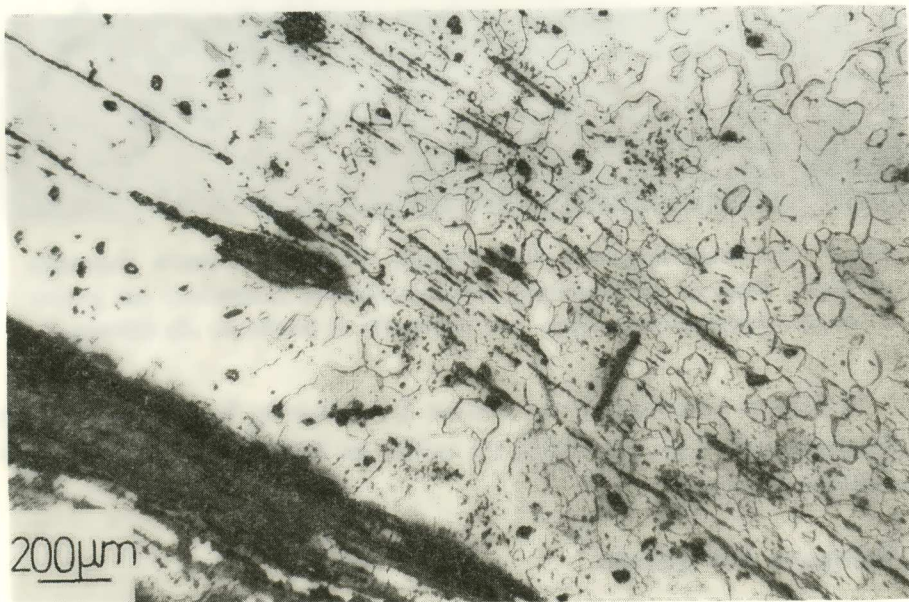
Μόνον ἓνας σύνδεσμος, ὁ μικρότερος ἀπ' ὅσους ἐξετάσαμε, βρέθηκε νὰ εἶναι ἀπὸ σίδηρο (εἰκ. 1).

Οἱ μικρογραφίες τῶν εἰκ. 2 καὶ 3 δείχνουν πράγματι ὅτι πρόκειται γιὰ μαλακὸ σίδηρο μὲ ἐσωτερικὰ ἐγκλείσματα σκωρίας, τὰ ὁποῖα ἔχουν ἐπιμηκυνθεῖ κατὰ τὴ σφυρηλασία.

Τὸ μέταλλο εἶναι γενικὰ λεπτόκοκκο (ASTM N^ο 6 - 8) ἀλλὰ κατὰ τόπους χονδρόκοκκο (ASTM N^ο 3 - 4). Δὲν παρατηρεῖται κανένα ἕχνος ἐνδοτραχύνσεως τοῦ μετάλλου, τὸ ὁποῖο ἔχει ἀνακρυσταλλωθεῖ πλήρως. Τὸ τελευταῖο σημαίνει ὅτι τὸ μέταλλο ἔχει ὑποστεῖ ἀνόπτηση. Ἡ τεχνικὴ τῆς ἀνόπτησεως, ὡς ἐκ τούτου, ἦταν γνωστή.



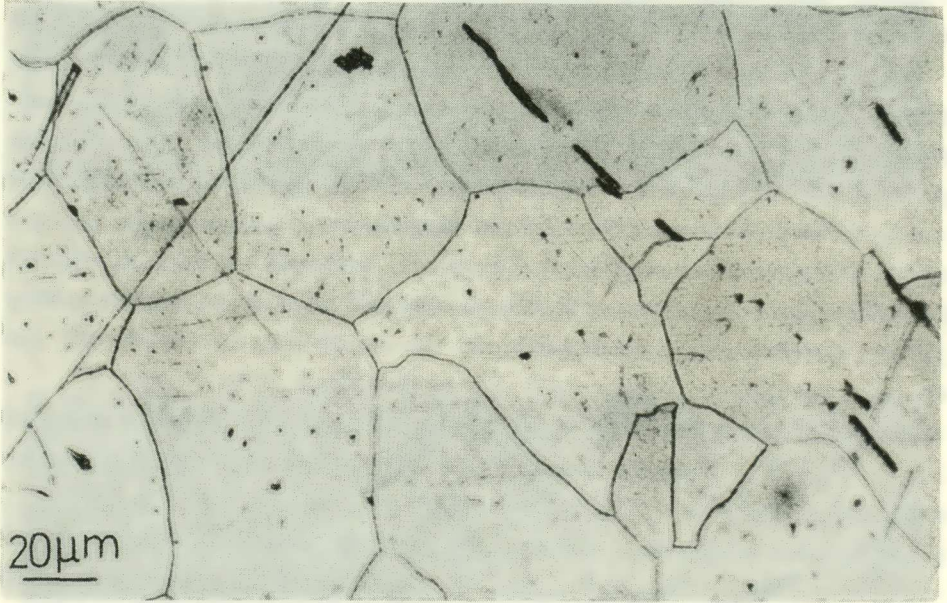
Είχ. 1. Σύνδεσμος Νο 1 από τὸ Ἐρέχθειο. Ἄπο μαλακὸ σίδηρο.



Είχ. 2. Σύνδεσμος Ἐρεχθείου Νο 1. Σίδηρος. Ὀπτική μικρογραφία. Προσβολή με Nital. (X 50). Φερρίτης καὶ ἐγκλείσματα σκωρίας (μαῦρα) ποὺ ἔχουν ἐπιμη-
κυνθεῖ κατά τή σφυρηλασία.

Ἡ μικρογραφικὴ ἐξέταση δείχνει συμπαγὲς μέταλλο, χωρὶς ρωγμές, ἐκτὸς ἀπὸ ὀρισμένα εὐμεγέθη ἐγκλείσματα σκωρίας στὸ ἕνα πέλημα, τὰ ὁποῖα διακρίνονται καὶ στὴν εἰκόνα 1.

Ἡ ποιότητα τοῦ σιδήρου (σφυρηλάτος σίδηρος = wrought iron) προσφέρεται γιὰ σφυρηλασία καὶ αὐτογενῆ συγκόλληση.

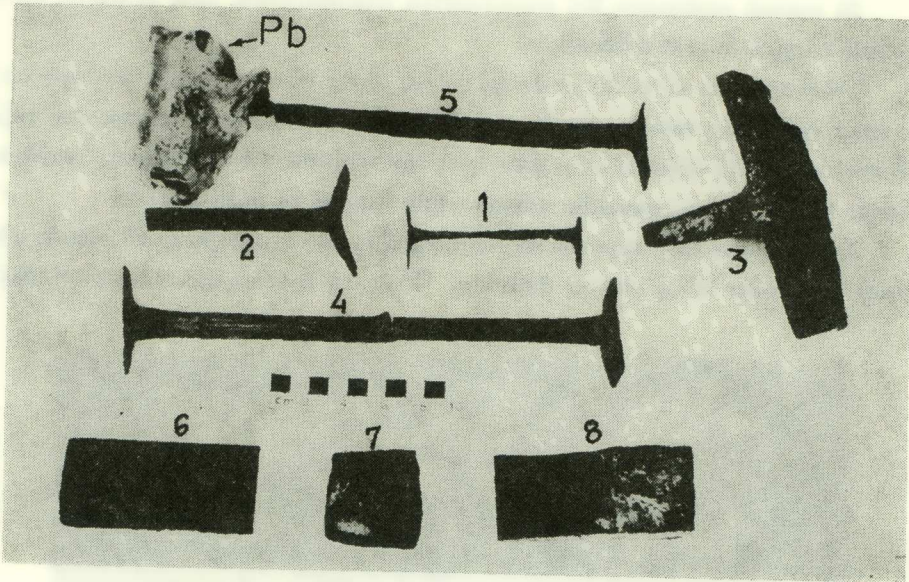


Εἰκ. 3. Σύνδεσμος Ἐρεχθείου Νο 1. Σίδηρος. Ὀπτικὴ μικρογραφία. Προσβολὴ μὲ Nital. Φερρίτης σὲ κατάσταση ἀνακρυσταλλώσεως (ισαξονικός) καὶ μερικὰ ἐπιμήκη ἐγκλείσματα σκωρίας, πὸν μαρτυροῦν τὴ διεύθυνση τῆς ἐλάσεως.

Ἡ ἐξέταση μὲ φθορισμὸ τῶν ἀκτίνων X ἀποδεικνύει ὅτι ὁ σίδηρος περιέχει ὡς προσμίξεις 0.09% Ni καὶ 0.06% Cu καθὼς καὶ ὀλίγο Zn καὶ Pb. Δὲν περιέχει καθόλου Mn καὶ Si.

β) Εὐρήματα ἀπὸ χάλυβα.

Ὅλα τὰ ὑπόλοιπα ἐπτὰ εὐρήματα (εἰκ. 4) παρουσιάζουν, ὅπως εἶχε διαπιστώσει ὁ Κ. Λιβαδεύς, ἕτερογενῆ μορφή ἀπὸ πλευρᾶς συστάσεως καὶ δομῆς. Ὁ Κ. Λιβαδεύς, ὅμως, δὲν ἔφθασε στὴν ἀνακάλυψη τοῦ μυστικοῦ τῆς μεταλλοτεχνίας των.



Είκ. 4. Σύνδεσμοι και Γόμφοι του Έρεχθείου.

1. Σύνδεσμος από σίδηρο.

2, 3, 4, 5: Σύνδεσμοι από σίδηρο και χάλυβα.

6, 7, 8: Γόμφοι.

Στό σύνδεσμο 5 φαίνεται στο άριστερό πέλαμα και τὸ περίβλημα τοῦ μολύβδου.

Ορισμένες ζώνες τοῦ δοκίμιου παρουσιάζονται σὰν καθαρὸς φερρίτης, χωρὶς ἄνθρακα, ἐνῶ ἄλλες ζώνες παρουσιάζουν ἐνανθράκωση πὸν κυμαίνεται ἀπὸ 0.1 ὠς καὶ 1.2% σὲ ἄνθρακα, ἀνάλογα μὲ τὴν περιοχὴ καὶ τὸ δοκίμιο.

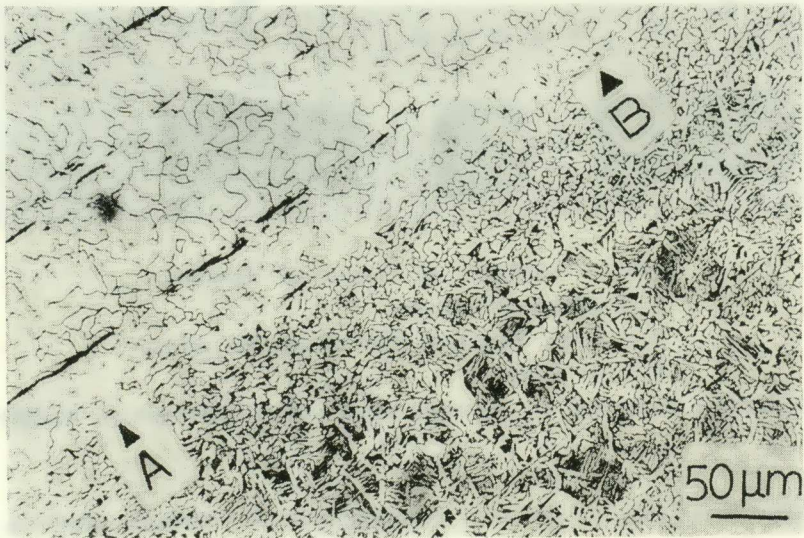
Ἔτσι στὶς ἐνανθρακωμένες περιοχές :

Ὁ σύνδεσμος 2	παρουσιάζει περίπου	0.1 - 0.4% C
» » 3	» »	0.1 - 1.2% C
» » 4	}	παρουσιάζουν περίπου 0.1 - 0.6% C
» » 5		
Ὁ γόμφος 6	}	παρουσιάζουν περίπου 0.1 - 0.6% C
» » 7		
» » 8		

Σε καμμιά περίπτωση δὲν παρατηρεῖται ἐνδοτραχύνηση, ὅλες οἱ φάσεις εἶναι σὲ κατάσταση ἀνακρυσταλλώσεως.

Ἄξιοσημείωτο εἶναι ὅτι οἱ ἀνθρακοῦχες ζῶνες τῶν συνδέσμων δὲν εὐρίσκονται κατὰ προτίμηση κοντὰ στὴν ἐξωτερικὴ ἐπιφάνεια, ἀλλὰ εἶναι κυρίως στὴ μάζα τοῦ συνδέσμου. Τὸ γεγονός αὐτὸ ἀποκλείει τὴν περίπτωσιν ἐπιφανειακῆς ἐνανθρακώσεως ἐνὸς ὀγκώδους τεμαχίου σιδήρου πρὶν ἢ μετὰ τὴ μορφοποίηση.

Στὶς περισσότερες περιπτώσεις παρατηροῦμε ὅτι ἡ μεταβολὴ τῆς δομῆς ἀπὸ τὴ μία ζώνη στὴν ἄλλη γίνεται ἀπτόμα. Ἔτσι τὴ λεπτὴ φερριτοπερλιτικὴ δομὴ



Εἰκ. 5. Μικρογραφία $\times 200$.

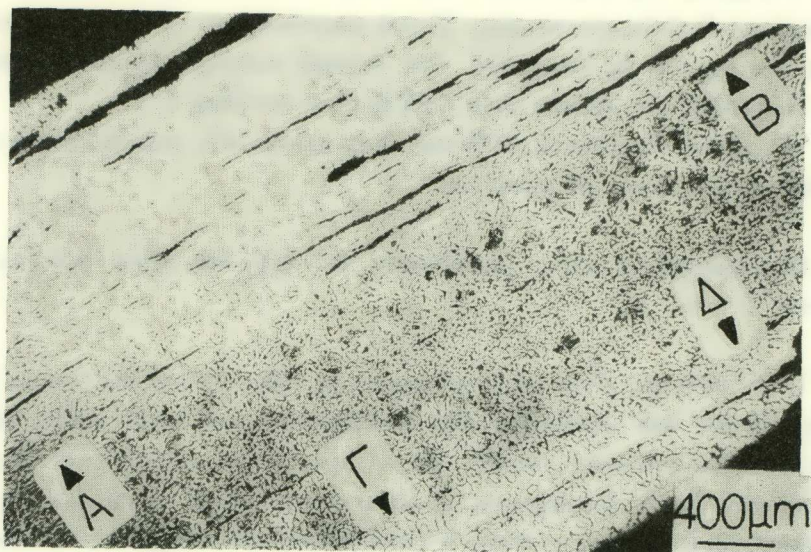
α) Ἡ σχεδὸν εὐθεῖα γραμμὴ AB εἶναι τὸ ἴχνος, στὸ ἐπίπεδο τῆς μικρογραφίας, τῆς διαχωριστικῆς ἐπιφανείας μεταξὺ τοῦ ἐλάσματος σιδήρου (ἄνω ἀριστερὰ) καὶ γάλυβος (κάτω δεξιὰ). Τὸ ἔλασμα τοῦ σιδήρου εἶναι φερρίτης σὲ κατάσταση ἀνακρυσταλλώσεως. Τὸ ἔλασμα τοῦ γάλυβος ἔχει φερριτοπερλιτικὴ δομὴ, μὲ τὸ φερρίτη βελονοειδοῦς μορφῆς (Widmanstätten).

διαδέχεται συνήθως μιὰ φερριτικὴ μὲ χονδρὸς κόκκους ἢ ἀκόμη μιὰ ἄλλη φερριτοπερλιτικὴ δομὴ μὲ διαφορετικὴ περιεκτικότητα σὲ ἄνθρακα καὶ μορφολογία.

Ἡ προσεκτικὴ παρατήρησις τῆς διαχωριστικῆς ἐπιφανείας μεταξὺ δύο ζωνῶν, πείθει ὅτι πρόκειται γιὰ ἐπιφάνεια μεταξὺ δύο διαφορετικῶν τεμαχίων ποὺ ἔχουν συγκολληθεῖ αὐτογενῶς, μὲ θέρμανση καὶ σφυρηλασία. Βλέπε χαρακτηριστικὴ μικρογραφία τῆς εἰκ. 5. Οἱ διαχωριστικὲς ἐπιφάνειες τῶν ζωνῶν σιδήρου

καὶ τῶν ζωνῶν χάλυβος, κατόπιν λειάνσεως καὶ προσβολῆς μὲ ἀντιδραστήριο φαίνονται σαφῶς ὡς ἐπιφάνειες αὐτογενοῦς συγκολλήσεως, ὅπως ἀναφέρουμε στὸν ὑπότιτλο τῆς εἰκ. 5.

Σὲ ὀρισμένες περιπτώσεις ἡ διαχωριστικὴ γραμμὴ μεταξὺ δύο ζωνῶν εἶναι πολὺ χαρακτηριστικὴ, ἄλλοτε πάλι ἡ ἀνακρυστάλλωση ποὺ ἀκολουθῆσε τὶς διαδο-



Εἰκ. 5. Μικρογραφία $\times 25$.

β) Φαίνονται σαφῶς τὰ ἴχνη AB καὶ ΓΔ τῶν διαχωριστικῶν ἐπιφανειῶν μεταξὺ τριῶν ἐναλλασσομένων λεπτῶν ἐλασμάτων σιδήρου - χάλυβος - σιδήρου, ποὺ ἔχουν συγκολληθεῖ αὐτογενῶς μὲ σφρηλασία. Τὰ μαῦρα ἐπιμήκη σώματα στὰ ἐλάσματα τοῦ σιδήρου εἶναι ἐγκλείσματα σκωρίας ποὺ ἔχουν ἐπιμηκυνθεῖ κατὰ τὴ διεύθυνση ἐλάσεως. Εἶναι ἐξάλλου παράλληλα πρὸς τὶς ἐπιφάνειες αὐτογενοῦς συγκολλήσεως AB καὶ ΓΔ. Τοῦτο ἀποδεικνύει ὅτι ἡ σφρηλασία ἔγινε ἐγκαρσίως πρὸς τὶς διαχωριστικὲς ἐπιφάνειες AB καὶ ΓΔ, γιὰ νὰ ἐπιτευχθεῖ ἡ αὐτογενὴς συγκόλληση τῶν φύλλων.

χικὲς σφρηλατήσεις καὶ ἀναθερμάνσεις σὲ θερμοκρασίες τῆς τάξεως τῶν 1300°C , καθὼς καὶ ἡ διάχυση τοῦ ἄνθρακος πρὸς τὸν καθαρὸ φερριτῆ, κάνουν τὴ μετάπτωση ἀπὸ τὴ μία ζώνη στὴν ἄλλη δυσδιάκριτη.

Κοντὰ στὴ διαχωριστικὴ ἐπιφάνεια παρατηροῦνται συχνὰ σκωρίαὶ ἢ ὀξειδια, μικρορωγμὲς ἢ κενά.

Σὲ τυπικὲς περιπτώσεις, ὅπου διακρίνονται καθαρὰ οἱ διαχωριστικὲς ἐπιφάνειες, οἱ ζῶνες ἔχουν πάχος ποὺ δὲν ὑπερβαίνει τὰ 2 χιλιοστόμετρα.

Ἐναφέρουμε μερικὲς παρατηρήσεις γιὰ τὴ μορφολογία τῶν φάσεων :

Ἐκκαθὰ φερρίτης εἶναι συνήθως χονδρόκοκκος καὶ περιέχει πολυάριθμα ἔγκλεισματα σκωρίας. Στὸ ἐσωτερικὸ τῶν κόκκων παρατηροῦνται συχνὰ πολυάριθμα κατακρημνίσματα καρβονιτριδίων. Τὸ μέγεθος τῶν κόκκων κατὰ ASTM εἶναι συνήθως 4 - 5.

Ἐκκαθὰ φερρίτης τῆς φερριτοπερλιτικῆς δομῆς εἶναι λεπτόκοκκος, καὶ ἔχει συνήθως λιγώτερα ἔγκλεισματα σκωρίας. Συχνὰ παρουσιάζεται μὲ μορφὴ Widmannstätten, κυτταροειδῆ ὡς βελονοειδῆ. Δὲν περιέχει κατακρημνίσματα καρβονιτριδίων. Τὸ μέγεθος τῶν κόκκων κατὰ ASTM εἶναι συνήθως 7 - 8.

Ἐκκαθὰ περλίτης εἶναι λεπτός, οὐδέποτε ὅμως τροοσιτικῆς μορφῆς. Συχνὰ παρατηρεῖται σφαιροποίηση τοῦ σεμεντίτη.

Οἱ παρατηρήσεις αὐτὲς μᾶς ὀδηγοῦν στὰ ἑξῆς δύο κύρια ἀποτελέσματα I καὶ II.

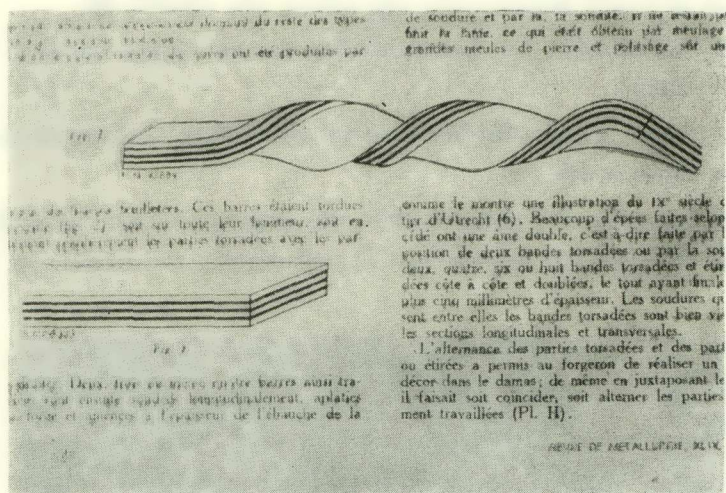
I. Οἱ σύνδεσμοι εἶναι κατασκευασμένοι ὡς ἑξῆς: Ἐκκαθὰ τεχνίτης ἔπαιρνε λεπτὰ φύλλα χάλυβος ποὺ προέρχεται ἀπὸ ἔνανθράκωση καὶ λεπτὰ φύλλα σιδήρου πάχους μερικῶν χιλιοστῶν ἑναλλάξ καὶ τὰ συγκλοοῦσε αὐτογενῶς μὲ θέρμανση σὲ κατάλληλη ὑψηλὴ θερμοκρασία καὶ σφυρηλασία. Μετὰ τὴ συγκόλληση αὐτὴ ἔπακολουθοῦσαν διάφορες στρέψεις ἢ ἀναδιπλώσεις τοῦ συστήματος καὶ νέα σφυρηλασία γιὰ τὴν καλύτερευση τῆς γενικῆς δομῆς.

Ἄλλὰ αὐτὴ εἶναι ἀκριβῶς ἡ μέθοδος τῶν «Δαμασκηνῶν σπαθιῶν» τοῦ Μεσαίωτος, ποὺ εἶχε ἔξ ἄλλου Ἰνδικὴ προέλευση [2]. Ἡ στρέψη ἰδιαίτερος ἦταν οὐσιώδης, ὅπως φαίνεται καὶ στὶς εἰκ. 6 καὶ 7, ἀπὸ τὴ μελέτη τοῦ A. France-Lanord [3].

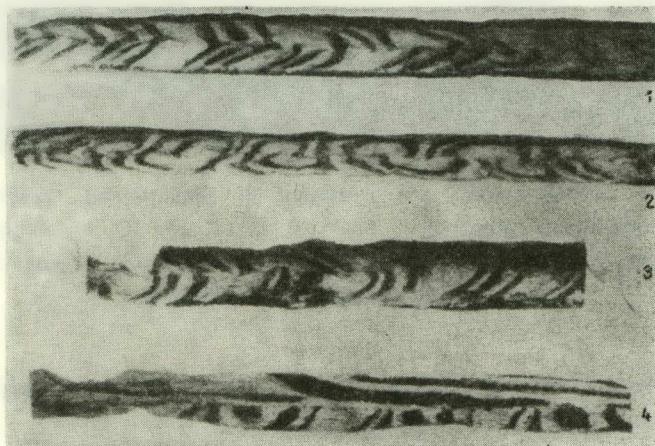
Ἐκκαθὰ τελικὸς σκοπὸς αὐτῆς τῆς τεχνικῆς τῶν Ἀρχαίων καὶ τοῦ Μεσαίωτος, ἦταν ἀφ' ἑνὸς ἡ μεγάλη εὐλυγισία ποὺ ἐπιτυγχανόταν μὲ τὸν ἰδανικὸ συνδυασμὸ ἑνὸς ὀλκίμου ὑλικοῦ (σιδήρου) καὶ ἑνὸς ὑλικοῦ μὲ ὑψηλὸ ὄριο ἐλαστικότητας (χάλυβος).

Γιὰ τὰ σπαθιά τοῦ Μεσαίωτος ἐπιτυγχανόταν καὶ διακοσμητικὸς σκοπὸς [3, 4]. Ἡ ἐπιφάνεια τῶν σπαθιῶν τῆς Δαμασκοῦ μετὰ ἀπὸ λείανση καὶ προσβολὴ σὲ διαβρωτικὸ περιβάλλον ἔδινε τὰ περίφημα τυχαῖα σχέδια, ποὺ ὀφείλονται στὴ διαφορετικὴ προσβολὴ τοῦ χάλυβος καὶ τοῦ σιδήρου (εἰκ. 7).

Οἱ ἀρχαῖοι Ἕλληνες ἐπιζητοῦσαν, μ' αὐτὴ τὴν τεχνικὴν, μόνον τὴ μεγαλῦτερη ἀντοχή. Ἀκολουθοῦσαν τὴν ἴδια τακτικὴν στρέψεων καὶ ἀναδιπλώσεων γιὰ νὰ ἔχουν ἕνα σχετικὰ ἰσότροπο ὑλικὸ ἀπὸ ἀπόψεως μηχανικῶν ἰδιοτήτων.



Είκ. 6. Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής των «Δαμασκητών Σπαθιών». Έναλλασσόμενα φύλλα σιδήρου (λευκά) και χάλυβος (μαύρα) συγκολλούνται αυτογενώς και κατόπιν στρέφονται για να υποστούν νέα σφυρηλασία (κατά France - Lanord) (3).



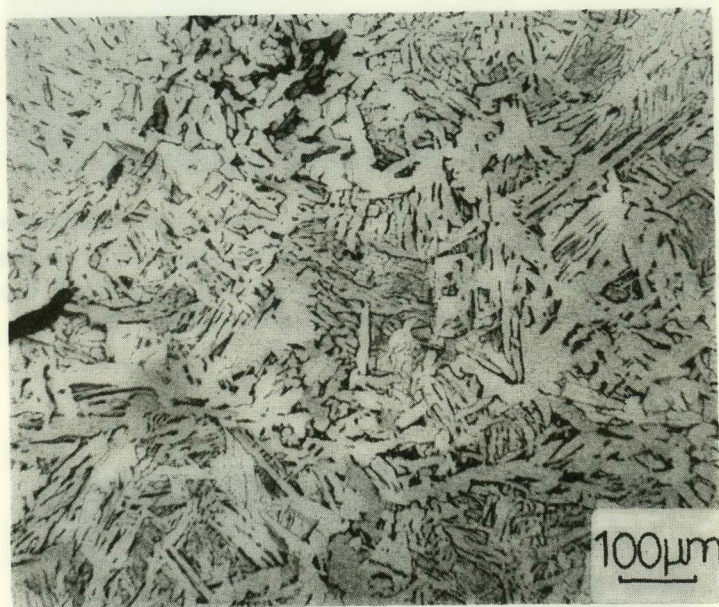
Είκ. 7. Έπιφανείες σπαθιών της Δαμασκού με τα περίφημα «Δαμασκηνά σχέδια». Τα σχέδια προκύπτουν μετά από λείανση και προσβολή της επιφάνειας με κατάλληλα διαβρωτικά μέσα. Οί λευκές περιοχές είναι σίδηρος και οί μαύρες χάλυψ (κατά France - Lanord) (3).

II. Ἡ συγκόλληση μὲ σφυρηλάτηση καὶ ἡ διαμόρφωση δὲν μποροῦσαν νὰ γίνουν παρὰ σὲ ὑψηλὴ θερμοκρασία, τῆς τάξεως τῶν 1300°C [5].

Ἴδου οἱ ἀποδείξεις ὅτι ἐπακολουθοῦσε σχετικὰ ταχεῖα ἀπόψυξη καὶ στὴ συνέχεια ἀνόπτηση:

— Ἡ ὕπαρξη φερριτῆ Widmanstätten προϋποθέτει ὑπερθέρμανση καὶ σχετικὰ ταχεῖα ἀπόψυξη (εἰκ. 8).

— Ἡ κατακρήμνιση καρβονιτριδίων στὴ φερριτικὴ μήτρα προϋποθέτει ἐπίσης ταχεῖα ἀπόψυξη (μὲ ἀποτέλεσμα τὴ συγκράτηση τοῦ ἀζώτου σὲ διάλυση)

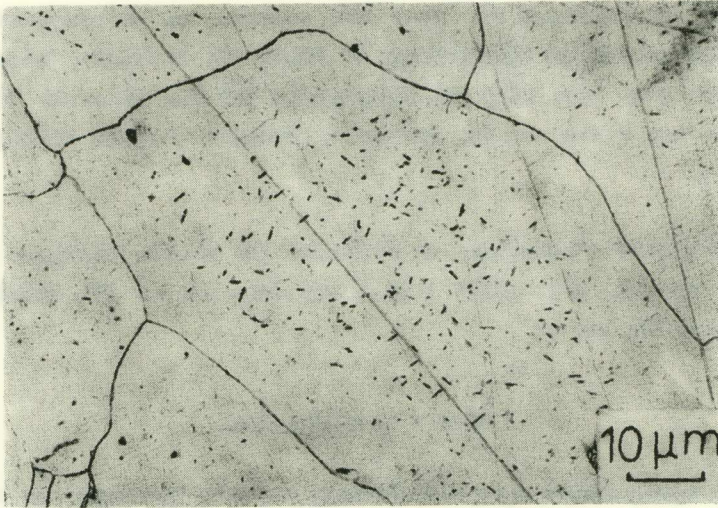


Εἰκ. 8. Μικρογραφία στὸ σύνδεσμο 2. Βελονοειδῆς φερριτῆς Widmanstätten (ἄσπρος) + περλίτης (γκρίζος). Ὁ σχηματισμὸς φερριτῆ Widmanstätten ἀπαιτεῖ ὑπερθέρμανση στὴν περιοχὴ τοῦ ὀστενίτου καὶ συνέχεια ταχεῖα ἀπόψυξη.

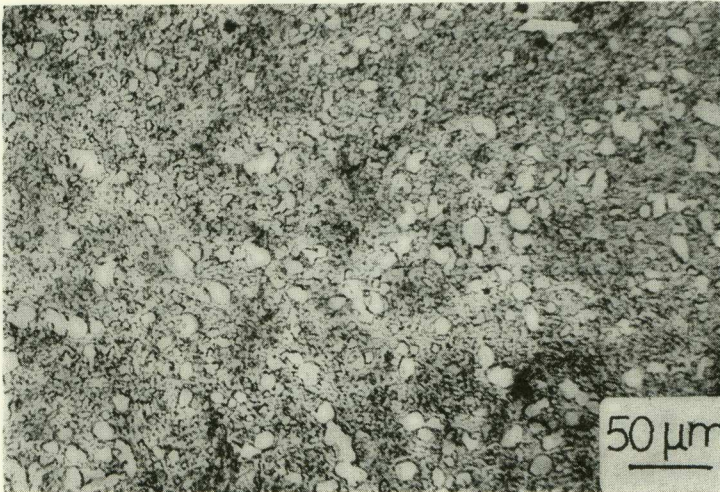
καὶ στὴ συνέχεια ἀνόπτηση ἄνω τῶν 200°C (ποὺ ἐπιφέρει κατακρήμνιση τῶν καρβονιτριδίων) (εἰκ. 9).

— Ἡ ὕπαρξη σφαιροποιημένου σεμενίτη προϋποθέτει ἀνόπτηση στοὺς $650 - 700^{\circ}\text{C}$ (εἰκ. 10).

— Δὲν ὑπάρχει ἴχνος ἐνδοτραχύνσεως, ἀλλὰ σαφῆς κατάσταση ἀνακρυσταλλώσεως μετὰ ἀπὸ ἀνόπτηση.



Είκ. 9. Μικρογραφία στο σύνδεσμο 2. Καρβονιτρίδια στο έσωτερικό κόκκων φερρίτη των έλασμάτων του σιδήρου. *Η κατακρήμνιση καρβονιτριδίων προϋποθέτει ταχεία απόψυξη και στη συνέχεια άνόπτηση στην περιοχή των 200 - 700° C.



Είκ. 10. Μικρογραφία στο σύνδεσμο 3. Σφαιροποίηση του σεμεντίτου της περλιτικής φάσεως (τά λευκά σωματίδια είναι σφαιροποιημένος σεμεντίτης σε μήτρα φερρίτου). *Η σφαιροποίηση προϋποθέτει απαραίτητα άνόπτηση σε θερμοκρασία 600 - 700° C.

Ἔτσι τὰ λεπτὰ φύλλα χάλυβος καὶ τὰ φύλλα μαλακοῦ σιδήρου μετὰ τὴ συγκόλληση μὲ σφυρηλάτηση καὶ μετὰ ἀπὸ στρέψεις καὶ σφυρηλατήσεις, διαμορφώνονταν τελικῶς μὲ σφυρηλάτηση ἐν θερμῷ στὸ ἐπιθυμητὸ σχῆμα. Κατόπιν ψύχονταν στὸν ἀέρα μέχρι τὴ θερμοκρασία τοῦ περιβάλλοντος. Ἐπακολούθησε αὐτὸ ποὺ λέγεται σήμερα ἀποτακτικὴ - ἀνακρυσταλλωτικὴ ἀνόπτηση γύρω στοὺς 600°C.

Ἀπὸ πλευρᾶς προσμίξεων οἱ σύνδεσμοι καὶ γόμφοι περιέχουν καὶ πάλι Ni = 0.05 - 0.10 %, Cu = 0.06 - 0.12 % καὶ ὀλίγο Zn καὶ Pb, ἐνῶ δὲν περιέχουν καθόλου Mn καὶ Si.

ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Στὴν πρώτη ἀπὸ τὶς τρεῖς ἀνακοινώσεις μας στὴν Ἀκαδημία μὲ τίτλο «Ἡ τεχνικὴ τῆς παραγωγῆς σιδήρου καὶ χάλυβος ἀπὸ τοὺς ἀρχαίους Ἑλληνας στὴν Ἀττικὴ κατὰ τὴν κλασσικὴ περίοδο» ἐξηγήσαμε τὰ διαδοχικὰ στάδια τῆς τεχνικῆς παραγωγῆς σιδήρου καὶ χάλυβος μὲ ἀφετηρία τὸ σιδηρομετάλλευμα καὶ προτείναμε μίαν σχετικὴ ἀναπαράσταση.

Οἱ ἀρχαῖοι Ἑλληνας ἐγνώριζαν νὰ παράγουν φύλλα σιδήρου ἀλλὰ καὶ χάλυβος, ὅπως ἀναφέραμε στὴν ἀνακοίνωση αὐτή.

Οἱ Ἑλληνας χρησιμοποιοῦσαν τὸ σίδηρο ἀλλὰ καὶ τὸ χάλυβα πολὺ πρὶν τὸν 5ο αἰῶνα π. Χ. Τὸ χάλυβα χρησιμοποιοῦσαν γιὰ τὴν κατασκευὴ βελονιῶν γιὰ τὴ λάξευση πετρωμάτων καὶ τὴν ὄξυση στοῶν καὶ φρεάτων στὰ Μεταλλεῖα. Μὲ χάλυβα ἀσφαλῶς κατασκεύαζαν καὶ μεγάλο μέρος τῶν ὄπλων τους.

Γνωστὴ ἦταν ἐπίσης καὶ ἡ βαφὴ τοῦ χάλυβος [6 - 11].

Εἶδαμε ὅτι στοὺς συνδέσμους τοῦ Ἐρεχθεῖου ἐφαρμοζόταν ἡ μέθοδος τῶν «Δαμασκηνῶν σπαθιῶν», ἡ ὁποία πιθανότατα ἐφαρμοζόταν καὶ σὲ ὄπλα καὶ ἐργαλεῖα. Τὸ τελευταῖο, ὅμως, γιὰ τὰ ὄπλα καὶ ἐργαλεῖα πρέπει νὰ ἐρευνηθεῖ περαιτέρω.

Οἱ ἀρχαῖοι Ἑλληνας, πάντως, δὲν χρησιμοποιοῦσαν χάλυβα, ἀλλὰ τὸ σίδηρο, ὅταν δὲν ὑπῆρχε ἀπαιτήση ἰδιαιτέρων ἰδιοτήτων σκληρότητας, ἀντοχῆς καὶ ἐλαστικότητας.

Ἔτσι ὁ πρῶτος ἀπὸ μᾶς εἶχε τὴν εὐκαιρία νὰ πιστοποιήσει πράγματι κατὰ τὸ 1973 ὅτι τὰ σιδηρὰ ἄκρα δοράτων τῆς Χαιρώνειας ἦταν ἀπὸ σίδηρο. Διαπίστωσε ἐπίσης ὅτι τρεῖς σφύρες τοῦ Μουσείου τοῦ Λαυρίου εἶναι ἀπὸ σίδηρο.

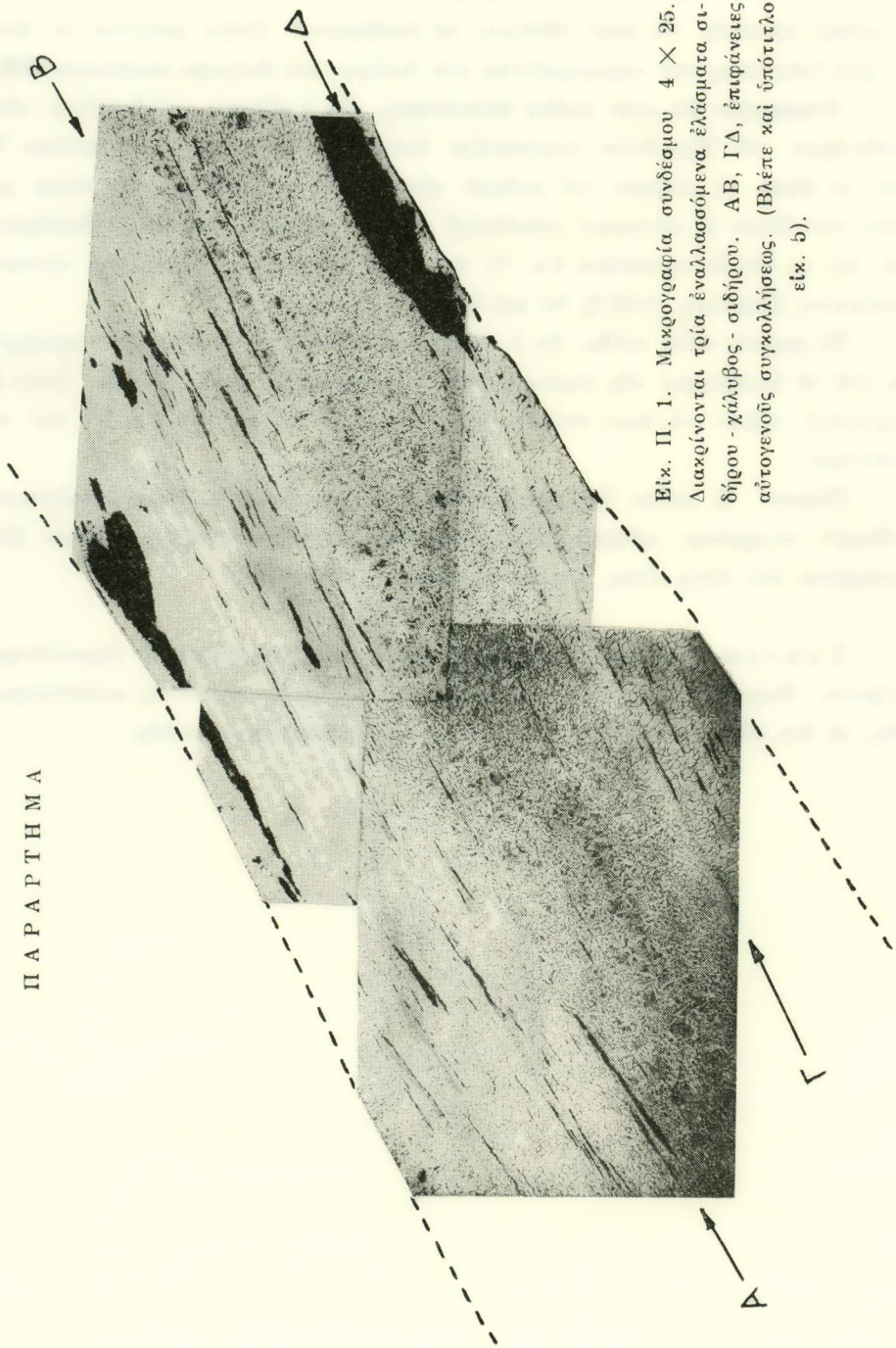
Τὰ βελόνια, βεβαίως, ἦταν ἀσφαλῶς ἀπὸ χάλυβα καὶ μάλιστα βαμένο, διότι τὰ σιδηρὰ ἐργαλεῖα θὰ ἦταν ἀδύνατο νὰ ἀποδώσουν. Τοῦτο φαίνεται κ' ἀπὸ τὰ ἴχνη λαξεύσεως ποὺ παρατηροῦνται στὸ Λαύριο, στὰ διάφορα πετρώματα [12].

Ἀναφέραμε καὶ στὴν πρώτη ἀνακοίνωση, ὅτι ὁ σίδηρος καὶ ὁ χάλυψ τῶν συνδετήρων τοῦ Ἐρεχθείου παρουσιάζει διάγραμμα φθορισμοῦ τῶν ἀκτίνων Χ πού, μὲ βάση τὴ μέτρηση τοῦ ρυθμοῦ τῶν κτύπων στὶς αἰχμές, συμπίπτει μὲ κεῖνο ποὺ ἔδωσε τὸ σύντηγμα μεταλλικοῦ σιδήρου τῆς Σούρεζας [13]. Περιέχουν δηλ. καὶ τὰ δύο ὡς προσμίξεις Cu, Ni καὶ ὀλίγο Zn καὶ Pb. (Ἀνάλυση συσσωματώματος Σούρεζας: 0.05% Ni καὶ 0.12% Cu).

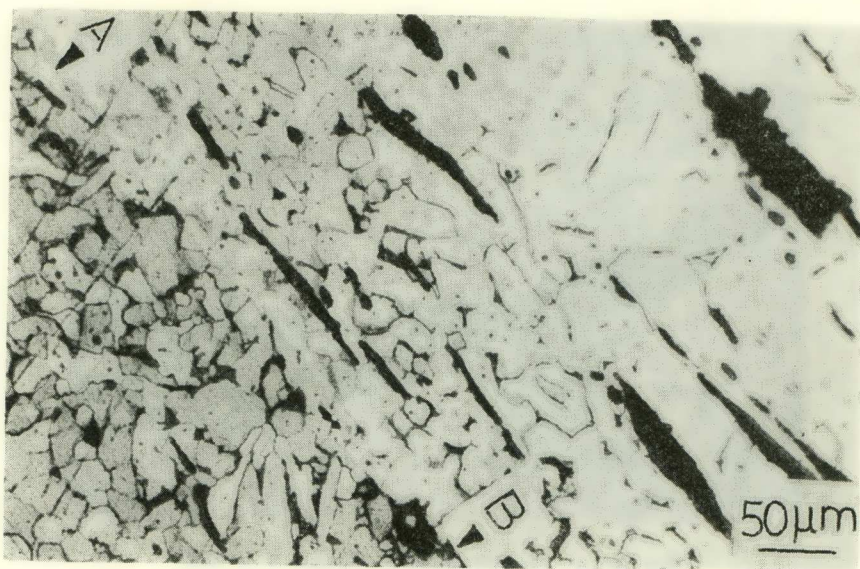
Τὸ γεγονός αὐτὸ πείθει ὅτι ὁ σίδηρος καὶ χάλυψ τῶν συνδετήρων προέρχεται ἀπὸ τὰ ἐργαστήρια τῆς περιοχῆς τοῦ «Ἀσκληπιακοῦ», τοῦ Λαυρίου, ὅπου ἡ παραγωγή πρέπει νὰ ἦταν σπουδαιοτάτη ὄχι μόνον σὲ ποιότητα ἀλλὰ καὶ σὲ ποσότητα.

Περὶτὸ νὰ ποῦμε ὅτι πιστοποιήσαμε μὲ τὴ βοήθεια ἰδίων ἀναλύσεων καθαρῶν συγχρόνων σιδηρῶν, ὅτι ἡ σύμπτωση αὐτῶν τῶν διαγραμμάτων δὲν προέρχεται ἀπὸ ἄλλη αἰτία, π. γ. ἀπὸ ἐπίδραση τοῦ ὄργανου.

Σ η μ ε ί ω σ η : Γιὰ νὰ μὴ ἐπιβαρύνουμε τὴν ἀνακοίνωση μὲ περισσότερα σχήματα, θεωροῦμε ἀναγκαῖο νὰ περιλάβουμε ὀρισμένες πρόσθετες μεταλλογραφίες, σὲ ἓνα σύντομο παράρτημα στὸ τέλος τῆς ἀνακοινώσεως αὐτῆς.



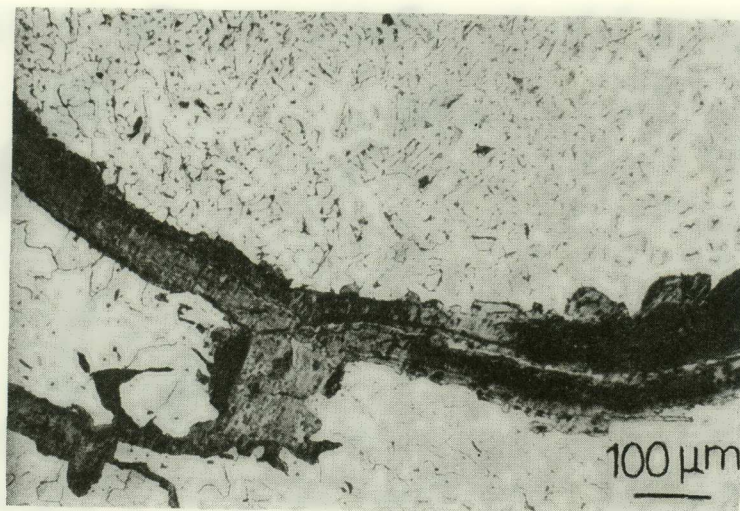
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Είκ. Π. 2. Μικρογραφία συνδέσμου 2×200 .

AB: Ίχνος, στο επίπεδο της μικρογραφίας, της επιφανείας συγκολλήσεως μεταξύ ελάσματος σιδήρου (άνω δεξιά), που περιέχει και πολυάριθμα επιμηκυσμένα έγκλεισματα σκουριάς και ελάσματος χάλυβος με φερριτοπερλιτική δομή (κάτω αριστερά). Το έλασμα του σιδήρου έχει ένανθρακωθεί έλαφρά, κοντά στη συγκόλληση, με διάχυση άνθρακος από το έλασμα του χάλυβος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Εικ. Π. 3. Μικρογραφία συνδέσμου 3×100 .

Διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ ελάσματος σιδήρου (κάτω) και χάλυβος (άνω).
Ἡ σκωρία (μαύρη) ὑπέστη ἔκθλιψη κατὰ τὴ σφυρηλασία καὶ διείσδυσε, σὲ
ρευστή ἢ ἡμίρευστη κατάσταση, στὴν ἀσυνέχεια τῆς συγκολλήσεως, ὅπου ἔχει
παγιδευθεῖ.

R É S U M É

Cette communication est le résultat du travail des auteurs, dans le cadre de la Commission pour la Conservation et la Restauration de l'Acropole.

Les auteurs ont utilisé le Laboratoire de Métallurgie Physique de l'Université Technique Nationale d'Athènes pour examiner huit pièces en acier qui servaient à l'assemblage des blocs de l'Érechtheion (fig. 4).

Trois pièces étaient des goujons, cinq autres des crampons en double T (fig. 4). Elles ont été récupérées lors des travaux de restauration de l'Érechtheion. Toutes les pièces étaient en bon état, parce que lors de leur mise en place elles étaient recouvertes par du plomb fondu qui les protégea contre la corrosion durant 25 siècles.

L'examen métallographique a démontré qu'une seule pièce en double T était en fer (fig. 1, 2, 3). Toutes les autres contenaient du fer et de l'acier. Cette observation avait déjà été faite pour les crampons du Parthénon [1].

L'examen attentif nous a néanmoins permis de vérifier que ce n'était pas un mélange fortuit de fer et d'acier, mais qu'il s'agissait bien d'une succession de feuilles minces de fer et d'acier alternées. Ces feuilles d'une épaisseur de 2 à 3 millimètres, avaient été soudées par forgeage à haute température.

La ligne presque droite qui sépare le fer de l'acier (fig. 5, Π_1 , Π_2 et Π_3 de l'annexe) représente en fait la trace de la soudure autogène sur le plan de la micrographie.

L'examen détaillé montre que la teneur de l'acier en carbone est de 0.1 à 0.6 %, quelquefois jusqu'à 1 %.

L'acier comporte parfois des structures de ferrite du type Widmanstätten ou de cémentite globulaire (fig. 8, 10). La ferrite contient des carbonitrides (fig. 9).

Ces observations nous mènent aux conclusions suivantes :

— Les Grecs anciens utilisaient la technique des «épées damassées». Des feuilles minces de fer et d'acier alternées étaient soudées à haute température par forgeage. Après soudage, l'ensemble était plié, torsadé et martelé de nouveau (fig. 6, 7). On obtenait ainsi un produit ayant la ductilité du fer et la résistance de l'acier.

— Les Grecs anciens connaissaient le traitement de recuit, qui conduisait à l'amélioration des propriétés par détensionnement et recristallisation.

— Un autre résultat intéressant, c'est que les crampons de l'Érechtheion étaient fabriqués avec du fer produit au Laurium dans la région de Souréa. Ceci est démontré par la présence d'impuretés Cu, Ni et Zn, qui sont les mêmes dans les crampons de l'Érechtheion et dans les loupes de fer spongieux produites au Laurium [13]. Le Laurium était donc aussi un centre de production de fer et d'acier.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κ. Λιβαδέυς (Ανακ. Α. Βουρνάζου), 'Επί της μεταλλουργίας του σιδήρου του Παρθενῶνος καὶ τῆς ἐρμηνείας χρήσεως ἀρχαίας καμίνου Πρακτ. Ἀκαδ. Ἀθηνῶν (1943), σ. 338-343.
2. T. A. Rickard, The Primitive Smelting of Iron, p. 100-101, Amer. Journal of Archaeology, XLII (1939) 85.
3. A. France-Lanord, La fabrication des épées demassées mérovingiennes et carolingiennes. Revue de Métallurgie, XLIX (1952) 411.
4. J. Piaskowski, The manufacture of medieval damascened knives. Journal of the iron and steel Institute 202 (1964) 561.
5. Κ. Κονοφάγος, «Μεταλλογνωσία». Τόμος I (1964), II (1965), III (1967). Ἀθῆναι.
6. Πλούταρχος, π. X. Quaest. conv. VIII, 9, 3. Ἐπίσης: de def. orac. 41, 47. De prim. frig. 2, 20, κλπ.
7. Philon, De Somn. I, 6.
8. Ἴπποκράτης, De vict. rat. I, 4.
9. Ὀμηρος, I 391.
10. Ἡσίοδος, Θεογονία 161, 188, 239. Ἔργα 147.
11. Ἡροδότου, VII, 141.
12. Κ. Κονοφάγου, Τὸ Ἀρχαῖο Λαύριο καὶ ἡ Ἑλληνικὴ τεχνικὴ παραγωγὴς ἀργύρου. Ἀθῆναι, Ἐκδοτικὴ Ἑλλάδος (1980).
13. Κ. Κονοφάγου - Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Ἡ τεχνικὴ τῆς παραγωγῆς σιδήρου καὶ χάλυβος ἀπὸ τοὺς ἀρχαίους Ἕλληνας στὴν Ἀττικὴ κατὰ τὴν κλασσικὴ περίοδο. Σύγχρονη ἀνακοίνωσή μας στὴν Ἀκαδημία Ἀθηνῶν.
14. T. Wertime - J. Muhly, «The Coming of the Age of Iron». New Haven and London Univ. Press (1980). Περιέχει ὀλοκληρωμένη βιβλιογραφία, σχετικὰ μὲ τὴν ἱστορία τῆς τεχνικῆς παραγωγῆς σιδήρου καὶ χάλυβος.