

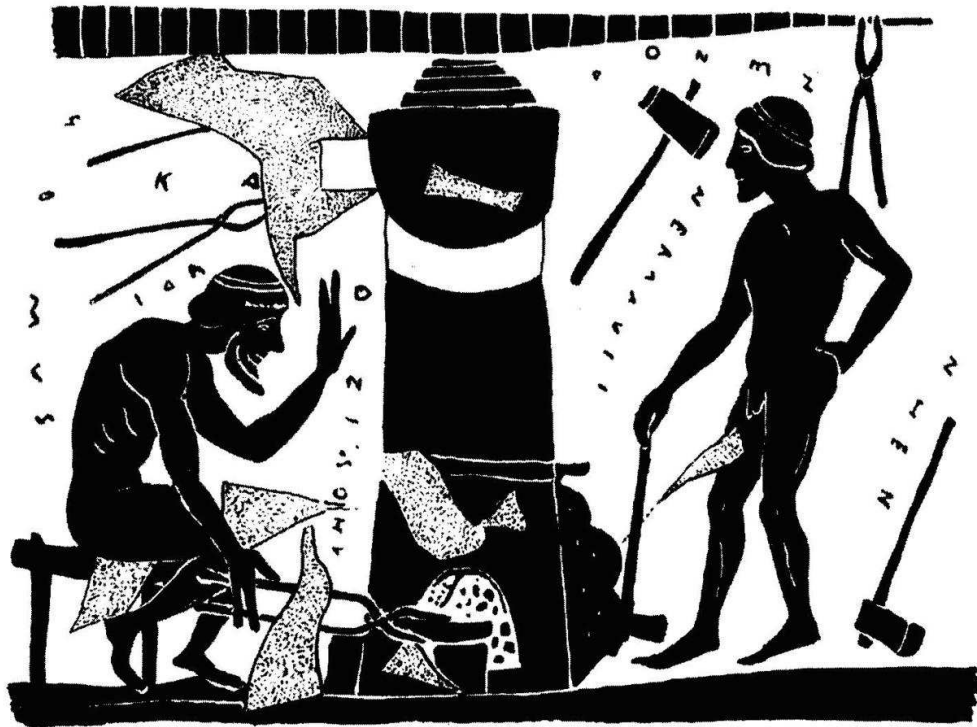


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Συσχέτιση μεταλλουργικών χαρακτηριστικών και  
ιδιοτήτων των σιδηρών συνδέσμων του ναού του  
Επικούριου Απόλλωνα

Δασαργύρη Γεωργία



Επιβλέπων Καθηγητής Φούρλαρης Γεώργιος

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2011

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΩΝ  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ  
ΣΙΔΗΡΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ  
ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ

### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με την αμέριστη βοήθεια του καθηγητή Βαρουφάκη Γεώργιου, τη συμπαράσταση του διδάκτορα Μεταλλουργίας Νικολάου Ιωάννη, και την ευγενική χορηγία των μηχανημάτων της Χαλυβουργικής Α.Ε. Κωνσταντίνος Αγγελόπουλος.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
---------------	---

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

1.1 Η Ιστορία του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα.....	2
1.2 Γιατί ο σίδηρος χρειάστηκε 2500 χρόνια, για να εμφανιστεί στην ιστορία του ανθρώπου .....	14

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

2.1 Μεταλλογνωσία.....	26
------------------------	----

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

3.1 Μακροσκοπική μελέτη των συνδέσμων.....	38
3.2 Σκληρότητες.....	53
3.3 Έρευνα στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο.....	65
3.4 Χημική ανάλυση.....	102
3.5 Ανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (S.E.M.).....	106

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

4.1 Η διαφορά της μεταλλουργικής τεχνολογίας ανάμεσα στην κλασική και στην αρχαϊκή εποχή.....	141
--	-----

## *Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>*

5.1 Σύνοψη.....	149
-----------------	-----

<i>Βιβλιογραφία.....</i>	<i>151</i>
--------------------------	------------

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση πέντε σιδερένιων συνδέσμων που αφαιρέθηκαν από τον Ναό του Επικούριου Απόλλωνα από την Επιτροπή Συντήρησής του. Η ανάλυσή τους αφορά στη διαμόρφωσή τους, στη σύστασή τους στη μικροδομή τους, στις σκληρότητές τους και στον τρόπο διαμόρφωσής τους, εφόσον αυτοί κατασκευάστηκαν γύρω στο 430 π.Χ.

Αρχικά εισάγεται το θέμα παρουσιάζοντας τους βασικούς σκοπούς της παρούσας έρευνας. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία για το Ναό του Επικούριου Απόλλωνα καθώς και ορισμένα ιστορικά στοιχεία για τη γνώση της αρχαιομεταλλουργίας της εποχής εκείνης. Παρουσιάζονται οι αρχαίες κάμινοι τήξης και παρατίθενται αποσπάσματα από αρχαία λογοτεχνικά κείμενα που αφορούν στην παραγωγή του σιδήρου. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται χρήσιμες έννοιες της μεταλλογνωσίας και της μεταλλοτεχνίας που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην μεταλλογραφική κυρίως ανάλυση των συνδέσμων. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά και οι πέντε σύνδεσμοι ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Μακροσκοπική μελέτη των συνδέσμων.
- Σκληρομέτρηση των συνδέσμων .
- Εξέταση στο οπτικό μικροσκόπιο.
- Χημική ανάλυση των άκρων ενός συνδέσμου.
- Εξέταση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (S.E.M.).

Στο τέλος κάθε σταδίου διεξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Στο τέταρτο κεφάλαιο συγκρίνεται η τεχνολογία των συνδέσμων του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα με την τεχνολογία των συνδέσμων του Ναού της Τραπεζιάς και του Παρθενώνα, οι οποίοι είναι προγενέστεροι. Στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας έρευνας.

Βασικοί στόχοι της έρευνας είναι:

- Κατανόηση των συνθηκών όπου αυτοί παράχθηκαν.
- Κατανόηση της μεταλλουργίας της εποχής.
- Ανακάλυψη του τρόπου διαμόρφωσής τους έως και το τελικό τους σχήμα.
- Απάντηση στο ερώτημα της ύπαρξης συγκεκριμένων προδιαγραφών.
- Ανακάλυψη του τρόπου εργασίας του κάθε τεχνίτη.

- Η ταυτοποίηση της πρώτης ύλης-μεταλλεύματος.
- Η μεταξύ τους σύγκριση ως προς τη σύσταση, τη διαμόρφωση, την τεχνολογία και τον τρόπο παραγωγής.
- Η σύγκριση με το Ναό του Παρθενώνα και το Ναό της Τραπεζιάς.

## ABSTRACT

The subject of the present thesis is the analysis of five iron T clamps removed from the Temple of Epikoyrios Apollon from his Committee of Maintenance. Their analysis concerns in their configuration, in their constitution in their microstructure, in their hardness measurement and in their way of configuration, provided that these were manufactured round 430 B.C.

Initially is imported the subject presenting the basic aims of the present research. In the first chapter is reported the history the Temple of Epikoyrios Apollon as well as the main points of our knowledge related to the archaeometallurgical science. They are presented ancient furnaces and they are mentioned extracts from ancient literary texts that concern in the production of iron. In the second chapter is reported the main terminology of the science of materials that played decisive role in the metallographic analysis of the iron T clamps. The third chapter is related to the main survey made for the iron T clamps, included the following steps:

- Optical observation of the iron T clamps after their proper preparation (cutting, grinding, polishing and chemical reaction by Nital.)
- Hardness measurement.
- Examination in the metallographic microscope.
- Chemical analysis of the iron T clamps.
- Examination in the electronic microscope (S.E.M.).

In the end of each stage they are carried out interesting conclusions. In the fourth chapter is compared the technology of contacts of Temple of Epikoyrios Apollon with the technology of contacts of the Temple of Trapeza and the Acropolis, which are built before the Epikoyrios temple. In the last chapter are reported concisely the conclusions that were assembled at the duration of the present research.

Fundamental objectives of research are:

- Comprehension of conditions where these were produced.
- Comprehension of the ancient metallurgy.
- Discovery of their way of configuration up to their final form.
- Answer in the question of existence of specific measures in these ages..
- Discovery of the way of work of each smith.
- The identification of the main origin of the mine.



- The each other comparison as regards the constitution, the configuration, the technology and the way of production.
- The comparison with the iron T clamps of the Acropolis and the Temple of Trapeza

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1***

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σιδερένιοι σύνδεσμοι του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα που δεσπόζει στις Βάσσεις της Πελοποννήσου εδώ και 2500 περίπου χρόνια, αφαιρέθηκαν από την Επιτροπή συντήρησής του, με σκοπό την αποκατάσταση των φθορών και την αναστήλωσή του.

Πέντε από αυτούς τους συνδέσμους χρησιμοποιήθηκαν μετά από την σχετική χορήγηση άδειας της Επιτροπής Συντήρησης και της αρχαιολογικής Υπηρεσίας με σκοπό την όσο το δυνατόν ολοκληρωμένη έρευνά τους.

Η έρευνα των συνδέσμων είχε σκοπό την κατανόηση των συνθηκών όπου αυτοί παράχθηκαν. Επίσης στόχευε στην κατανόηση της μεταλλουργίας της εποχής, όταν ακόμη ο σίδηρος δεν μπορούσε να αγγίζει το σημείο τήξης του, συγκριτικά με τη θεωρητική γνώση για την αρχαιομεταλλουργία, την ανακάλυψη του τρόπου διαμόρφωσής τους έως και το τελικό τους σχήμα, την απάντηση στο ερώτημα της ύπαρξης συγκεκριμένων προδιαγραφών καθώς και του τρόπου εργασίας του κάθε τεχνίτη. Στόχευε μέσω της μικροσκοπικής ανάλυσής τους, να ξεκαθαριστεί ο τρόπος της κατεργασίας τους και το ποσοστό της καταπόνησής τους. Μέσω της χημικής ανάλυσής τους σκοπεύεται η ταυτοποίηση της πρώτης ύλης-μεταλλεύματος. Στόχος επίσης είναι η μεταξύ τους σύγκριση ως προς τη σύσταση, τη διαμόρφωση, την τεχνολογία και τον τρόπο παραγωγής. Τελικός στόχος η σύγκριση με τον προγενέστερο Ναό του Παρθενώνα και το Ναό της Τραπεζιάς για τη διαπίστωση τυχόν διαφορών στις τεχνολογίες των τριών ναών και τυχόν εξελίξεων στη μεταλλουργία με το πέρασμα του χρόνου.

Το κάθε δοκίμιο έχρηζε μεγάλης προσοχής, μιας και τυχόν λανθασμένος χειρισμός του θα απέβαινε μοιραίος για την περαιτέρω διερεύνησή του, και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Συνεπώς οι πέντε σύνδεσμοι χειρίστηκαν με μεγάλη προσοχή και μεθοδικότητα, λόγω της ιστορικής τους σημασίας αλλά και του γεγονότος ότι είναι πέντε αναντικατάστατα δοκίμια.

## 1.1 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ

Στο γυμνό, βραχώδες τοπίο του όρους Κωτιλίου των Βασσών της Φιγάλειας βρίσκεται ένας από τους σημαντικότερους και επιβλητικότερους ναούς της αρχαιότητας, αφιερωμένος στον Επικούριο Απόλλωνα. Ο Ναός βρίσκεται σε περίοπτη θέση, και συγκαταλέγεται στον κατάλογο της Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς της U.N.E.S.C.O. δίπλα στις Αιγυπτιακές Πυραμίδες, στον Παρθενώνα και άλλα μνημεία παγκόσμιας εμβέλειας.

Ο Ναός ήταν αφιερωμένος στον Επικούριο Απόλλωνα από τους Φιγαλείς διότι τους βοήθησε να ξεπεράσουν μια επιδημία πανώλης. Οι κάτοικοι της Φιγάλειας είχαν ιδρύσει, από τον 7ο αι.π.Χ., ιερό του Απόλλωνος Βασσίτα, τον οποίο και λάτρευαν με την προσωνομία του Επικουρίου- συμπαραστάτη στον πόλεμο ή στην αρρώστια. Το επίθετο Επικούριος δόθηκε την εποχή των πολέμων με τους Σπαρτιάτες γύρω στο 650 π.Χ. Ο τελικός ναός κατασκευάστηκε το δεύτερο μισό του 5ου αιώνα π.Χ. (420-410 π.Χ.) από τον Ικτίνο ο οποίος ήταν και ο αρχιτέκτονας του Παρθενώνα γι' αυτό και χαρακτηρίστηκε ως «ο δίδυμος Παρθενώνας».



Εικόνα 1.1 Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα, πριν από την έναρξη των εργασιών αποκατάστασής του (Φωτογράφιση: Ι. Ιωαννίδου – Λ. Μπαρτζιώτη). (από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ)

Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα αποτελεί ένα από τα καλύτερα σωζόμενα μνημεία της κλασικής αρχαιότητας. Συγκεκριμένα, είναι ο καλύτερα διατηρημένος ναός μετά το ναό του Ηφαίστου στην Αθήνα. Από όλους τους ναούς της Πελοποννήσου, ύστερα από το ναό της Τεγέας, θα μπορούσε αυτός να πάρει την πρώτη θέση για το κάλλος του μαρμάρου και το αρμονικό σύνολο.

Η ανέγερσή του τοποθετείται στο 420-400 π.Χ. και αρχιτέκτονάς του θεωρείται ο Ικτίνος, που σε αυτό το δημιούργημά του κατόρθωσε να συνδυάσει πολλά αρχαϊκά χαρακτηριστικά, που επέβαλλε η συντηρητική θρησκευτική παράδοση των Αρκάδων, με τα νέα γνωρίσματα της κλασικής εποχής. Ο ναός που βλέπει σήμερα ο επισκέπτης δεν είναι ο αρχαιότερος που κτίστηκε στο χώρο. Ο πρώτος ναός του Απόλλωνα οικοδομήθηκε γύρω στα τέλη του 7ου αι. π.Χ., πιθανότατα στην ίδια θέση. Ακολούθησαν μία ή δύο οικοδομικές φάσεις του, γύρω στο 600 και γύρω στο 500 π.Χ., αντίστοιχα, από τις οποίες σώζονται πολυάριθμα αρχιτεκτονικά μέλη, όπως το κεντρικό δισκοειδές πήλινο ακρωτήριο με την πλούσια πολύχρωμη γραπτή διακόσμηση, κεραμίδια και πήλινα ακροκέραμα.

Ο κλασικός ναός έχει θεμελιωθεί πάνω στο φυσικό βράχο, σε ειδικά διαμορφωμένο πλάτωμα. Δεν έχει το συνήθη προσανατολισμό Α-Δ, αλλά Β-Ν, ίσως για λατρευτικούς λόγους, που συνδέονται με την αρκαδική θρησκευτική παράδοση, δεδομένου ότι και άλλοι ναοί στην περιοχή παρουσιάζουν τον ίδιο προσανατολισμό. Για την κατασκευή του έχει χρησιμοποιηθεί ανοιχτόχρωμος τοπικός ασβεστόλιθος, ενώ ορισμένα μέρη της οροφής, τα κιονόκρανα του σηκού και ο γλυπτός διάκοσμος είναι από μάρμαρο. Ο ναός είναι ο μοναδικός που συνδυάζει στοιχεία των τριών αρχιτεκτονικών ρυθμών της αρχαιότητας. Είναι δωρικός, περίπτερος, δίστυλος εν παραστάσι, με πρόναο, σηκό, άδυτο και οπισθόδομο. Έχει 6 κίονες στις στενές και 15 στις μακρές πλευρές, αντί της καθιερωμένης για την εποχή αναλογίας 6 x 13. Έτσι, η μορφή του είναι περισσότερο επιμήκης, όπως στους αρχαϊκούς ναούς. Στο εσωτερικό του σηκού, κατά μήκος των μακρών πλευρών υπάρχουν από πέντε ιωνικοί ημικίονες, που αποτελούν απόληξη κάθετων στον τοίχο τοιχαρίων, τα οποία διαμορφώνουν κόγχες. Το τελευταίο ζεύγος των ημικίωνων τέμνουν διαγώνια τον τοίχο του σηκού και όχι κάθετα όπως οι υπόλοιποι. Ανάμεσα σε αυτούς υπήρχε ένας κίονας, που έφερε το αρχαιότερο γνωστό ως σήμερα στην αρχαία ελληνική αρχιτεκτονική κορινθιακό κιονόκρανο, το οποίο γνωρίζουμε από τα σχέδια των πρώτων περιηγητών (θραύσματά του φυλάσσονται στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο). Κατά μία άποψη ο κίονας αυτός αποτελούσε ανεικονική παράσταση θεότητας, ακολουθώντας τις

βαθείς λατρευτικές παραδόσεις της Αρκαδίας, ενώ σύμφωνα με ορισμένους μελετητές, κορινθιακοί ήταν και οι δύο διαγώνιοι ημικίονες εκατέρωθεν του κεντρικού κορινθιακού. Στο άδυτο, που βρισκόταν πίσω από τον κίονα αυτό, πιθανότατα φυλασσόταν το λατρευτικό άγαλμα του θεού. Στον ανατολικό του τοίχο υπάρχει θύρα, που οδηγούσε στο εξωτερικό περσό, για την ύπαρξη της οποίας έχουν διατυπωθεί διάφορες ερμηνείες. Η στέγη του ναού ήταν δίρριχτη και η κεράμωση μαρμάρινη, κορινθιακού τύπου.



Εικόνα 1.2 Ο σθηκός του ναού από το βορρά όπως σώζεται σήμερα.

Το ναό περιέτρεχε εξωτερικά δωρική ζωφόρος με ακόσμητες μετόπες και τρίγλυφα, ενώ ανάγλυφη διακόσμηση έφεραν μόνο οι εσωτερικές μετόπες των στενών πλευρών. Οι έξι μετόπες του πρόναου απεικόνιζαν την επιστροφή του Απόλλωνα στον Όλυμπο από τις Υπερβόρειες χώρες, και του οπισθόδομου την αρπαγή των θυγατέρων του Μεσσήνιου βασιλιά Λεύκιππου από τους Διόσκουρους. Τα αετώματα δεν είναι βέβαιο ότι έφεραν γλυπτό διάκοσμο. Το βασικότερο διακοσμητικό στοιχείο του ναού ήταν η μαρμάρινη ιωνική ζωφόρος, που υπήρχε πάνω από τους ιωνικούς ημικίονες μέσα στο σθηκό. Είχε συνολικό μήκος 31 μ. και αποτελείτο από 23 μαρμάρινες πλάκες. Στις 12 απεικονίζεται η Αμαζονομαχία και στις υπόλοιπες 11 η Κενταυρομαχία. Κατά την ανασκαφή του 1812 οι πλάκες βρέθηκαν σκεπασμένες με αρχιτεκτονικά μέλη στο σθηκό και το 1815 μεταφέρθηκαν στο Βρετανικό Μουσείο,

όπου και εκτίθενται σήμερα. Γλύπτης της ζωφόρου ίσως ήταν ο Παιώνιος, που φιλοτέχνησε στην Ολυμπία το περίφημο άγαλμα της Νίκης.



Εικόνα 1.3 Το ανατολικό πτερό του ναού όπως σώζεται σήμερα.

Ο ναός εξακολούθησε να χρησιμοποιείται στα ελληνιστικά και ρωμαϊκά χρόνια, οπότε γίνονταν επιδιορθώσεις στην κεράμωσή του. Η πρώτη σημαντική καταστροφή του σημειώθηκε όταν έπεσε η στέγη του, λόγω της φυσικής φθοράς των ξύλινων δοκών που τη συγκρατούσαν, ενώ σοβαρές ζημιές υπέστη και από την ανθρώπινη επέμβαση, που έγινε για την απόσπαση του μετάλλου των συνδέσμων. Ο ναός ταυτίσθηκε επιτυχώς το 1765 από το Γάλλο αρχιτέκτονα J. Bocher και η πρώτη συστηματική ανασκαφή του έγινε το 1812 από ομάδα αρχαιόφιλων επιστημόνων. Ανασκαφές και αναστηλωτικές επεμβάσεις ξεκίνησαν το 1902 από την Αρχαιολογική Εταιρεία, ενώ το 1975 συστάθηκε η Επιτροπή Συντηρήσεως του Ναού του Επικουρίου Απόλλωνος, που ανέλαβε τον προγραμματισμό και τη σύνταξη των σχετικών μελετών για τα έργα συντήρησης και αναστήλωσης. Το 1982 έγινε ανασύσταση της επιτροπής και το Υπουργείο Πολιτισμού ανέλαβε συστηματικά το εξαιρετικά δύσκολο έργο αποκατάστασης του μνημείου. Από το 1987 ο ναός

προστατεύεται από τις αντίξοες καιρικές συνθήκες με ειδικό στέγαστρο, που θα απομακρυνθεί μετά την ολοκλήρωση των απαραίτητων εργασιών.

Ο ναός υψώνεται επιβλητικά στα 1.130 μέτρα, στο κέντρο της Πελοποννήσου, πάνω στα βουνά μεταξύ Ηλείας, Αρκαδίας και Μεσσηνίας και βρίσκεται 14 χλμ. νότια της Ανδρίτσαινας και 11 χλμ. βορειοανατολικά των Περιβολίων.



Εικόνα 1.4 Φωτογραφία του 1891 πριν την έναρξη της συντήρησης του ναού.

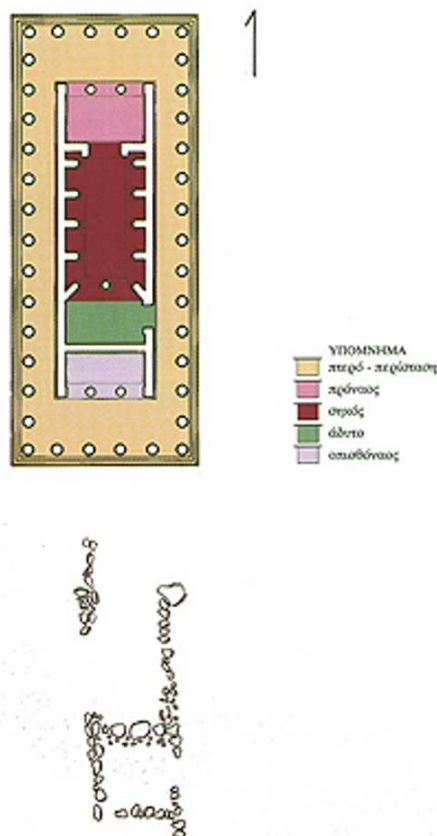


## **Σύντομο ιστορικό ίδρυσης της Επιτροπής Συντήρησης του ναού**

Η επέμβαση στο μνημείο ξεκίνησε το 2001, από το βόρειο τμήμα του. Εκείνη την περίοδο ήταν που έγιναν και οι απαραίτητες ενέργειες για να ενταχθεί η πρώτη φάση του έργου, η οποία αφορά στην αποκατάσταση της βόρειας όψης του μνημείου μέχρι και το επίπεδο του δεύτερου αναβαθμού της κρηπίδας στο Περιφερειακό Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Δυτικής Ελλάδας 2000-2006. Οι εργασίες αυτές ολοκληρώθηκαν το Σεπτέμβριο του 2007, και άμεσα δρομολογήθηκε η δεύτερη φάση του έργου αποκατάστασης, που περιλαμβάνει την αποκατάσταση του βόρειου στυλοβάτη και την επαναφορά στο μνημείο των έξι βόρειων κίωνων του, η οποία, επίσης, εντάχθηκε στο Π.Ε.Π. 2000-2006 με προγραμματισμένη περαίωση τον Ιούλιο 2008.

### **Η πρώτη φάση αποκατάστασης του βόρειου πτερού του ναού του Επικούριου Απόλλωνα**

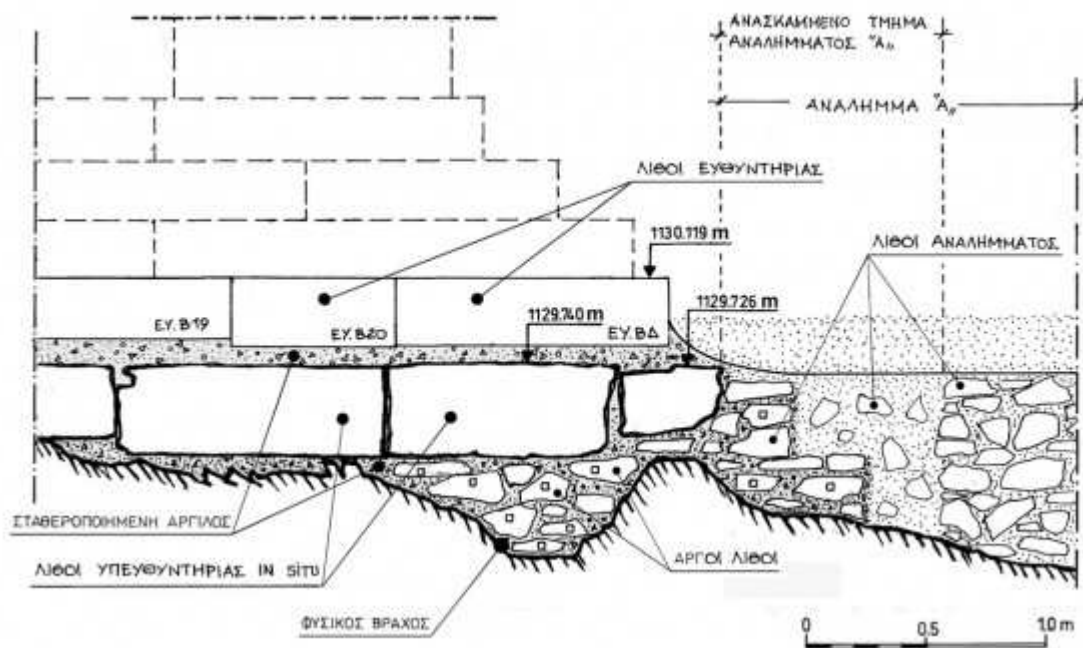
Η πρώτη φάση αποκατάστασης του βόρειου πτερού του ναού η οποία αφορά στην αποκατάσταση της βόρειας όψης του μέχρι και το δεύτερο αναβαθμό της κρηπίδας, άρχισε το 2001 και ολοκληρώθηκε το 2007. Στα πλαίσια του έργου αυτού αποξηλώθηκαν 271 αρχιτεκτονικά μέλη του μνημείου. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν 35 συμπληρώματα μελών και πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 210 συγκολλήσεις θραυσμάτων και συμπληρωμάτων τους, με συνέπεια να αποκατασταθούν 6 λίθοι υποθεμελίωσης, 46 της ευθυντηρίας 33 και 21 του πρώτου και του δεύτερου αναβαθμού της κρηπίδας. Τέλος, μετά από τις εργασίες σταθεροποίησης και ενίσχυσης της θεμελίωσης ανατάχθηκαν τα 106 αποκαταστημένα αρχιτεκτονικά μέλη και συνδέθηκαν με 1 αρχαίο σύνδεσμο και 104 τιτάνιου.



Εικόνα 1.5 Κάτοψη του ναού.

### Αποκατάσταση - ενίσχυση της θεμελίωσης στο βόρειο τμήμα του ναού

Οι εργασίες αποκατάστασης της θεμελίωσης στο βόρειο τμήμα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα ήταν ένα από τα πιο κρίσιμα στάδια της επέμβασης στο βόρειο πτερό, αφού οι μετατοπίσεις της θεμελίωσης έχει θεωρηθεί ότι φέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό ευθύνης για τις βλάβες στην ανωδομή του μνημείου. Γι αυτό επιλέχθηκε οι εν λόγω εργασίες να συμπεριλάβουν, εκτός από τη δομική αποκατάσταση, συντήρηση και ανάταξη 6 λίθων υποθεμελίωσης και των 46 λίθων της ευθυντηρίας, την πλήρωση κοιλότητας του βραχώδους υποβάθρου με αργολιθοδομή, τη σταθεροποίηση με τσιμέντο και υδράσβεστο του αργλικού υποστρώματος της ευθυντηρίας, και την κατασκευή τοίχων υποστήριξης και αντιστήριξης στην βορειοδυτική γωνία του μνημείου του ναού.



Εικόνα 1.6 Σχέδιο τομής της αποκαταστημένης και ενισχυμένης βορειοδυτικής γωνίας της θεμελίωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα



Εικόνα 1.7 Βορειοδυτικό τμήμα του ναού όπως σώζεται σήμερα.

## **Μελέτη αποκατάστασης των συνδέσεων της κρηπίδας του ναού του Επικούριου Απόλλωνα – Μελέτη της σεισμικής απόκρισης των κίωνων της περίπτωσης**

Στα πλαίσια της μελέτης αποκατάστασης των συνδέσεων των λίθων της κρηπίδας του ναού του Επικούριου Απόλλωνα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, για πρώτη φορά, εκτίμηση των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται σε συνδέσμους κρηπίδας αρχαίου ναού, κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών συμβάντων. Η εν λόγω μελέτη παρουσιάστηκε στο 4<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο Structural Analysis of Historical Constructions το 2006. Επίσης, τα τελευταία χρόνια μελετήθηκε αριθμητικά η σεισμική απόκριση των κίωνων της περίπτωσης του ναού. Έτσι, εξήχθησαν για πρώτη φορά εκτιμήσεις, ποσοτικού χαρακτήρα, για την ικανότητα των κίωνων να αντιστέκονται σε σεισμικές διεγέρσεις, τόσο στο παρόν όσο και στο παρελθόν.

## **Το υλικό αποκατάστασης της θεμελίωσης του ναού του Επικούριου Απόλλωνα**

Μία από τις κυριότερες εργασίες που περιέλαβε η αποκατάσταση της θεμελίωσης στο βόρειο τμήμα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα ήταν η σταθεροποίηση του αργιλικού υποστρώματος της ευθυντηρίας με τσιμέντο και υδράσβεστο. Η ακριβής σύσταση του σταθεροποιημένου αργιλικού υλικού προέκυψε από εργαστηριακή διερεύνηση με γνώμονα να αναπτύσσει τέτοιες αντοχές, ώστε να διαθέτει επαρκή ανθεκτικότητα στις καιρικές επιδράσεις. Τα πλεονεκτήματα του είναι ότι εξασφαλίζει την ασφαλή μετάβαση των φορτίων της ανωδομής στο βράχο, ενώ, λόγω του ότι κατά τις πρώτες ώρες από την παρασκευή του παραμένει πλαστικό και δεν αναπτύσσει συνάφεια με τους λίθους, διευκολύνει την ορθή επανατοποθέτηση των λίθων.

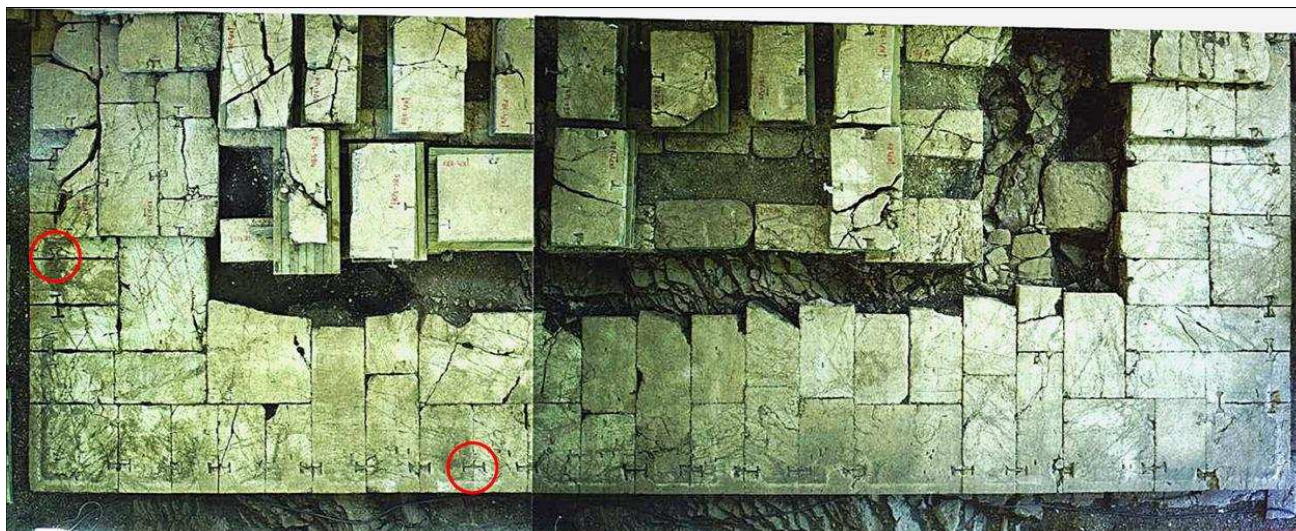
## **Απομάκρυνση από το ναό του Επικούριου Απόλλωνα δέκα κίωνων, ολόσωμων**

Κατά τη διάρκεια της αποξήλωσης του βόρειου τμήματος του ναού του Επικούριου Απόλλωνα απομακρύνθηκαν από το μνημείο ολόσωμοι οι δέκα βορειότεροι κίονες της περιστασής του, βάρους, περίπου, 13 τόνων ο καθένας. Οι μεταφορές των κίωνων πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της γερανογέφυρας που περιβάλλει το μνημείο, εγκαταστημένη εντός του στεγάστρου του, και μιας ειδικής μεταλλικής λαβής, η

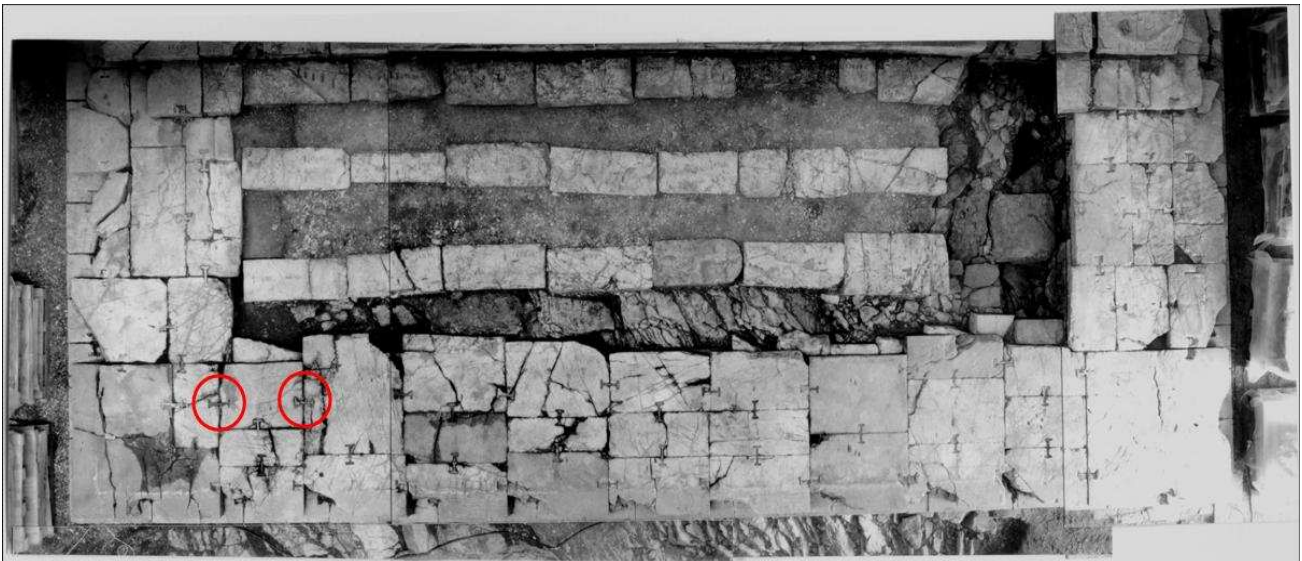
οποία μελετήθηκε και κατασκευάστηκε γι αυτό το σκοπό. Οι κίονες τοποθετήθηκαν προσωρινά επί βάσεων από οπλισμένο σκυρόδεμα που κατασκευάστηκαν εντός του στεγάστρου, επτά στα βόρεια και τρεις στα δυτικά του μνημείου, και τοποθετήθηκε σε αυτούς προσωρινό δικτύωμα αντιστήριξής τους.



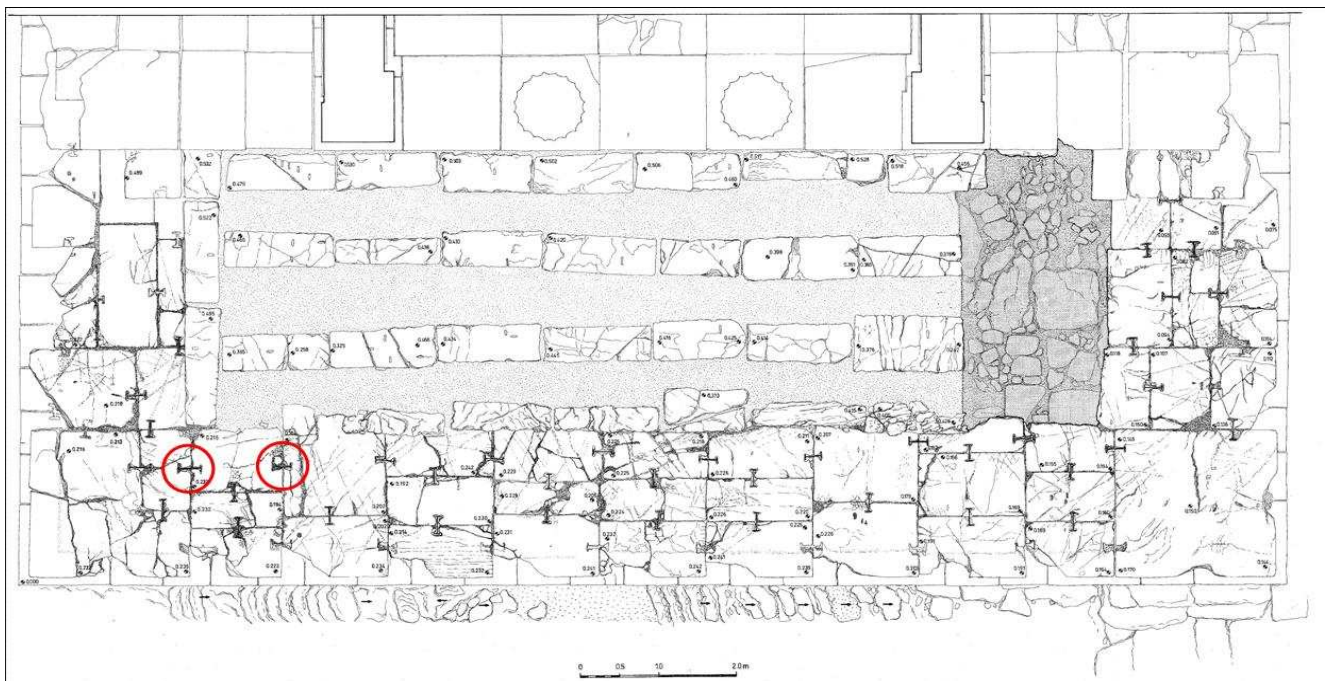
Εικόνα 1.8 Η βόρεια όψη του μνημείου, μετά από την επαναφορά σε αυτό των βόρειων κίωνων του. Απόψεις από βορειοδυτικά (αριστερά) και από νοτιοδυτικά (δεξιά) (Φωτογράφιση: Κωνσταντίνος Παπαδόπουλος). (από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ)



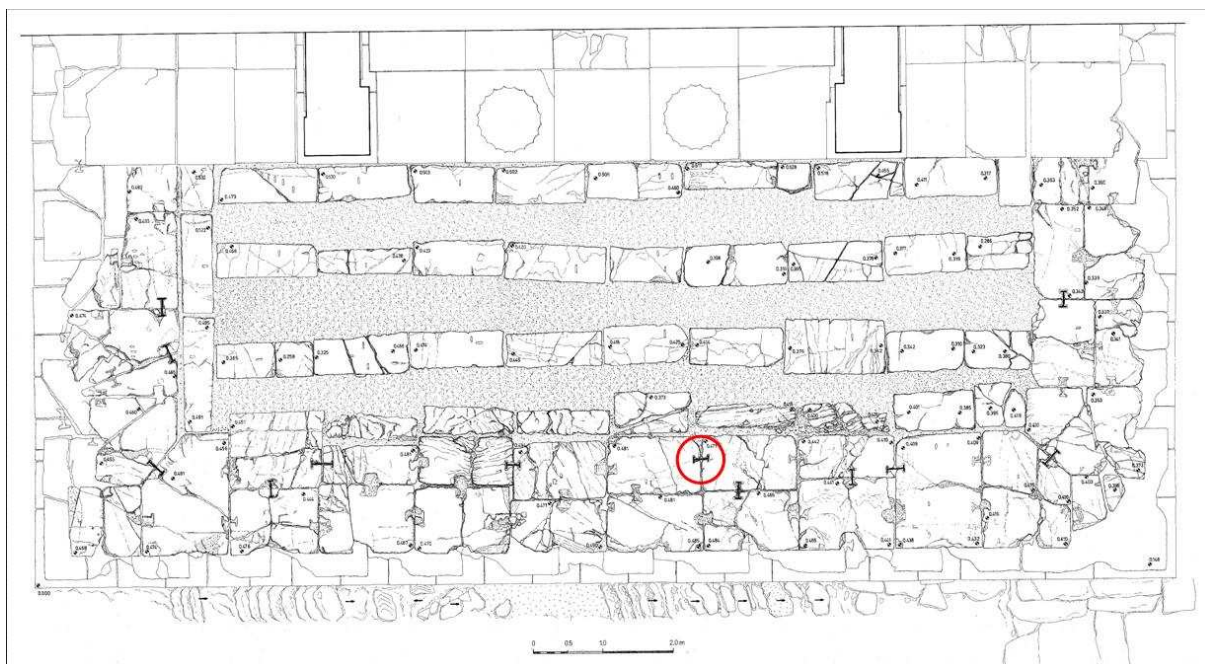
Εικόνα 1.9 Η ευθυνηρία (η ανώτερη στρώση της θεμελίωσης) του βόρειου πτερού του ναού, πριν από την αποσυναρμολόγηση των λίθων της (Κάτοψη) (Φωτογράφιση: Σοφοκλής Αλευρίδης). (από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ)



Εικόνα 1.10 Ο πρώτος αναβαθμός της κρηπίδας του βόρειου πτερού του ναού, πριν από την αποσυναρμολόγηση των λίθων του (Κάτοψη) (Φωτογράφιση: Σοφοκλής Αλευρίδης). (από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ)



Εικόνα 1.11 Ο πρώτος αναβαθμός της κρηπίδας του βόρειου πτερού του ναού, πριν από την αποσυναρμολόγηση των λίθων του (Κάτοψη) (Μελέτη – Αποτύπωση: Σοφοκλής Αλευρίδης και Μαρία Σκουρτσίδου, Σχεδίαση: Βασίλης Τριζώνης). (από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ)



Εικόνα 1.12 Ο δεύτερος αναβαθμός της κρηπίδας του βόρειου πτερού του ναού, πριν από την αποσυναρμολόγηση των λίθων του (Κάτοψη) (Μελέτη – Αποτύπωση: Σοφοκλής Αλευρίδης και Μαρία Σκουρτσίδου, Σχεδίαση: Βασίλης Τριζώνης).(από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ).



Εικόνα 1.13 Ο πρώτος αναβαθμός της κρηπίδας του βόρειου πτερού του ναού σε κάτοψη μετά από τις εργασίες αποκατάστασής του (Φωτογράφιση: Κωνσταντίνος Παπαδόπουλος).(από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ)

*Τα ιστορικά στοιχεία του ναού συλλέχθηκαν από πληροφορίες μέσω του διαδικτύου των διευθύνσεων: βιβ. Γ1, Γ2, Γ3, Γ4, Γ5, Γ6, καθώς και κάποιες από τις φωτογραφίες παραχωρήθηκαν από την Επιτροπή Συντήρησης του Ναού.*

## 1.2 Γιατί ο σίδηρος χρειάστηκε 2500 χρόνια, για να εμφανιστεί στην ιστορία του ανθρώπου

Τα μέταλλα, λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων τους συνδέθηκαν στενά με την ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού. Ο άνθρωπος τα χρησιμοποίησε στην αρχή για να καλύψει τις αυξανόμενες ανάγκες του σε εργαλεία και όπλα τις οποίες μέχρι τότε κάλυπτε με ξύλα, πέτρες και οστά καταλλήλως διαμορφωμένα. Η πρώτη επαφή του ανθρώπου με τα μέταλλα δεν είναι απόλυτα εξακριβωμένη, αλλά φαίνεται να άρχισε όταν ακόμα ζούσε στη λίθινη εποχή δηλαδή την 8<sup>η</sup> χιλιετία π.Χ. Τα μέταλλα είναι το μέσο εκείνο που οδήγησε τον άνθρωπο της λίθινης εποχής μέσα σε λίγες χιλιετίες να αναπτύξει σπουδαίους πολιτισμούς όπως τον αιγυπτιακό, το μινωικό, το μυκηναϊκό, τον ασσυροβαβυλωνιακό, και αργότερα τον κλασικό και τους μετακλασικούς πολιτισμούς, όταν για δεκάδες χιλιετίες πριν ζούσε σε πρωτόγονες συνθήκες.

Τα πρώτα μέταλλα με τα οποία φυσιολογικά ήρθε σε επαφή ο άνθρωπος θα ήταν τα αυτοφυή, δηλαδή εκείνα που απαντούνταν σε ελεύθερη κατάσταση στην επιφάνεια της γης. (βιβ.Α2 Forbes, 1964 και βιβ.Α3 Tylecote, 1976). Τέτοια μέταλλα ήταν : τα ευγενή μέταλλα χρυσός άργυρος και χαλκός, το φυσικό κράμα χρυσού αργύρου και ο χημικά δραστικός σίδηρος. . Ο άργυρος σπάνια υπάρχει στη φύση ελεύθερος και για αυτόν το λόγο χρειάστηκαν αρκετοί αιώνες μέχρις ότου ο αρχαίος τεχνίτης μάθει να εφαρμόζει τη μεταλλουργία της αναγωγικής τήξης των μεταλλευμάτων του, όπως για παράδειγμα τον γαληνίτη, δηλαδή το ορυκτό αργυρούχου μολύβδου. Μέχρι τότε ο πρωτόγονος άνθρωπος χρησιμοποιούσε τα αυτοφυή μέταλλα, χρυσό και χαλκό. Ο σίδηρος, όπως αναφέρθηκε, βρέθηκε ως αυτοφυής στην επιφάνεια της γης, αλλά και ως μετεωρίτης.

Βέβαια, η πραγματική εποχή των μετάλλων δεν αρχίζει με την ανακάλυψη των αυτοφυών μετάλλων, αλλά από την ιστορική εκείνη στιγμή που ο άνθρωπος κατορθώνει να ελευθερώνει τα μέταλλα από τα μεταλλεύματά τους να τα τήκει και να τα χύνει σε καλούπια. Η διαδικασία αυτή που σήμερα ονομάζεται εξαγωγική μεταλλουργία είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα της νέας εποχής, της εποχής των μετάλλων. Αυτό φυσικά δεν ισχύει για το σίδηρο, γιατί ο αρχαιομεταλλουργός μέχρι και την ρωμαϊκή εποχή δεν μπορούσε για την αναγωγική τήξη των μεταλλευμάτων



του σιδήρου να φθάσει τουλάχιστον τους  $1600^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>. Αυτός είναι και ο λόγος, που ο άνθρωπος χρειάστηκε περίπου 2500 χρόνια μετά την ανακάλυψη και χρήση του συγκριτικά ευτηκτότερου χαλκού<sup>2</sup> μέχρι να μπορέσει να παράγει σίδηρο και χάλυβα. Τώρα πότε και πώς έγινε η ανακάλυψη παραγωγής του χαλκού και των κραμάτων του είναι κάπως δύσκολο να προσδιοριστεί επακριβώς. Ένα είναι σίγουρο, ότι ο άνθρωπος της λίθινης εποχής είχε φθάσει σε ένα ανεπτυγμένο επίπεδο κεραμικής τεχνολογίας και ήξερε να παίζει με τη φωτιά και τα κλειστά καμίνια για κεραμικά. Κάποια λοιπόν στιγμή, ένα από τα χρώματα των οξειδίων του χαλκού, που χρησιμοποιούσε για τη βαφή των κεραμικών του έδωσε μεταλλικό χαλκό κάτω από αναγωγικές συνθήκες. Ο έμπειρος τεχνίτης των κεραμικών, όταν θα είδε το θαυμάσιο ερυθρό μέταλλο του χαλκού, θα επανέλαβε το πείραμα κάτω από τις ίδιες συνθήκες, παράγοντας και πάλι χαλκό. Αυτή θα ήταν η αρχή. Κάτι, που δεν μπορούσε ένας απλός άνθρωπος της ίδιας εποχής να επιτύχει, αφού δεν θα είχε την εμπειρία ενός φούρναρη, που καθημερινά θα έπαιζε με τη φωτιά και το καμίνι, όπως ο τεχνίτης των κεραμικών.

Ο Έλληνας ποιητής Ησίοδος μας μιλάει για τις τέσσερις εποχές στην ιστορία του ανθρώπινου γένους: τη χρυσή, την αργυρή, τη μπρούτζινη και τη σιδερένια.

Ο Ρωμαίος ιστορικός Λουκρήτιος γράφει ότι τα παλαιότερα όπλα του ανθρώπου ήταν τα χέρια, τα νύχια και τα δόντια. Κατόπιν ήρθαν οι πέτρες και τα ρόπαλα. Αυτά αντικαταστάθηκαν από το σίδηρο και το μπρούτζο αλλά ο μπρούτζος ήρθε πρώτος.

Η Παλαιά Διαθήκη αναφέρει έξι μέταλλα: χρυσό, χαλκό, άργυρο, σίδηρο, κασσίτερο και μόλυβδο. Τα έξι αυτά μέταλλα ήταν γνωστά στους αρχαίους Αιγύπτιους, Βαβυλώνιους και Έλληνες. (βιβ Α1 Goffe, 1980).

Σε αυτά τα μέταλλα γίνονται αναφορές από το Στράβωνα, το Δημόκριτο, τον Πλάτωνα, τον Αριστοτέλη, το Θεόφραστο, το Βιτρούβιο, το Διοσκουρίδη, τον Πλήνιο και αργότερα από τους Άραβες και από τους Ευρωπαίους αλχημιστές του 13<sup>ου</sup> αιώνα μ.Χ. Τα περίφημα βιβλία του 16<sup>ου</sup> μ.Χ. “Pyrotechnia” του Ιταλού Vannuccio Biringuccio και “De Re Metallica” του Γερμανού George Agricola αποτελούν τις βασικές και πλήρεις πηγές γραπτής πληροφόρησης της μέχρι τότε γνώσης στα μέταλλα. Στα βιβλία αυτά δίνεται μεταξύ άλλων πλήρης περιγραφή της μεταλλουργικής τέχνης εκείνης της εποχής. Πολλές όμως γνώσεις παρουσιάζονται

---

<sup>1</sup> Το σημείον τήξης του σιδήρου είναι  $1530^{\circ}\text{C}$

<sup>2</sup> Σημείον τήξης του χαλκού  $1083^{\circ}\text{C}$

συγκεχυμένες όπως π.χ. δε φαίνεται να είναι γνωστό ακόμη το δεύτερο συστατικό του ορείχαλκου (κράμα χαλκού ψευδάργυρου).

Από τις επαναλαμβανόμενες αναφορές στα έξι αυτά μέταλλα στην αρχαία βιβλιογραφία, φαίνεται ότι η ανακάλυψη των κοινών μετάλλων ήρθε πολύ αργότερα. Παρ' όλα αυτά και άλλα μέταλλα ήταν γνωστά στους αρχαίους, αν και η παρασκευή τους ήταν μεμονωμένη και ευκαιριακή. Μεταξύ αυτών είναι ο υδράργυρος, ο λευκόχρυσος, το αντιμόνιο και ο ψευδάργυρος. Ο υδράργυρος αναφέρεται από τον Αριστοτέλη, ο ψευδάργυρος από το Στράβωνα και το βισμούθιο από τον Agricola.

Τα άλλα μέταλλα ανακαλύφθηκαν τον 17<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα και σήμερα παρασκευάζονται τεχνητά τα μετά το ακτίνιο Ac μέταλλα (υπερβαρέα στοιχεία).

## Η ιστορία του σιδήρου

Η ακριβής χρονική περίοδος της πρώτης συστηματικής και εκ προθέσεως παραγωγής σιδήρου δεν έχει γίνει ακόμη γνωστή. Ίσως αυτό να συνέβη αρχικά στην Ανατολή όπου και βρέθηκαν ένα από τα πρώτα σιδερένια στιλέτα. Σε γενικές γραμμές όμως οι χειροποίητες κατασκευές κατά τη δεύτερη χιλιετία π.Χ. ήταν λίγες και σπασμωδικές, αλλά σταδιακά άρχισαν να αυξάνονται γύρω στο 1200-1000 π.Χ. με την κατασκευή όπλων (βιβ A5, A18).

Λόγω της σπανιότητάς του, ο σίδηρος αρχικά χρησιμοποιούνταν σε κοσμήματα. Επίσης φαίνεται να χρησιμοποιείται και σε λεπίδες στιλέτων κι έτσι έγιναν αντιληπτά πολλά από τα προτερήματα του μετάλλου. Στη συνέχεια παράχθηκαν σπαθιά από σίδηρο στον 11<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Η λεπίδα, η οποία ήταν χάλυβας με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα, ήταν σκληρότερη από το χυτό χαλκό και μακράν πιο όλκιμη (βιβ. A5, A6).

Ο σίδηρος εμφανίστηκε σε μεγάλες ποσότητες τον 8<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Στο παλάτι του Khorsabad συγκεκριμένα, βρέθηκαν σε μορφή τετράγωνων σιδηρόβεργων. Αυτή η

μορφή άρχισε να εξαπλώνεται σε όλη την Ευρώπη γύρω στον 5<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα, όταν διαφόρων ειδών βέργες χρησιμοποιούνταν σαν άρθρα του εμπορίου (βιβ Α7).

Έρευνες υπολογίζουν, ότι η γνώση της σιδηρομεταλλουργίας ξεκίνησε γύρω στο 1500-1000π.Χ., στην Ανατολή, για να εξαπλωθεί στη συνέχεια στην Ασία, Αφρική και Ευρώπη.. Στην Ελλάδα ξεκίνησε το 900 π.Χ. και μέσω Ελλήνων εμπόρων στη συνέχεια εξαπλώθηκε στην Αίγυπτο, μιας και στη Ναύκρατις βρέθηκε σκωρία σιδήρου περίπου του 7<sup>ου</sup> π.Χ. αιώνα. Στο μεταξύ η Ιταλία και η Ισπανία δέχθηκαν επιρροές από την Ανατολή και την Ελλάδα. Το 500 π.Χ. η σιδηρουργία εξαπλώθηκε ως την Βρετανία (βιβ Α8).

Τα περισσότερα στοιχεία χρονολογούνται από την Κλασική ως την Ελληνιστική περίοδο (μετά το 500 π.Χ.). Μία καλή αναπαράσταση του σιδηρουργού στο σιδηρουργείο του να σφυρηλατεί ένα σβώλο μεταλλεύματος έχει διασωθεί σε ένα αγγείο της Ελληνιστικής εποχής, όπως απεικονίζεται παρακάτω. Η κάμινος είναι κατακόρυφη και ονομάζεται 'shaft furnace', δηλαδή φρεατώδης κάμινος (βιβ Α9).

Ανάμεσα στα σιδερένια αντικείμενα που έχουν εξεταστεί είναι οι σύνδεσμοι και γόμφοι του Παρθενώνα και Ερεχθείου<sup>1</sup>, οι οποίοι μάλιστα προστατεύονται μέσα σε μολύβδο. Πολύ όμως νωρίτερα, η βασίλισσα Νίτοκρις της Βαβυλώνας περί τον 7<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ., αισθανόμενη τον αυξανόμενο φόβο από την εντεινόμενη πίεση των Περσών, κατασκεύασε μια μεγάλη τάφρο γύρω από την πόλη της Βαβυλώνας και τη γέμισε με τα νερά του ποταμού Ευφράτη. Τους μεγάλους τώρα ογκόλιθους, που έβγαλαν από την τάφρο, τους χρησιμοποίησαν οι μηχανικοί της και έκαναν μια τεράστια γέφυρα μέσα στην πόλη της Βαβυλώνας. Συνέδεσαν δε τους ογκόλιθους μεταξύ τους με «**σίδηρο και μολύβι**»<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Βλ. βιβλιογραφία Κ. Κονοφάγου και Γ. Βαρουφάκη.....

## Η επίδραση του χάλυβα στο ρυθμό ανέλιξης του πολιτισμού μας

Ο χάλυβας, αυτό το κράμα σιδήρου και άνθρακα, που σκληραίνει κατά τη βαφή και έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, τις οποίες δεν έχει κανένα άλλο μέταλλο, εμφανίστηκε στον ελλαδικό χώρο γύρω στη 1<sup>η</sup> χιλιετία π.Χ. Η επίδρασή του στο ρυθμό ανέλιξης του πολιτισμού μας είναι μεγάλη. Έτσι, ενώ στην εποχή του χαλκού η ιστορία γράφεται σε χιλιετίες, με την έναρξη της χρήσης του χάλυβα από τους μεταλλοτεχνίτες, η ιστορία γράφεται πλέον σε αιώνες. Από τον 9<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. περνάμε ανα δύο αιώνες από τη μια εποχή στην άλλη. Την γεωμετρική εποχή διαδέχεται η αρχαϊκή εποχή, κατόπιν έρχεται η κλασική εποχή, στη συνέχεια η ελληνιστική εποχή και τέλος η ρωμαϊκή εποχή. Όλες αυτές οι αλλαγές συμβαίνουν σε μόλις 800 χρόνια, όταν στην εποχή του χαλκού χρειαζόνταν χιλιετίες.

Η εποχή του σιδήρου στην Ελλάδα εμφανίστηκε κοντά στα τέλη του 11<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ. Κατά πάσα πιθανότητα οι γνώσεις πάνω στη σιδηρουργία προήλθαν από την Ανατολή. Αν και υπάρχουν πολλά ευρήματα από όπλα, κυρίως από τάφους πλουσίων, η πρώτη ύλη δεν είναι σε καλή κατάσταση. Η πλειοψηφία των σιδερένιων αντικειμένων στην Ελλάδα κατασκευάστηκε από ελληνικής προέλευσης μέταλλευμα.

Κατά την κλασική εποχή ο χάλυβας χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή συνδέσμων σε σχήμα διπλού T, για τη σύνδεση των μεγάλων ογκόλιθων στο ναό του Παρθενώνα, του Ερέχθειου και άλλων ναών, όχι μόνο της Ακρόπολης αλλά και ολόκληρης της Αττικής.

Ο σίδηρος κατά τη γεωμετρική εποχή υπό τη μορφή σκληρού χάλυβα αποτελούσε την κύρια πρώτη ύλη για την κατασκευή των εργαλείων, που χρησιμοποιούνταν από τους τεχνίτες στην οικοδομή, στις κατασκευές, στη ναυπηγική και σε πολλές άλλες δραστηριότητες της καθημερινότητας. Η χρήση του σιδήρου στον τομέα της κατασκευής εργαλείων και όπλων χαρακτηρίζει την εποχή αυτή ως *εποχή του σιδήρου*.

Συμπερασματικά, όλα τα ανωτέρω αναφερθέντα οδηγούν στο ενδιαφέρον συμπέρασμα, ότι η παραγωγή του σιδήρου και χάλυβα ήταν για αιώνες μια πολύ δύσκολη διαδικασία. Ακόμη και τον 19<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. (δηλαδή της εποχής μας) ο χάλυβας ήταν ένα πολύ ακριβό μέταλλο. Για το λόγο αυτόν τα πρώτα ατμόπλοια, αυτοκίνητα ήταν κατασκευασμένα από ξύλο και μόνο οι μηχανές, οι άγκυρες και αλυσίδες ήταν από χάλυβα ή χυτοσίδηρο. Αυτό συνεχίστηκε μέχρι την ιστορική

στιγμή, που ο Άγγλος μεταλλουργός Bessemer (τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα) κατάφερε να παράγει χάλυβα σε λίγα λεπτά, με αποτέλεσμα να πέσει κατακόρυφα η τιμή του. Όπως ήταν φυσικό, το νέο αυτό μέταλλο επηρέασε τις ανθρώπινες σχέσεις, επιτάχυνε τις εξελίξεις, οδήγησε όμως και σε κοινωνική αναστάτωση, πολέμους και ανακατατάξεις, ενώ ο ρυθμός ανέλιξης του πολιτισμού αυξήθηκε σε απίθανο μεγάλο ρυθμό.

## Ο σίδηρος όπως μαρτυρείται από την αρχαία ελληνική γραμματεία

Ο σίδηρος αναφέρεται σε πολλά αρχαία λογοτεχνικά κείμενα ήδη από τον 8<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ.. Ο Ησίοδος (8<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ.) ανησυχούσε με την ανακάλυψη του σιδήρου, που είχε την ιδιότητα να μεταμορφώνεται στο σκληρότερο μέταλλο. Έφτασε στο σημείο μάλιστα να αποδίδει στο σίδηρο την κακοδαιμονία της εποχής του. Στο έργο του Έργα και Ημέραι αναφέρει: *«... μακάρι να μη ζούσα ανάμεσα στους ανθρώπους της πέμπτης γενιάς αλλά να είχα πεθάνει πιο μπροστά ή να είχα γεννηθεί αργότερα, γιατί αυτή τώρα είναι μια γενιά του σιδήρου και οι άνθρωποι ποτέ δε σταματούν από τον κάματο και τη στενοχώρια...»* Η ανησυχία του αποδείχθηκε δικαιολογημένη (βιβ Β2).

Ο Θουκυδίδης, ένας από τους μεγαλύτερους αρχαίους Έλληνες ιστορικούς, αναφέρεται σε μια εποχή όπου το μέταλλο που οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή των όπλων, καθώς και των εργαλείων ήταν ο σίδηρος και όχι πλέον ο μπρούντζος. Σε κείμενό του αναφέρει: *«... πάσα γαρ η Ελλάς εσιδηροφόρει...»*, (Θουκυδίδης, Βιβλίο Α', Παρ.6). Έτσι ο ιστορικός σηματοδότησε το πέρασμα στην εποχή του σιδήρου κατά τους γεωμετρικούς χρόνους. Ο όρος εσιδηροφόρει μας αποκαλύπτει ότι ήταν γνωστή η παραγωγή χάλυβα (βιβ Β1).

Πολλές αναφορές στο σίδηρο έχουν γίνει από τον Όμηρο στα γνωστά έπη του Ιλιάδα και Οδύσσεια. Ο Όμηρος έζησε τον 8<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ., όταν αναπτυσσόταν η μεταλλουργία του σιδήρου. Αν και γνωρίζει πως κατά τον Τρωικό πόλεμο χρησιμοποιούταν κυρίως ο χαλκός για την κατασκευή όπλων, ενώ ο σίδηρος ήταν πολύτιμο μέταλλο, ωστόσο παρασύρεται από τη δική του εποχή και άλλοτε τον αναφέρει ως πολύτιμο μέταλλο και άλλοτε ως σκληρό όπλο ή εργαλείο. Στην Ιλιάδα ο Αχιλλέας μιλώντας στον Πρίαμο του είπε: *«...Καρδιά από σίδηρο στα στήθια*

*αλήθεια κλείνεις...». Ο Άδραστος, αιχμάλωτος του Μενέλαου τον παρακαλεί: «Πιάσε με ζωντανό, γιε του Ατρέα και δέξου τα λύτρα που αξίζω. Πολλοί θησαυροί είναι φυλαγμένοι στου πλούσιου πατέρα μου, χαλκός, μάλαμα και δυσκολοδουλεμένο σίδηρο...».(Μετάφραση Γιαννακόπουλου Π., Εκδόσεις Κάκτος). Εδώ η κατοχή του σιδήρου αποτελεί ένδειξη πλούτου. Επίσης σε μονομαχία του Έκτορα με τον Αίαντα οι Αχαιοί προμηθεύονται κρασί με αντάλλαγμα χαλκό και αστραφτερό σίδηρο, κάτι που δείχνει ότι χρησιμοποιούταν και ως μέσο ανταλλαγής.(Ιλιάδα Η, 472). Στο ίδιο έπος βρίσκουμε και αρκετά αποσπάσματα που ο σίδηρος χρησιμοποιούταν ως όπλο. Τέτοια αποσπάσματα είναι και τα επόμενα: «...τόξω δε σίδηρον...», (Ιλιάδα Δ', 123), «...σιδηρέω άξονι...»,(Ιλιάδα Ε', 722-723), «...σιδηρείη κορόνη ρήγνυσκε φάλλαγγας...», (Η, 141), τέλος στο θρήνο του Αχιλλέα για την απώλεια του Πάτροκλου διαβάζουμε: «...πολλά γυαλιστερά βρυχόνταν γύρω από το σιδερένιο μαχαίρι που σφάζονταν...», (Ψ, 29-30, Μετάφραση Αλέξ. Πάλλη,1962 (βιβ Β3).*

Όπως στην Ιλιάδα έτσι και στην Οδύσσεια γίνονται αρκετές αναφορές στο σίδηρο. Μία από τις σημαντικότερες μας πληροφορεί για την ανάπτυξη της μεταλλουργίας του σιδήρου εκείνη την εποχή. Στην Οδύσσεια διαβάζουμε: «...πως όταν το σκεπάρνι του για το τρανό πελέκι / χώνει στο κρύο νερό χαλκιάς, χοχλοβουίζει εκείνο, σκληραίνοντας και δύναμη στο σίδηρο γεννώντας,/ έτσι το μάτι (του Πολύφημου) τσίριζε στο λιόξυλο τριγύρω. Η φράση χώνει στο κρύο νερό διατυπώνεται από τον Όμηρο ως: «...ειν ύδατι ψυχρώ βάπτη...», που είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο από τον Όμηρο, αφού μας μιλάει για τη γνωστή βαφή του χάλυβα, δηλαδή την απότομη ψύξη του, με σκοπό τη σκλήρυνσή του. Συνεπώς έτσι ο Όμηρος μας στέλνει ένα σημαντικότερο μήνυμα: Την ανάπτυξη της μεταλλουργίας στα χρόνια του, δηλαδή κατά τη γεωμετρική εποχή του 9<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> αιώνα.(βιβ. Β4)

Τέλος ο Ηρόδοτος, ο πρώτος ιστορικός της ανθρωπότητας, γεννημένος το 485 π.Χ., μας πληροφορεί ανάμεσα σε πολλές περιγραφές ότι ένας κρατήρας αφιερωμένος στους Δελφούς έχει μια σιδερένια βάση, η οποία κατασκευάστηκε με τη συγκόλληση τεμαχίων σιδήρου. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα στη διάπυρη κατάσταση με σφυρηλασία στους 1200°-1250°C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες ο σίδηρος είναι πολύ μαλακός, βγάζει σπίθες και παρουσιάζει σημεία τοπικού βρασμού. Έτσι εύκολα συγκολλούνται τα δυο άκρα του. Από εδώ γνωρίζουμε και τη λαϊκή παροιμία : «στη βράση κολλάει το σίδηρο». (βιβ. Β5)

## Η αργοπορία του σιδήρου στην ιστορία των μετάλλων

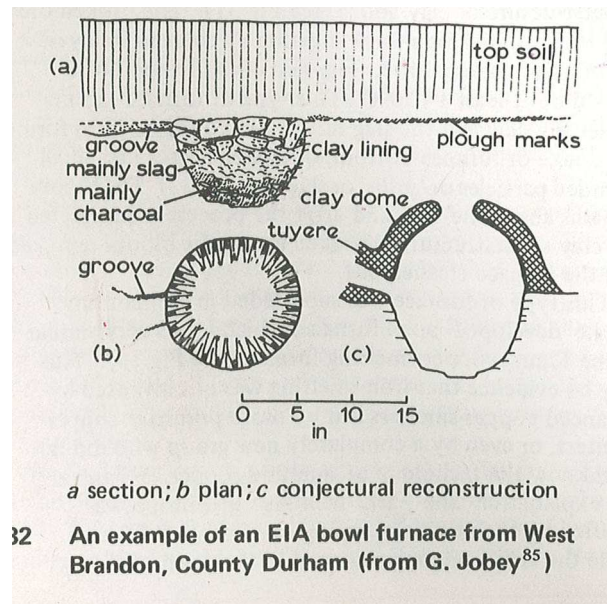
Είναι γεγονός πως ο σίδηρος άργησε να εμφανιστεί αρκετά στην ιστορία του ανθρώπινου γένους συγκριτικά βέβαια και με την εμφάνιση άλλων μετάλλων πριν το σίδηρο. Ένας λόγος είναι η μεγάλη δυσκολία που αντιμετώπιζαν οι αρχαίοι τεχνίτες στην παραγωγή του σιδήρου από τα ίδια τα μεταλλεύματά του, σε αντίθεση με την περίπτωση του χαλκού. Αυτό συνέβη γιατί ο σίδηρος στη φύση απαντάται πάντα οξειδωμένος και ποτέ αυτοφυής όπως ο χαλκός. Συνεπώς έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος για το διαχωρισμό του από το οξυγόνο.

Μία άλλη δυσκολία που συναντούσε ο τεχνίτης ήταν η μετατροπή του σιδήρου σε χάλυβα, μιας και αυτός αποκτά ιδιότητες που χειρίζονται δύσκολα.

## Κάμινοι

### Κοιλώδης κάμινος

Το πιο πρωτόγονο είδος καμίνου για την παραγωγή σιδήρου ήταν η λεγόμενη “bowl furnace”, ή “κοιλώδης κάμινος” η οποία δεν είναι τίποτα άλλο από μια κοιλότητα μέσα στο έδαφος στην οποία φυσούσαν αέρα μέσω φουσερών τα οποία έφταναν εκεί μέσα από αγωγούς, οι οποίοι ήταν επενδυμένοι εξωτερικά με ένα στρώμα αργίλου (εικ 31). Το θραυσμένο σε μικρά τεμάχια μέταλλο είτε φορτωνόταν μαζί με ξυλάνθρακα είτε τοποθετούνται σε εναλλασσόμενα επίπεδα και καίγονταν. Η μέγιστη θερμοκρασία πρέπει να ήταν το λιγότερο 1150°C. Αυτό το είδος καμίνου δεν έχει ειδική έξοδο για τη σκουριά, συνεπώς αυτή κυλά στον βυθό της κοιλώδους δημιουργώντας είτε ένα μαλακό στερεό στρώμα τεμαχίων (εικ 32). Το παραγόμενο μέταλλο στην περίπτωση του χαλκού, παρέμενε στο βυθό του κλιβάνου, ενώ επέπλεε η σκουριά. Ο περαιτέρω διαχωρισμός των δύο ήταν πολύ εύκολη διαδικασία. Είναι γενικά γνωστό ότι κατά την εποχή του σιδήρου στη Ευρώπη χρησιμοποιούνταν κάμινοι χωρίς ειδική έξοδο για την απόχυση της σκουριάς, κάτι που αναπτύχθηκε αργότερα, στην Ρωμαϊκή εποχή. Στη συνέχεια ακολουθούν δύο σκίτσα της κοιλώδους καμίνου (βιβ A18, A13, A14).



Εικόνα 1.14 Κοιλώδης κάμινος.

Εκτός από την κοιλώδη κάμινο όμως, στα πρώιμα χρόνια της μεταλλουργίας του σιδήρου, φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν:

- η φρεατώδης κάμινος
- η θολωτή κάμινος.

### Φρεατώδης κάμινος

Η φρεατώδης κάμινος ήταν χτισμένη από Λαυρεωτικό σχίστη και επενδεδυμένη με πυρίμαχο αργιλούχο υλικό. Ήταν όμως πιο χαμηλή, με ύψος 80-120 cm και διαμέτρου από 15 cm. Ο πυθμένας της ήταν ελαφρά κοίλος.

Όπως και στην κοιλώδη κάμινο ο αέρας χορηγείται με φουσερά, αλλά από το κάτω μέρος της. Σε αντίθεση όμως με την πρώτη, είναι χτισμένη εκτός εδάφους, λόγω του ύψους της. Η φόρτιση γινόταν με τον ίδιο τρόπο όπως στην κοιλώδη κάμινο. Πιθανότατα η φρεατώδης κάμινος να γέμιζε ως επάνω. Μετά από 6-10 ώρες αναγωγικής τήξης το φορτίο κατέβαινε προς τον πυθμένα κι έτσι σχηματιζόταν το μεταλλικό σύντηγμα. Το σχήμα του οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα του φορτίου, από το κέντρο προς τα τοιχώματα της καμίνου όπου η τριβή είναι σημαντική. Στο σύντηγμα δεν δημιουργόταν χυτοσίδηρος, κάτι που δείχνει ότι οι αρχαίοι μεταλλουργοί δεν πετύχαιναν στην κάμινο υψηλές θερμοκρασίες. Μέσα στην κάμινο οι συνθήκες δεν ήταν ιδανικές για την ενανθράκωση του συντήγματος



και τη δημιουργία χυτοσιδήρου, ώστε να γίνει η σκωρία αρκετά ρευστή. Συνεπώς η αναγωγή των σιδηρούχων μεταλλευμάτων για την παραγωγή σπογγώδους σιδήρου είναι αρκετά δύσκολη και από διάφορα ευρήματα βλέπουμε πως δεν είναι πάντα επιτυχημένη, καθώς ορισμένα από αυτά είναι ημιανηγμένα. Δηλαδή δεν περιέχουν μεταλλικό σίδηρο, όπως περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο. Ακολουθεί μια παράσταση σε ελληνικό σωζόμενο αγγείο που απεικονίζει έναν μεταλλοτεχνίτη να εργάζεται και μια φρεατώδη κάμινο.( βιβ A18, A13, A14)



Εικόνα 1.15 Ο μεταλλοτεχνίτης κατεργάζεται το σίδηρο. Λεπτομέρεια από παράσταση σε ελληνικό αγγείο

## Η παραγωγή σιδήρου στην αρχαιότητα

Ο αρχαίος μεταλλουργός άναβε τα ξυλοκάρβουνα και αφού πύρωνε τον κλίβανο φόρτωνε σε στρώσεις το καύσιμο αυτό μαζί με το μέταλλευμα σιδήρου. Κοντά στον πυθμένα του κλιβάνου υπήρχε ένα φουσερό για τη διοχέτευση αέρα με σκοπό την καύση του ξυλοκάρβουνου. Με την καύση του η θερμοκρασία στον κλίβανο αυξανόταν. Έφτανε μέχρι τη μέγιστη θερμοκρασία των 1200°C. Το σημείο τήξης του σιδήρου όμως είναι οι 1535°C, συνεπώς ο σίδηρος δεν απελευθερώνεται ρευστός, αλλά κατερχόταν σε διάπυρη μορφή. Δυστυχώς για το μεταλλουργό όμως έπαιρνε μια μάζα που θύμιζε σκουριά. Αυτό συμβαίνει γιατί ο καθαρός σίδηρος που απελευθερώνεται στην κάθοδο ενώνεται ξανά με το οξυγόνο κι έτσι λαμβάνουμε το οξείδιο μαζί με σκουριά. Παρακάτω απεικονίζεται κομμάτι καθαρού σιδήρου όπως αυτό παραγόταν από την παραπάνω διαδικασία.



Εικόνα 1.16 Προϊόν τήξης από αρχαίο κλίβανο

Έτσι για να πάρουμε μια μάζα ελεύθερου μεταλλικού σιδήρου χρειάζονται μεν ειδικές συνθήκες αναγωγικής τήξης, αλλά ακόμη και με τις ιδανικές συνθήκες παίρνουμε μια μάζα, η οποία όμως μετά από κάποια διαδικασία αποκαλύπτει στιλπνές νησίδες μεταλλικού σιδήρου (βλ. σχετική εικόνα).

Ακόμη όμως και όταν κατάφερε ο αρχαίος μεταλλουργός να παράγει καθαρό σίδηρο αντιμετώπισε δυσκολία στη διαμόρφωσή του, μιας και όταν θα δοκίμαζε να σφυρηλατήσει αυτή τη μάζα αυτή θα έσπαγε. Μετά από πειραματισμούς έγινε αντιληπτό πως είναι απαραίτητη η πυράκτωση της μάζας σιδήρου και σκουριάς σε μια θερμοκρασία γύρω στους 1100°C. Σε αυτή τη θερμοκρασία η σκουριά είναι ρευστή οπότε απομακρύνεται με τη σφυρηλάτηση, ενώ οι πυρακτωμένοι κόκκοι σιδήρου συγκολλούνται μεταξύ τους, λαμβάνοντας στο τέλος της διαδικασίας μια μορφή σιδερένιας ράβδου.

Δυστυχώς όμως ο μεταλλουργός συνέχιζε να αντιμετωπίζει προβλήματα με το σίδηρο, μιας και η σιδερένια ράβδος που παράχθηκε θα πρέπει να σφυρηλατηθεί ξανά σε μια θερμοκρασία 800-900°C, για να κατασκευάσει οποιοδήποτε κάποιο σιδερένιο αντικείμενο. Το επόμενο στάδιο ήταν η ενανθράκωση της μεταλλικής ράβδου με θέρμανση μέσα σε μια χόβολη ξυλάνθρακα, αφού φυσικά ο τεχνίτης θα την είχε διαμορφώσει σε υψηλή θερμοκρασία (περίπου 1200° C) σε ξίφος ή εργαλείο. Το ενανθρακωμένο πλέον αντικείμενο, δηλαδή ο χάλυβας, έπρεπε να το σκληρύνουν με τη βαφή. Η τελευταία γινόταν όπως και σήμερα, δηλαδή με τη βαφή. Θερμαινόταν μέχρι τους 700-900° C και ακολουθούσε απότομη ψύξη μέσα σε κρύο νερό ή λάδι. Αυτή η διαδικασία προσδίδει μεγάλη σκληρότητα στον χάλυβα, τον κάνει όμως ταυτόχρονα πολύ εύθραυστο. Για το λόγο αυτό ο τεχνίτης αναθερμαίνει το βαμμένο χάλυβα στους 400°C, ώστε το τελικό του προϊόν να είναι μεν σκληρό, αλλά ταυτόχρονα να είναι και ελατό και όχι εύθραυστο. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *επαναφορά* και ακολουθεί πάντα μετά τη βαφή.(βιβ. Α4)

Ύστερα από την παραπάνω περιγραφή του τρόπου παραγωγής του σιδήρου, καθώς και του επίπνου τρόπου διαμόρφωσής του στα διάφορα σιδερένια αντικείμενα γίνεται εύκολα αντιληπτός ο λόγος που η εμφάνιση του σιδήρου στην ιστορία καθυστέρησε 2500 χρόνια από την εμφάνιση του χαλκού. Με την κατόρθωση της παραγωγής του σιδήρου χαράζει μια νέα εποχή για την εξέλιξη του ανθρώπινου γένους: *η εποχή του σιδήρου*.

---

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2***

---

## 2.1 ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξηγηθούν σημαντικές έννοιες της μεταλλογνωσίας και της μεταλλοτεχνίας, απαραίτητες για την περαιτέρω ανάλυση της έρευνας που έγινε στους συνδέσμους του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα.

### Αταξίες

Σε έναν κρύσταλλο διακρίνουμε δύο είδη παραμορφώσεων: την ελαστική και την πλαστική. Η ελαστική παραμόρφωση είναι ομοιογενής. Δηλαδή όλα τα άτομα μετατοπίζονται κατά τον ίδιο τρόπο με μη μόνιμο αποτέλεσμα. Σε αντίθεση με την ελαστική η πλαστική παραμόρφωση είναι μόνιμη, ανομοιογενής και σε συγκεκριμένες περιοχές του κρυστάλλου.

Την πλαστική παραμόρφωση σε έναν κρύσταλλο ακολουθούν γραμμές στην επιφάνεια του μετάλλου που ονομάζονται γραμμές ολίσθησης, οι οποίες οφείλονται στις απολήξεις κρυσταλλικών επιπέδων που έχουν ολισθήσει υπό την επίδραση διατμητικής τάσης. Με τον όρο ολίσθηση εννοούμε την κίνηση μιας αταξίας. Η ολίσθηση αυτή γίνεται σε συγκεκριμένα επίπεδα και διευθύνσεις. Αταξία ονομάζεται η γραμμική ατέλεια σε έναν κρύσταλλο, που οριοθετεί την περιοχή του κρυστάλλου, που έχει υποστεί ολίσθηση από τον υπόλοιπο κρύσταλλο που δεν έχει ολισθήσει. (βιβ. Α19)

### Στερεά διαλύματα παρεμβολής

Ορισμένα στοιχεία μπορούν να καταλάβουν θέσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα του α και γ-σιδήρου. Αυτές οι θέσεις ονομάζονται θέσεις παρεμβολής. Έτσι σχηματίζονται τα στερεά διαλύματα παρεμβολής με απαραίτητη προϋπόθεση η ατομική ακτίνα του στοιχείου παρεμβολής να είναι πολύ μικρότερη από την ατομική ακτίνα του σιδήρου.

---

Ένα τέτοιο στερεό διάλυμα παρεμβολής είναι ο C στο σίδηρο. Η στερεά διαλυτότητα του άνθρακα στον α και στο γ-σίδηρο διαφέρει. Ο ωστενίτης μπορεί να διαλύσει έως 2% κ.β. ενώ ο φερρίτης 0,02%. Αυτή η διαφορά οφείλεται στο μέγεθος των θέσεων παρεμβολής. Στον ωστενίτη ο C καταλαμβάνει τις οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής όπως και στο φερρίτη παρά το γεγονός ότι οι τετραεδρικές είναι πιο ευρύχωρες. Οι οκταεδρικές θέσεις είναι ανισότροπες και ο C πρέπει να μετατοπίσει μόνο δύο άτομα σιδήρου ενώ στις ισότροπες τετραεδρικές θέσεις πρέπει να μετατοπίσει τέσσερα άτομα σιδήρου για να την καταλάβει. Σε αυτή την τοπική τετραγωνική ανισοτροπία οφείλεται η υψηλή αντοχή του φερρίτη, αλλά και του μαρτενσίτη ο οποίος δεσμεύει περισσότερο άνθρακα. (βιβ. Α19)

## Διάχυση

Η διάχυση αποτελεί μία από τις βασικότερες έννοιες στους μετασχηματισμούς φάσεων και γενικότερα σε μεταλλουργικές διεργασίες μιας και καθορίζει την κινητική τους. Διάχυση είναι η μετακίνηση των ατόμων σε αποστάσεις τουλάχιστον ίσες με την παράμετρο του πλέγματος. Οι περισσότεροι από τους μετασχηματισμούς φάσεων γίνονται με μηχανισμούς διάχυσης. Κατά τη διάχυση προκύπτει πάντα μείωση της ελεύθερης ενέργειας. Συμβαίνει είτε από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης, (που είναι και πιο σύνηθες) είτε το αντίθετο. Σκοπός της διάχυσης είναι η απαλοιφή των διαφορών συγκέντρωσης.

Κατά τη διάχυση ατόμων αντικατάστασης ή αυτοδιάχυση, είναι απαραίτητο να υπάρχει διπλανή κενή πλεγματική θέση, (οπή) έτσι ώστε να μπορεί να μετακινηθεί το άτομο. Η διάχυση αυτή ονομάζεται και διάχυση οπής. Για την υλοποίησή της πρέπει να συμβαίνουν δύο τα εξής:

α)πρέπει να υπάρχουν κενές οπές

β)η θερμική ενέργεια των ατόμων να είναι τέτοια ώστε να τους δίνει αρκετή ώθηση για ταλάντωση προς τις διπλανές κενές οπές.

Οι δύο αυτοί παράγοντες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, όπως και ο γενικός μηχανισμός της διάχυσης.

---

Στην περίπτωση της διάχυσης των ατόμων παρεμβολής, εάν υπάρχει η απαραίτητη θερμική ενέργεια το άτομο παρεμβολής μπορεί να μετακινηθεί σε μια άλλη κενή θέση παρεμβολής. Συνήθως τα στερεά διαλύματα είναι αραιά και δεν καταλαμβάνονται όλες οι θέσεις παρεμβολής. Έτσι ένα άτομο περιβάλλεται από άλλες κενές θέσεις παρεμβολής στις οποίες μπορεί να μετακινηθεί. (βιβ. Α19)

## Το διμερές διάγραμμα φάσεων Fe-C(χαιδεμ. Σελ370)

Το σημαντικότερο ίσως διάγραμμα για την ερμηνεία των φάσεων ισορροπίας του σιδήρου με το σεμεντίτη Fe<sub>3</sub>C είναι αυτό του Fe-C. Στο διάγραμμα εμφανίζονται οι εξής σταθερές φάσεις καθώς και μίγματα φάσεων:

- Ο φερρίτης (α-Fe).
- Ο ωστενίτης (γ-Fe).
- Ο σεμεντίτης Fe<sub>3</sub>C.
- Ο λεδεβουρίτης (μίγμα γ + Fe<sub>3</sub>C).
- Ο περλίτης (μίγμα α + Fe<sub>3</sub>C).

Μία ακόμη φάση η οποία δεν υπάρχει στο διάγραμμα γιατί δεν είναι φάση ισορροπίας είναι ο μαρτενσίτης ο οποίος σχηματίζεται με απότομη ψύξη, τη λεγόμενη βαφή. Το διάγραμμα του Fe-C ισχύει πάντα για αργές μόνο ψύξεις.

Ισχύουν οι παρακάτω βασικές αντιδράσεις:

- Η περιτηκτική αντίδραση στους 1496°C: L + δ → γ.
- Η ευτηκτική αντίδρασή στους 1149°C: L → γ + Fe<sub>3</sub>C.
- Η ευτηκτοειδής αντίδραση στους 723°C: γ → α + Fe<sub>3</sub>C.

Στο διάγραμμα υπάρχουν δύο κρίσιμες θερμοκρασίες. Η μία είναι η θερμοκρασία των 723°C όπου γίνεται η ευτηκτοειδής αντίδραση και η άλλη είναι εκεί που γίνεται ο μετασχηματισμός του α σε γ-σίδηρο.

Οι χάλυβες, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: στους ευτηκτοηδείς με 0,8% C, στους υποευτηκτοηδείς με λιγότερο από 0,8% C και στους υπερευτηκτοηδείς με περισσότερο από 0,8% C.

Συνεπώς παρατηρώντας το διάγραμμα, όταν ένας ευτηκτοειδής χάλυβας θερμανθεί στην ωστενιτική περιοχή και στη συνέχεια ψυχθεί αργά τότε η ευτηκτοειδής

---

αντίδραση κατά την ψύξη θα τον μετατρέψει σε 100% περλίτη. Ο περλίτης δεν είναι φάση αλλά μίγμα φάσεων φερρίτη και σεμεντίτη.

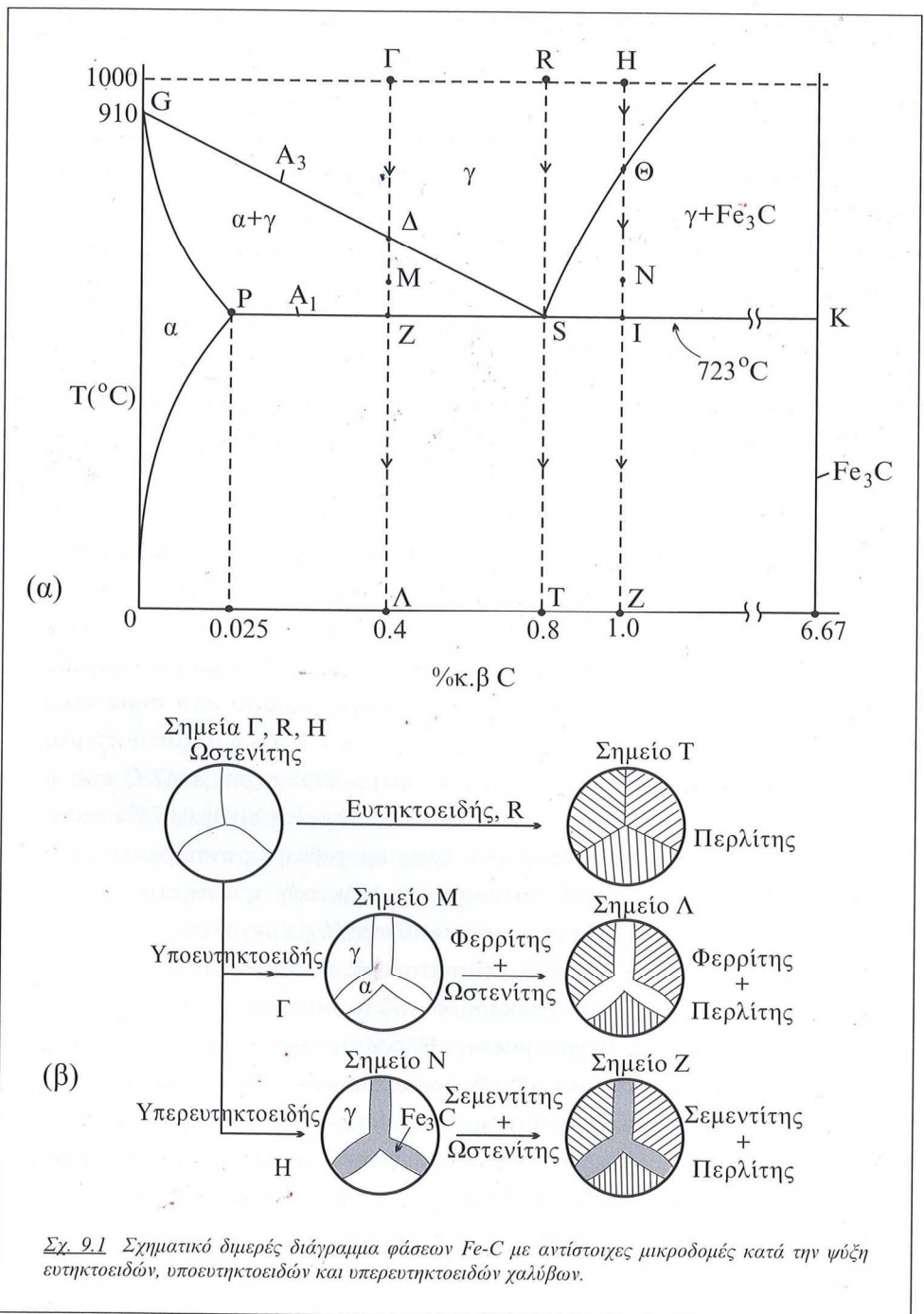
Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο αν γίνει απόψυξη ενός υποευτηκτοειδούς χάλυβα (0,025-0.8%C) ο  $\gamma$ -σίδηρος μετασχηματίζεται σε  $\alpha$ -σίδηρο. Μέχρι τη θερμοκρασία των 723°C συνεχώς μειώνεται ο  $\gamma$ -σίδηρος με ταυτόχρονη αύξηση του άνθρακα σε αυτόν και αυξάνεται ο  $\alpha$ -σίδηρος αποβάλλοντας άνθρακα προς τον ωστενίτη. Ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε άνθρακα τον κάνει να έχει ευτηκτοειδή σύσταση οπότε ο υπολειπόμενος ωστενίτης θα μετατραπεί σε 100% περλίτη κάτω από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία. Ο φερρίτης που σχηματίζεται μεταξύ των θερμοκρασιών A3 και A1 ονομάζεται προευτηκτοειδής. Οπότε στη θερμοκρασία δωματίου θα έχουμε προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη.

Κατά την απόψυξη ενός υπερευτηκτοειδούς χάλυβα (0.8-2%C) ο  $\gamma$ -σίδηρος (ωστενίτης) μετασχηματίζεται αρχικά σε  $\gamma$ -σίδηρο και σεμεντίτη, ο οποίος ονομάζεται προευτηκτοειδής σεμεντίτης. Καθώς συνεχίζεται η ψύξη (σε υψηλότερες θερμοκρασίες από την ευτηκτοειδή) η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα μειώνεται ενώ σχηματίζεται περισσότερος σεμεντίτης που αποσπά άνθρακα από τον ωστενίτη. Στη θερμοκρασία A1+θ υπάρχει προευτηκτοειδής σεμεντίτης και ωστενίτης. Με τη μείωση του άνθρακα στον ωστενίτη έχει δημιουργηθεί σε αυτόν η ευτηκτοειδής σύσταση συνεπώς κάτω από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία μετασχηματίζεται κατά 100% σε περλίτη. Συνεπώς σε θερμοκρασία δωματίου θα περιέχεται στο χάλυβα προευτηκτοειδής σεμεντίτης και περλίτης.

Θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη το γεγονός ότι ο ρυθμός των αποψύξεων είναι ιδιαίτερα αργός (π.χ. ψύξη μέσα σε φούρνο) έτσι ώστε να υπάρχει ο απαραίτητος χρόνος για τους μετασχηματισμούς. Σε αντίθετη περίπτωση πραγματοποιούνται άλλου είδους μετασχηματισμοί όπως ο μαρτενσιτικός και ο μπαινιτικός. Το διμερές διάγραμμα Fe-C απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. (βιβ. A19)







Εικόνα 2.1 Το διμερές διάγραμμα Fe-C από το βιβλίο ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ Θεμελιώδεις Αρχές του Χαϊδεμενόπουλου

---

## Μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες

### Ο φερριτικός μετασχηματισμός ( $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ )

Ο  $\gamma\text{-Fe}$  μετασχηματίζεται κατά την αργή απόψυξη ενός υποευτηκτοειδούς χάλυβα σε  $\alpha\text{-Fe}$  μεταξύ των θερμοκρασιών A1 και A3. Επίσης μετασχηματίζεται και με τη γρήγορη απόψυξη του  $\gamma\text{-Fe}$  σε θερμοκρασιακό εύρος από τους  $723^\circ\text{C}$  έως τους  $600^\circ\text{C}$ . Ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται με διάχυση. (Διάχυση είναι η μετακίνηση των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα σε αποστάσεις σχεδόν ίσες με την παραμόρφωση του πλέγματος). Ανάλογα τη θερμοκρασία μετασχηματισμού διακρίνουμε στο φερρίτη τις εξής μορφολογίες:

- Τις περικρυσταλλικές ετερομορφές
- Τα πλακίδια ή λωρίδες Widmanstätten.
- Τις διακρυσταλλικές ιδιομορφές.
- Τα διακρυσταλλικά πλακίδια.

Οι περικρυσταλλικές ετερομορφές είναι κρύσταλλοι φερρίτη που σχηματίζονται σε υψηλές θερμοκρασίες στα όρια των κόκκων του ωστενίτη.

Τα πλακίδια Widmanstätten σχηματίζονται στα όρια των κόκκων του ωστενίτη ή στις προϋπάρχουσες φερριτικές ετερομορφές και δημιουργείται όταν ο χάλυβας ψυχθεί απότομα από την θερμοκρασία [ωστενιτοποίησης](#) σε θερμοκρασία κατά λίγο χαμηλότερη. Έχουν βελονοειδή μορφή προσδίδοντας ευθραυστότητα στο χάλυβα. Δημιουργείται κατά τη θερμική κατεργασία του χάλυβα με θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες, κοντά στη θερμοκρασία τήξης του. Τότε έχουμε τη λεγόμενη υπερθέρμανση του χάλυβα.

Οι διακρυσταλλικές ιδιομορφές σχηματίζονται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές του φερρίτη Widmanstätten στο εσωτερικό των ωστενιτικών κόκκων και είναι ισοαξονικοί κρύσταλλοι φερρίτη.

Σε ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες σχηματίζονται τα διακρυσταλλικά πλακίδια φερρίτη αντίστοιχα των Widmanstätten με τη διαφορά ότι αυτά σχηματίζονται στα όρια των κόκκων. Τα ίδια ισχύουν όχι μόνο για τους ανθρακοχάλυβες αλλά και για

---

χάλυβες της μορφής Fe-C-X, όπου X ένα κραματικό στοιχείο αντικατάστασης, με τη διαφορά ότι η κινητική του μετασχηματισμού είναι διαφορετική. Σε γενικές γραμμές όμως η ανάπτυξη του φερρίτη στα κράματα είναι πιο αργή από αυτή στους ανθρακοχάλυβες. (βιβ. A19)

### Ο περλιτικός μετασχηματισμός ( $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ )

Ο περλιτικός μετασχηματισμός λαμβάνει χώρα στους χάλυβες κάτω από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία ( $723^\circ\text{C}$ ) καθώς ο  $\gamma\text{-Fe}$  μετατρέπεται σε  $\alpha\text{-Fe}$  και  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Ο μετασχηματισμός αυτός στηρίζεται στις διεργασίες της διάχυσης καθώς επίσης και στη διάχυση του άνθρακα στον ωστενίτη. Η πυρήνωση (ο σχηματισμός πυρήνων της νέας φάσης σε ένα μετασχηματισμό) του περλίτη γίνεται στα όρια των κόκκων του ωστενίτη. Οι ευτηκτοειδείς χάλυβες μετατρέπουν τον ωστενίτη σε 100% περλίτη. Στους υποευτηκτοειδείς χάλυβες η πυρήνωση πραγματοποιείται στον προευτηκτοειδή φερρίτη που έχει σχηματιστεί κατά τον φερριτικό μετασχηματισμό, ενώ αντίστοιχα στους υπereυτηκτοειδείς χάλυβες η πυρήνωση πραγματοποιείται στον προευτηκτοειδή σεμεντίτη. Τα κραματικά στοιχεία επιβραδύνουν την ανάπτυξη του περλίτη επειδή είτε συγκεντρώνονται στα όρια των κόκκων και επιβραδύνουν την πυρήνωση του περλίτη, είτε επειδή ενώ διαχωρίζονται στο φερρίτη και το σεμεντίτη πρέπει να διαχυθούν κατά το μετασχηματισμό.

Μορφολογικά ο περλίτης αποτελείται από πλακίδια φερρίτη και σεμεντίτη εναλλακτικά. Κύριο χαρακτηριστικό της μικροδομής του είναι το μήκος κύματος της,  $\lambda$ . Τα πλακίδια φερρίτη-σεμεντίτη πολλαπλασιάζονται με την ανάπτυξη του περλίτη, είτε με πλευρική πυρήνωση νέων, είτε με διακλάδωση των ήδη υπαρχόντων. Η περλιτική μικροδομή εξαρτάται από: την υπέρψυξη, το μήκος κύματος  $\lambda$ , το ρυθμό πυρήνώσεως και το μέγεθος του ωστενιτικού κόκκου.

Ο περλίτης στους χάλυβες μειώνει την ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητά τους καθώς τα πλακίδια του φερρίτη και του σεμεντίτη λειτουργούν σαν θέσεις ανάπτυξης ρηγμάτων. Έτσι η αύξηση του ποσοστού του περλίτη, (αύξηση του άνθρακα), οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση, όπως

---

επίσης και σε αύξηση του ορίου διαρροής και της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού. Τέλος η μηχανική του αντοχή αυξάνεται με τη μείωση του μήκους κύματος λ. (βιβ. A19)

## Σορμπίτης

Η δομή του κρυσταλλικού πλέγματος παραμένει δυσδιάκριτη και παρουσιάζει μάλλον μια κοκκώδη παρά μια όψη παράλληλων επιπέδων (περλιτική μικροδομή.) Επίσης παρατηρείται συχνά ότι το ποσοστό του ελεύθερου φερρίτη και του ελεύθερου σεμεντίτη δεν έχει απορριφθεί. Οι κόκκοι διατηρούν και με το παραπάνω τις δομές αυτές. Σε αυτόν τον ατελώς ανεπτυγμένο περλίτη, δόθηκε από τον Osmond το όνομα σορμπίτης και υιοθετήθηκε διεθνώς. Είναι προφανές ότι ο σχηματισμός του προκλήθηκε από μια σχετικά γρήγορη ψύξη, σε τέτοιο χρόνο ώστε να μην είναι αρκετός για το σχηματισμό των ξεχωριστών χαρακτηριστικών επιπέδων φερρίτη και σεμεντίτη στον περλίτη, (στους υπο και υπερευνηκτοειδείς χάλυβες), για την απόρριψη όλου του ποσοστού του ελεύθερου φερρίτη και του ελεύθερου σεμεντίτη. Η ψύξη στον αέρα μετά από θερμική κατεργασία ειδικά μικρών αντικειμένων είναι αρκετά γρήγορη για να προκαλέσει το σχηματισμό μάλλον του σορμπίτη παρά του περλίτη. Επίσης αναφέρεται πως ενώ ο σορμπίτης είναι λιγότερο ολκιμος από τον περλίτη, έχει υψηλότερη αντοχή, υψηλότερο όριο ελαστικότητας και μεγαλύτερη σκληρότητα. Συνεπώς σε θερμικής κατεργασίας αντικείμενα τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να αποκτηθούν θυσιάζοντας ένα ποσοστό της ολκιμότητάς τους, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία ψύξης. (The Metallography And Heat Treatment Of Iron And Steel, Albert Sauver, New York and London, 1935). (βιβ A15, A16).

## Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός

Ο μαρτενσίτης είναι μία ασταθής φάση τετραγωνικής χωροκεντρωμένης δομής (BCT) η οποία δημιουργείται με την απότομη ψύξη ενός χάλυβα που έχει θερμανθεί

---

στην ωστενιτική περιοχή και ψύχεται πολύ γρήγορα. Αναπτύσσεται στον ωστενίτη σε πλακίδια ή λωρίδες με τη διαδικασία αυτή που ονομάζεται βαφή προσδίδοντάς του μεγάλη σκληρότητα. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι μη διαχυτικός.

Σημαντικό ρόλο στο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό παίζει η ταχύτητα της απόψυξης η οποία πρέπει να είναι υψηλή έτσι ώστε να μην αναπτυχθούν οι μηχανισμοί διάχυσης και ως αποτέλεσμα να έχουμε τη δημιουργία άλλων φάσεων. Η ταχύτητα αυτή καθορίζεται από την καθαρότητα του χάλυβα και από το μέγεθος του ωστενιτικού κόκκου. Το ποσοστό του μαρτενσίτη αυξάνεται κατά την ψύξη σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασιακή περιοχή, η οποία σηματοδοτεί την έναρξη και τη λήξη του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Η Ms ονομάζεται θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και η Mf θερμοκρασία λήξης. Η Ms εξαρτάται από τη χημική σύσταση του χάλυβα, έτσι κάποια στοιχεία όπως C, N, Ni, Mn, που ονομάζονται σταθεροποιητές τη μειώνουν με μεγαλύτερη την επίδραση του άνθρακα. Κυμαίνεται από 500°C έως και χαμηλές θερμοκρασίες δωματίου. Ο μετασχηματισμός λήγει σε θερμοκρασία Mf όπου και δεν ολοκληρώνεται πάντα με αποτέλεσμα ορισμένες φορές να υπάρχει κάποιο ποσοστό ωστενίτη που ονομάζεται παραμένων ωστενίτης. Για παράδειγμα σε υψηλά κραματομένους χάλυβες η Mf είναι περίπου 0°C και έτσι ο παραμένων ωστενίτης κυμαίνεται σε υψηλότερα ποσοστά.

Ο μαρτενσίτης οδηγεί σε δραματική αύξηση της σκληρότητας των χαλύβων, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία του άνθρακα στις θέσεις παρεμβολής στο κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη (BCT), οι οποίες είναι ίδιες με αυτές που καταλαμβάνει στον ωστενίτη (πλέγμα FCC), κάτι που συμπεραίνουμε από το ότι ο σχηματισμός του μαρτενσίτη δε γίνεται με διάχυση. Η διαφορά στην παρουσία του άνθρακα στα δύο πλέγματα είναι ότι στο πλέγμα του ωστενίτη οι παραμορφώσεις είναι συμμετρικές και οδηγούν σε περιορισμένη ισχυροποίηση του στερεού διαλύματος, σε αντίθεση με το πλέγμα του μαρτενσίτη που οι παραμορφώσεις είναι μη συμμετρικές με συνέπεια τη σημαντική ισχυροποίηση του στερεού διαλύματος.

Ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα ο μαρτενσίτης εμφανίζεται είτε με τη μορφή λωρίδων για λιγότερο από 0,4%C, είτε με τη μορφή πλακιδίων για περισσότερο από 0,6%C. Από 0,4% έως 0,6% σε άνθρακα αποτελείται από λωρίδες και πλακίδια. Επίσης η μαρτενσιτική φάση παρουσιάζει εσωτερική δομή, η οποία εξαρτάται από το είδος της συμπληρωματικής παραμόρφωσης αμετάβλητου πλέγματος. Συνεπώς εάν η παραμόρφωση είναι διδυμιακή τότε στο εσωτερικό των

---

πλακιδίων σχηματίζονται διδυμίες. Εάν η παραμόρφωση πραγματοποιείται με ολίσθηση αταξιών, τότε στο εσωτερικό των λωρίδων παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση αταξιών. .(βιβ. A19)

## Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός

Ο μπαινίτης σχηματίζεται κατά την ψύξη του ωστενίτη σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 550°C (έτσι ώστε να μην μετασχηματιστεί σε προευθηκτοειδή φερρίτη και περλίτη) και υψηλότερες της θερμοκρασίας έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Μορφολογικά αποτελείται από πλακίδια φερρίτη και σωματίδια σεμεντίτη.

Σε θερμοκρασιακό εύρος 400-500°C σχηματίζεται ο άνω μπαινίτης. Αρχικά αναπτύσσονται λεπτά πλακίδια φερρίτη ενώ ταυτόχρονα ο ωστενίτης εμπλουτίζεται με άνθρακα λόγω της χαμηλής διαλυτότητας του φερρίτη σε άνθρακα. Στη συνέχεια καθιζάνει σεμεντίτης μεταξύ των πλακιδίων του φερρίτη, λόγω του εμπλουτισμού του ωστενίτη σε άνθρακα. Εάν ο χάλυβας έχει χαμηλό ποσοστό άνθρακα τότε ο σεμεντίτης καθιζάνει υπό τη μορφή σωματιδίων. Αντίθετα εάν η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι υψηλή τότε ο σεμεντίτης καθιζάνει υπό τη μορφή λωρίδων. Ο άνω μπαινίτης σχηματίζεται σε ομάδες παράλληλων πλακιδίων τις μπαινιτικές δεσμίδες. Όπως και στο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό έτσι και ο μπαινιτικός πραγματοποιείται μετατοπιστικά.

Σε θερμοκρασιακό εύρος 250-400°C σχηματίζεται ο κάτω μπαινίτης. Η βασική διαφορά του με τον άνω μπαινίτη είναι ότι ενώ σε αυτόν σε πρώτο στάδιο αναπτύσσεται ο φερρίτης και εμπλουτίζεται ο ωστενίτης σε άνθρακα, στον κάτω μπαινίτη καθιζάνει ταυτόχρονα και σεμεντίτης μέσα στο φερρίτη. Έτσι στον κάτω μπαινίτη ο σεμεντίτης βρίσκεται τόσο ανάμεσα στα πλακίδια του φερρίτη όσο και μέσα σε αυτά. .(βιβ. A19)

---

## Σφυρηλασία

Με τον όρο σφυρηλασία εννοούμε μια πολύ εκτεταμένη κατηγορία μεθόδων και τεχνικών θερμής και ψυχρής διαμόρφωσης των μετάλλων με μάλαξη. Χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι δημιουργούνται παραμορφώσεις που επιβάλλονται με δυνάμεις που δρουν κατά συνεχή τρόπο και διαρκούν λίγο χρόνο.

Η παραμόρφωση διεισδύει σε βάθος μέσα στο αντικείμενο, σε αντίθεση με άλλες τεχνικές. Το γνώρισμα της διεισδυτικότητας των παραμορφώσεων κατά τη σφυρηλασία είναι ευνοϊκό για το κλείσιμο κοιλοτήτων, πόρων και μικροδιακενώσεων που προέρχονται από τη στερεοποίηση. Οι πόροι συνθλίβονται και συγκολλούνται στη θερμοκρασία της σφυρηλασίας που κατά κανόνα συμπίπτει με τη θερμοκρασία αυτογενούς συγκόλλησης (για τους κοινούς μαλακούς χάλυβες 1300°C). Επιδιώκεται οι στρώσεις του μετάλλου να είναι παράλληλες με τον άξονα του τεμαχίου, για να αποφεύγεται το φαινόμενο της εγκοπής, που θα οδηγούσε σε μειωμένη αντοχή, κρούση, ή κόπωση. Η παραμόρφωση των κόκκων κατά τη σφυρηλασία ακολουθεί ορισμένες ευνοϊκές διευθύνσεις, που υπαγορεύονται από τη γεωμετρία της παραμόρφωσης και από τη μορφή των άκρων της σφύρας. Σε συνδυασμό με τη δυναμική ανακρυστάλλωση οδηγεί σε κρυσταλλογραφικό ιστό. Δηλαδή οι κόκκοι αποκτούν κοινό ή παραπλήσιο κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό, χωρίς όμως να είναι επιμηκυμένοι, αφού η ενδοτράχυνση αναιρείται από την ανακρυστάλλωση. Είναι φυσικό όταν το μέταλλο περιέχει μη μεταλλικά εγκλείσματα, αυτά να επιμηκύνονται πολύ έντονα, ακολουθώντας τη διεύθυνση διαρροής του υλικού. Έχουμε δηλαδή και μικρογραφικό ιστό, που διαπιστώνεται εύκολα στο οπτικό μικροσκόπιο.

Επίσης ο χημικός ιστός που οφείλεται στο διαφορισμό των ακαθαρσιών δεν απομακρύνεται κατά τη σφυρηλασία, γιατί ο χρόνος παραμόρφωσης σε υψηλή θερμοκρασία δεν είναι αρκετός για την ομογενοποίηση με διάχυση.

Έτσι κάθε σφυρήλατο τεμάχιο διαμορφώνεται μέχρι το τελικό του σχήμα με τη βοήθεια μιας ή περισσότερων διαδοχικών πιέσεων ή συγκρούσεων. Το μέταλλευμα που θα υποστεί τη σφυρηλασία, σε γενικές γραμμές τοποθετείται πάνω σε ένα



---

ακίνητο υποστήριγμα και κρούεται με τη βοήθεια σφύρας. Η εφαρμογή της σφυρηλασίας ως τεχνική θερμής διαμόρφωσης απαιτεί:

- Τεμάχια χωρίς εσωτερικά ελαττώματα.
- Καλές μηχανικές ιδιότητες.
- Παραγωγή προϊόντων κοντά στην τελική τους μορφή για την εξοικονόμηση πρώτης ύλης και μηχανουργικής κατεργασίας.

Η σφυρηλασία σε γενικές γραμμές αποτελεί μία μέθοδο με δυνατότητα προσαρμογής για την κατασκευή ανεξάρτητων αντικειμένων ή τη σχεδιασμένη παραγωγή σε σειρά.

Κατά κανόνα η σφυρηλασία γίνεται σε υψηλή θερμοκρασία, υψηλότερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του μετάλλου. Η θερμή σφυρηλασία δεν χαρακτηρίζεται από την ενδοτράχυνση, γιατί προκαλείται σκλήρωση που μειώνει την ικανότητα μορφοποίησης του μετάλλου. Συνήθως εκλέγεται αρκετά υψηλή θερμοκρασία σφυρηλασίας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση, να δημιουργούνται μεγάλες παραμορφώσεις και να διευκολύνεται έτσι η κατεργασία του μετάλλου. Επίσης η δυναμική ανακρυστάλλωση είναι σημαντική για την αντοχή του μετάλλου, μιας και πολλαπλασιάζει τον αριθμό των κόκκων του, καθιστώντας το πιο λεπτόκοκκο, άρα και πιο ανθεκτικό. (βιβ. Α17)

## Σφυρηλασιμότητα

Σφυρηλασιμότητα ενός μετάλλου ή ενός κράματος είναι η πρακτικά η δυνατότητα διαμόρφωσής του με σφυρηλασία. Ένα μέταλλο έχει καλή σφυρηλασιμότητα, όταν μπορεί να υποστεί μεγάλη πλαστική παραμόρφωση πριν εμφανιστεί στο εσωτερικό του ή στην επιφάνειά του οποιαδήποτε ασυνέχεια σε μορφή μικρορωγμής ή μακρορωγμής. Ένα μέταλλο με κακή σφυρηλασιμότητα θα παρουσιάσει από την αρχή της παραμόρφωσης μικρορωγμές, που στη συνέχεια θα ενωθούν και τελικά στο αντικείμενο θα επέλθει η θραύση.

Οι μικρορωγμές σχηματίζονται πάνω σε ζώνες ολίσθησης και όπου η παραμόρφωση παρεμποδίζεται από ακίνητα εμπόδια, όπως είναι το όριο ενός γειτονικού κόκκου, ένα έγκλεισμα, ή μια άλλη ζώνη ολίσθησης, εγκάρσια προς την προηγούμενη. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιστραφεί όταν σε πολύ υψηλή

---

θερμοκρασία, όπου η διάχυση είναι σε θέση να αποκαταστήσει πολλές ατέλειες του πλέγματος, όταν δεν έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό.(βιβ. Α17)

---

## ***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3***

---

### 3.1 Μακροσκοπική μελέτη των συνδέσμων του ναού του Επικούρειου Απόλλωνα

#### Περίληψη

Η παρούσα μεταλλουργική έρευνα αφορά στην εξέταση πέντε σιδερένιων συνδέσμων του ναού του Επικούρειου Απόλλωνα και την σύγκριση τής τότε τεχνολογίας με εκείνη των συνδέσμων των ναών της Τραπεζιάς της αρχαϊκής εποχής και του Παρθενώνα της κλασικής. Ο ναός του Επικούρειου είναι γνωστόν, ότι κατασκευάστηκε μερικά χρόνια μετά τον Παρθενώνα και μάλιστα με τη μελέτη και την επίβλεψη του ιδίου αρχιτέκτονα, του Ικτίνου. Ωστόσο, ενώ ο ερευνητής θα περίμενε να υπάρχει κάποια σχέση ως προς την τεχνολογία κατασκευής των συνδέσμων, διαπιστώνει, ότι οι μεταλλοτεχνίτες τούς κατασκεύαζαν ο καθένας με τον δικό του τρόπο. Το πιο σημαντικό είναι, ότι οι τελευταίοι δεν εφάρμοσαν τουλάχιστον την εξαιρετική τεχνολογία κατασκευής των συνάδελφων τους στους ναούς της Ακρόπολης, αλλά μια πιο απλοϊκή. Την τελευταία θα παρακολουθήσομε, πάντοτε σε σύγκριση με τους συνδέσμους των άλλων ναών και τα συμπεράσματα είναι πολύ ενδιαφέροντα σχετικά με τις διαφορετικές τεχνολογίες, που ακολουθούσαν οι διάφοροι μεταλλοτεχνίτες.

#### Μεταλλουργική Έρευνα

Μια πρώτη παρατήρηση είναι, ότι οι χρησιμοποιηθέντες σιδερένιοι σύνδεσμοι είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς του Παρθενώνα και σε μήκος, αλλά και σε πλάτος.. Μια άλλη σημαντική διαφορά από τους άλλους ερευνηθέντας μέχρι σήμερα συνδέσμους είναι ότι οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις έδειξαν, ότι δεν υπάρχουν συγκολλήσεις ανάμεσα σε δύο απλά προς ένα διπλό ταφ. Είναι όλοι μονοκόμματοι και διαμορφωμένοι με εν θερμώ σφυρηλάτηση. Αυτή, πράγματι, είναι μια συγκεκριμένη διαφορά τεχνολογίας, που δεν απαντήθηκε σε κανένα σύνδεσμο της αρχαϊκής (ναός της Τραπεζιάς) και της κλασικής εποχής (ναοί της Ακρόπολης). Οι σύνδεσμοι όπως διεξήχθησαν από τους μαρμάρινους λίθους του ναού βρίσκονταν μέσα σε μόλυβδο. Παρατίθενται παρακάτω φωτογραφίες από τα αρχεία της Επιτροπής Συντήρησης του Ναού του Επικούρειου Απόλλωνα.(ΕΣΝΕΑ), με τους συνδέσμους όπως διεξήχθησαν από τους λίθους.



Εικόνα 3.1 Από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ, ο σύνδεσμος Α5 όταν διεξήχθη από τους μαρμάρινους λίθους του ναού



Εικόνα 3.2 Από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ, ο σύνδεσμος Β8 όταν διεξήχθη από τους μαρμάρινους λίθους του ναού



Εικόνα 3.3 Από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ, ο σύνδεσμος Β1 όταν διεξήχθη από τους μαρμάρινους λίθους του ναού



Εικόνα 3.4 Από τα αρχεία της ΕΣΝΕΑ, ο σύνδεσμος Β1 όταν διεξήχθησαν από τους μαρμάρινους λίθους του ναού



Εικόνα 3.4 Ο σύνδεσμος μεταξύ των λίθων



Εικόνα 3.5 Σύνδεσμος από λίθο

---

Η έρευνα περιλαμβάνει:

- 1) Μακροσκοπική εξέταση μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή με Nitral 10%, προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη κάποιας συγκόλλησης ή να συλλεχθεί οποιαδήποτε άλλη πληροφορία σχετικά με την τεχνολογία, που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους.
- 2) Με την ίδια διαδικασία της προετοιμασίας της επιφανείας έγιναν οι σκληρομετρήσεις σε ολόκληρη την επιφάνεια των δοκιμίων και διαπιστώθηκε βάσει πινάκων και η αντοχή τους σε εφελκυσμό.
- 3) Στη συνέχεια κόπηκαν από κάθε δοκίμιο δύο τεμάχια από κάθε σύνδεσμο, προκειμένου να γίνουν μεταλλογραφικές παρατηρήσεις. Μία προσπάθεια είναι να διαπιστωθεί, εάν πράγματι έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά επίπεδα φύλα σιδήρου ή χάλυβα (αναλόγως της χημικής σύνθεσής τους).
- 4) Στο τέλος της μελέτης καταγράφονται τα αποτελέσματα και εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα.
- 5) Χημική ανάλυση των συνδέσμων A5 και B19.
- 6) Σάρωση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για την παρατήρηση ακόμη περισσότερων λεπτομερειών.

## Μακροσκοπική μελέτη

Η μακροσκοπική μελέτη των συνδέσμων του ναού έγινε μετά από την κοπή τους σε δύο ίδια τμήματα στο κέντρο και τη λείανσή τους. Ακολούθησε χημική προσβολή με Nitral 10%, με σκοπό την αποκάλυψη της εσωτερικής μακροδομής, καθώς και του τρόπου κατασκευής τους. Αν και ήταν αναμενόμενη η εμφάνιση πέντε παρόμοιων μακροδομών δεδομένου ότι ανήκουν στην ίδια χρονολογία, στην ίδια περιοχή και είναι τμήματα ενός και μόνο ναού, τα δείγματα μας φανέρωσαν διαφορετικούς τρόπους κατασκευής για καθέναν από αυτούς. Τα συμπεράσματα του τρόπου μορφοποίησης για κάποιους από τους συνδέσμους δεν ήταν απόλυτα ξεκάθαρα, καθώς η μακροσκοπική παρατήρηση σε ορισμένες περιπτώσεις δεν ήταν αρκετή για τη διεξαγωγή τους.



---

Σε γενικές γραμμές εμφανίζονται και οι πέντε σύνδεσμοι ως αποτέλεσμα θέρμανσης και σφυρηλασίας. Φαίνεται πως ο καθένας από αυτούς μορφοποιήθηκε από ένα και μόνο τεμάχιο μετάλλου, κάτι που συμπεραίνεται μιας και η μακροσκοπική μελέτη έδειξε, ότι δεν υπάρχει συγκόλληση δύο ξεχωριστών ταφ σε ένα διπλό ταφ, όπως στην περίπτωση των σιδερένιων συνδέσμων των ναών Ακρόπολης και του ναού της Τραπεζιάς της υστεροαρχαϊκής εποχής. Ευδιάκριτοι είναι επίσης και οι μεγεθυμένοι κόκκοι σε όλους τους συνδέσμους, κάτι που αποδεικνύει την συνεχή αναθέρμανση και σφυρηλασία τους μέχρις ότου να λάβουν την τελική τους μορφή. Κανένα από τα ευρήματα της μακροδομής τους όμως δεν αποδεικνύει ένα συγκεκριμένο τρόπο σφυρηλασίας και μορφοποίησης. Επίσης φαίνεται πως η κατανομή του άνθρακα μέσα στο σίδηρο, καθώς και το ποσοστό του φαίνονται να είναι μάλλον τυχαία. Μάλλον, ο κάθε αρχαίος μεταλλοτεχνίτης θα μορφοποιούσε τους συνδέσμους με τον δικό του τρόπο, κάτι που θα δειχθεί στη συνέχεια.

Παρατηρώντας το σύνδεσμο A5 βλέπουμε ξεκάθαρα τα στρώματα της σφυρηλασίας, κάτι που είναι πιο φανερό λόγω των εγκλεισμάτων ανάμεσά τους. Ο αριθμός τους όμως δε δείχνει να είναι παντού ίδιος. Τα εγκλείσματα επίσης μας βοηθούν στην παρατήρηση της μορφοποίησης των άκρων του συνδέσμου.



Εικόνα 3.6. Ο σύνδεσμος A5 δείχνει μετά τη λείανση, στίλβωση και προσβολή με nital 10%, ότι δεν διαθέτει συγκόλληση, αλλά είναι ένα μονοκόμματο τεμάχιο μετάλλου, που έχει διαμορφωθεί σε διπλό ταφ. Κλίμακα σε cm



Εικόνα 3.7.Αριστερό ταφ του συνδέσμου A5



Εικόνα 3.8. Δεξιό ταφ του συνδέσμου A5 (λεπτομέρεια)

Το δεξί άκρο του φανερώνει πως το στέλεχος (κεντρικό τμήμα), έχει “ανοιχθεί” σε δύο κομμάτια, με καθένα από αυτά να καταλήγει το ένα από τη μία πλευρά και το άλλο από την άλλη. Πουθενά δεν φαίνονται στοιχεία αναδίπλωσης παρατηρώντας τις καταλήξεις στο δεξί άκρο. Το συμπέρασμα αυτό γίνεται πιο σίγουρο με την εμφάνιση της “κοιλιάς” στο σημείο που το στέλεχος ανοίγει.

Κατά παρόμοιο τρόπο φαίνεται να είναι διαμορφωμένος ο σύνδεσμος και από το άλλο άκρο του. Παρατηρείται και εδώ κοιλιά όχι τόσο έντονη. Δηλαδή πιθανότατα και αυτό το άκρο του δεν έχει γυριστεί ξανά προς τα μέσα.



Εικόνες 3.9, 3.10 .Αριστερό ταφ του συνδέσμου A5 και λεπτομέρεια κατάληξης του αριστερού ταφ

---

Η χαλύβδινη περιοχή ( με αρκετή περιεκτικότητα σε άνθρακα) είναι ευδιάκριτη σε κάποια σημεία όπου το χρώμα του συνδέσμου είναι μελανό. Δεν ακολουθεί όμως κάποια συγκεκριμένη μορφολογία όπως έχουμε δει με τους συνδέσμους του ναού του Παρθενώνα. Δεν υπάρχουν δηλαδή συγκεκριμένα στρώματα χάλυβα, ούτε εσωτερικά ούτε εξωτερικά του συνδέσμου.

Σε παρόμοιο τρόπο δείχνει να έχει σφυρηλατηθεί και ο σύνδεσμος B4. Τα εγκλείσματα είναι προφανή και εδώ και δείχνουν ότι το στέλεχος έχει ανοιχθεί τελικά σε δύο τεμάχια, αν παρατηρήσουμε το αριστερό άκρο του προς δημιουργία του ταφ.. Στο ίδιο ταφ επίσης βλέπουμε δύο ρωγμές, οι οποίες δημιουργούν την υποψία αναδίπλωσης, κάτι όμως που δεν είναι ευδιάκριτο, εφόσον οι καταλήξεις του άκρου δε δείχνουν κάτι τέτοιο. Η όλη δομή πάντως δείχνει, ότι ο σύνδεσμος B4, όπως και όλοι οι άλλοι έχουν κατασκευαστεί με τη σφυρηλάτηση σε υψηλές θερμοκρασίες (περίπου στους 1200° C) φύλλων σιδήρου.



Εικόνα 3.11. Δείχνει τον σύνδεσμο B4 μετά την λείανση, στίλβωση και προσβολή με nital 10%.Κλίμακα σε cm.



Εικόνες .3.12 , 3.13 Αριστερό ταφ του συνδέσμου B4 και λεπτομέρεια αριστερού ταφ B4

Όσον αφορά το δεξί άκρο του συνδέσμου, στο κέντρο του έχουμε αρκετά εγκλείσματα που με βάση τη μορφολογία τους φαίνεται ότι το στέλεχος και εδώ έχει διαμοιραστεί στα δύο άκρα του σε δύο τεμάχια, για τη δημιουργία του σχήματος ταφ. Παρόλα αυτά όμως οι καταλήξεις του άκρου αυτού δε δείχνουν εάν έχουν αυτά τα σημεία υποστεί αναδίπλωση. Τέλος σε αυτό το σύνδεσμο είναι λίγες οι εμφανείς επιμήκειες νησίδες με αυξημένο άνθρακα. Πιο έντονα διακρίνονται στις καταλήξεις του δεξιού ταφ του συνδέσμου.



Εικόνες 3.14, 3.15. Δεξιό ταφ του συνδέσμου B4 και λεπτομέρεια δεξιού ταφ B4

Οι διαμήκειες νησίδες του άνθρακα στο σύνδεσμο B8 είναι πολύ πιο έντονες σε σχέση με τους άλλους δύο συνδέσμους A5 και B4, αν και ούτε και σε αυτό το σύνδεσμο έδειχναν να σχηματίζουν μια συνεχή λωρίδα στο εξωτερικό του. Σε κάποια σημεία επίσης ο άνθρακας εμφανίζεται πολύ πιο έντονα. Οι επιμήκειες αυτές νησίδες

---

διακρίνονται περισσότερο στην επάνω εξωτερική πλευρά κατά μήκος ολόκληρου του συνδέσμου. Όπως διαπιστώθηκε και από τη σκληρομέτρηση, αυτό το τμήμα ήταν αρκετά σκληρό συγκριτικά με τον υπόλοιπο σύνδεσμο, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη χάλυβα πιο έντονα σε αυτά τα σημεία.



Εικόνα 3.16. Η προσβολή μετά την γνωστή ετοιμασία της επιφανείας τους συνδέσμου B8 και την προσβολή με το γνωστό αντιδραστήριο, έδειξε σαφώς, ότι αποτελείται από στρώσεις μαλακού σιδήρου και σκληρού χάλυβα. Κλίμακα σε cm

Τα εγκλείσματα στον B8 δεν είναι τόσο πολλά και ευδιάκριτα, κάτι που δεν επιτρέπει να δοθεί μια σίγουρη απάντηση όσον αφορά τον τρόπο σφυρηλασίας του προς δημιουργία των ταφ, ειδικά αναφερόμενοι για το αριστερό ταφ.



Εικόνα 3.17 Αριστερό ταφ του συνδέσμου B8.



Εικόνα 3.18 Λεπτομέρεια αριστερού ταφ B8. Ευδιάκριτη ανύψωση του ταφ στα αριστερά

---

Από τη μία πλευρά το άκρο αυτό είναι εμφανώς υπερυψωμένο και πιο κοντά στο στελέχος όπως βλέπουμε και στις φωτογραφίες παραπάνω. Αυτό δημιουργεί την υποψία πως ο σύνδεσμος έχει αναδιπλωθεί από αριστερά και στη συνέχεια γυρνάει και καταλήγει δεξιά. Σε αυτό το άκρο αξίζει να σημειωθεί πως δεν παρατηρείται η χαρακτηριστική “κοιλιά” όπως στα υπόλοιπα άκρα που είδαμε μέχρι εδώ. Συνεπώς οι υποψίες που έχουμε για αναδίπλωση είναι ακόμη πιο βάσιμες.

Αντίθετα όμως με το αριστερό, το δεξί ταφ του συνδέσμου δείχνει να έχει δημιουργηθεί με άνοιγμα του στελέχους σε δύο τμήματα, όπως ακριβώς και στους προηγούμενους συνδέσμους. Εδώ επιπλέον παρατηρείται, έστω και λιγότερο έντονα, η λεγόμενη “κοιλιά”.



Εικόνα 3.19 .Λεπτομέρεια: Αριστερό ταφ του συνδέσμου B8

Στο σύνδεσμο B9, που εμφανίζεται παρακάτω, διαπιστώνουμε πως τα εγκλείσματα λίγα πράγματα μας έδειξαν για τον τρόπο διαμόρφωσής του, εκτός φυσικά από το ότι πρόκειται για ένα σφυρηλατημένο σύνδεσμο. Ιδιαίτερα στα άκρα δεν μπορεί κανείς να πει με σιγουριά εάν είναι “ανοιγμένα” ή εάν έχουν διαμορφωθεί με αναδίπλωση, του ενός ή και των δύο από αυτά, από τη μία ή και από τις δύο πλευρές. Σημειώνεται όμως πως δεν παρατηρείται κοιλιά σε κανένα από τα δύο άκρα. Παρακάτω ακολουθεί η εικόνα του συνδέσμου B9 με σημειωμένες δύο περιοχές των ακραίων ταφ, που δείχνουν σα δύο βαθιές χαρακιές. Το εύρημα αυτό μας φανερώνει πως ο πιο πιθανός τρόπος διαμόρφωσης αυτού του συνδέσμου είναι η αναδίπλωση των άκρων του. Αυτό πιθανό να συνέβη για το κάθε κομμάτι από το κάθε ακραίο ταφ κάτι, το οποίο θα εξεταστεί κατά τη διάρκεια της μικροσκοπικής μελέτης του συνδέσμου. Τέλος δεν παρατηρείται κάποια περιοχή με πιο έντονη την εμφάνιση του άνθρακα.



Εικόνα 3.20. Ο σύνδεσμος B9 δείχνει μετά τη διαδικασία της λείανσης, στίλβωσης και προσβολής, ότι και πάλι υπάρχουν μεταλλικές στρώσεις σιδήρου και σκληρού σιδήρου, που θα μελετηθούν αργότερα. Κλίμακα σε cm.



Εικόνα 3.21. Αριστερό ταφ του B9



Εικόνα 3.22 Δεξί ταφ του B9

Μακροσκοπικά ο πιο πλούσιος σε άνθρακα σύνδεσμος φαίνεται να είναι ο B19. Είναι ο μόνος που δείχνει να έχει στο κέντρο του μια σχεδόν διαμήκη συνεχή λωρίδα σκληρού χάλυβα και μάλιστα τόσο έντονη. Ωστόσο, αυτό δε μας κάνει να πιστεύουμε πως διαμορφώθηκε σκόπιμα από τους τεχνίτες, μιας και αυτή τη μορφολογία δεν τη συναντήσαμε σε κανέναν από τους άλλους τέσσερεις συνδέσμους αυτού του ναού.





Εικόνα 3.23 Στον σύνδεσμο B19 φαίνεται καθαρά η ύπαρξη μιας στρώσης χάλυβα, που σημειώνεται με τα ενδεικτικά βέλη.

Τα εγκλείσματα του συνδέσμου B19, που παρατηρούνται είναι πολύ λιγότερα συγκριτικά με τους άλλους συνδέσμους, κάτι που δυσκολεύει αρκετά στην παρατήρηση των επιπέδων της εν θερμώ σφυρηλασίας του, συνεπώς και τη διεξαγωγή συμπεράσματος για τον τρόπο διαμόρφωσής του. Πιθανότατα το στέλεχος του να είναι και εδώ ανοιγμένο σε δύο τμήματα. Αυτό συμπεραίνεται από την εμφάνιση κοιλιάς στο αριστερό άκρο του, που όμως δεν είναι έντονη όπως στους προηγούμενους, καθώς και από την κατεύθυνση των εγκλεισμάτων κοντά στα άκρα του στελέχους.



Εικόνες 3.24 ,25 Αριστερό ταφ του συνδέσμου Β19.



Λεπτομέρεια αριστερού ταφ του Β19.



Εικόνα 3.26 .Δεξί ταφ του συνδέσμου Β19.

---

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Μετά την παραπάνω περιγραφή, συμπεραίνεται, ότι ο κάθε μεταλλοτεχνίτης κατασκεύαζε τους συνδέσμους, που είχε αναλάβει με τον δικό του τρόπο, τον πιο βολικό. Με άλλα λόγια δεν υπήρχαν ορισμένοι κανονισμοί ή προδιαγραφές, όπως αναφέρουμε σήμερα, τους οποίους όφειλε να ακολουθήσει. Αυτό ισχύει και για τους συνδέσμους άλλων ναών, όπως εκείνον της Τραπεζιάς. Μόνον στην περίπτωση του Παρθενώνα παρατηρούμε με βάση μιας μελέτης<sup>1</sup>, ότι εκεί η τεχνολογία στον τομέα των μεταλλουργικών κατασκευών ακολουθούσαν αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές. Μια άλλη παρατήρηση είναι, ότι στην περίπτωση του ναού της Τραπεζιάς, ο μεταλλοτεχνίτης χρησιμοποιούσε το σίδηρο, όπως ερχόταν από το χυτήριο. Γι' αυτό άλλοτε έχουμε καθαρό σίδηρο και άλλοτε παρατηρούμε νησίδες χάλυβα, δηλαδή κράμα σιδήρου και άνθρακα και τούτο δείχνει μια σοβαρή διαφορά ανάμεσα στην αρχαϊκή και κλασική περίοδο. Αντίθετα, στην περίπτωση του Επικούριου Απόλλωνα, ο χρησιμοποιηθείς σίδηρος δεν παρουσιάζει νησίδες χάλυβα, αλλά αποτελείται από στρώσεις σιδήρου, συγκολλημένες εν θερμώ με σφυρηλασία σε υψηλή θερμοκρασία ( περίπου 1200° C). Ακόμα και η περιοχή του χάλυβα είναι ενιαία σαν μια μελανή στρώση συγκολλημένη ανάμεσα σε μαλακές στρώσεις σιδήρου. Η παρατήρηση αυτή δείχνει, ότι η εφαρμοσθείσα τεχνολογία για την κατασκευή των συνδέσμων του Επικούριου Απόλλωνα συγκριτικά με εκείνη της αρχαϊκής εποχής είναι κατά πολύ ανώτερη.

---

## 3.2 ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ

### Σκληρότητα Rockwell

Η σκληρότητα των συνδέσμων προσδιορίστηκε από το βάθος διείσδυσης σφαίρας διαμέτρου 1,59 mm, λόγω της άσκησης φορτίου 100 kPa. Η σκληρότητα Rockwell χρησιμοποιεί πολλές κλίμακες. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η κλίμακα B, που είναι κατάλληλη για το σίδηρο και το μαλακό χάλυβα.

### Σχέση σκληρότητας-αντοχής στη θραύση

Η δοκιμή σκληρότητας μας επιτρέπει να εξετάσουμε την αντοχή στη θραύση του υλικού που μας ενδιαφέρει, καθώς και να προσδιορίσουμε το όριο ελαστικότητάς του. Συνεπώς αποτελεί μια μη καταστρεπτική δοκιμή που μας βοηθά στην πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς του μετάλλου, αλλά και την πλαστική συμπεριφορά του σε μια διεργασία της μεταλλοτεχνίας. Για ένα υλικό χωρίς ενδοτράχυνση ισχύει:

$$HV \approx 2.9 Re (1)$$

Για τους μαλακούς χάλυβες ισχύει:

$$HV \approx 3.06 Re (2),$$

όπου HV η σκληρότητα σε Vickers, και Re η αντοχή του υλικού σε  $kp/mm^2$ .

Η σκληρότητα που μετρήθηκε στους συνδέσμους είναι σε HRB. Η αντοχή υπολογίστηκε με βάση ένα πίνακα μετατροπής των σκληροτήτων από Rockwell B σε Vickers. Στη συνέχεια η σκληρότητα σε Vickers μετατράπηκε σε αντοχή μετρούμενη σε  $kp/mm^2$ , και στη συνέχεια σε  $N/mm^2$  ( $1kp=9,807$  Newton).

Ακολουθεί ένας πίνακας που προσδιορίζει το είδος του χάλυβα ανάλογα με την τιμή του σημείου διαρροής ή του ορίου θραύσης.(Μεταλλογνωσία 2, Γ.Δ. Παπαδημητρίου).

ΥΛΙΚΟ	ΣΗΜΕΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (Kp/mm <sup>2</sup> )	ΟΡΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (Kp/mm <sup>2</sup> )	ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ A%
Μαλακός σίδηρος	17	33	50
Χάλυβας C=0.13	18	38	44
Χάλυβας C=0.25	31	53	36
Χάλυβας C=0.53	60	94	11
Χάλυβας C=1.2	90	126	9

Πίνακας 3.1

### Σκληρομέτρηση του συνδέσμου A5

Η σκληρομέτρηση της επιφανείας του συνδέσμου A5, (όπως και όλων των άλλων συνδέσμων) έγινε με βάση την εικόνα , α) στις δύο κεφαλές του συνδέσμου ( α1-α2, γ1-γ2) και β) στο κυρίως στέλεχος του συνδέσμου. Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο A5 ήταν τα ακόλουθα:

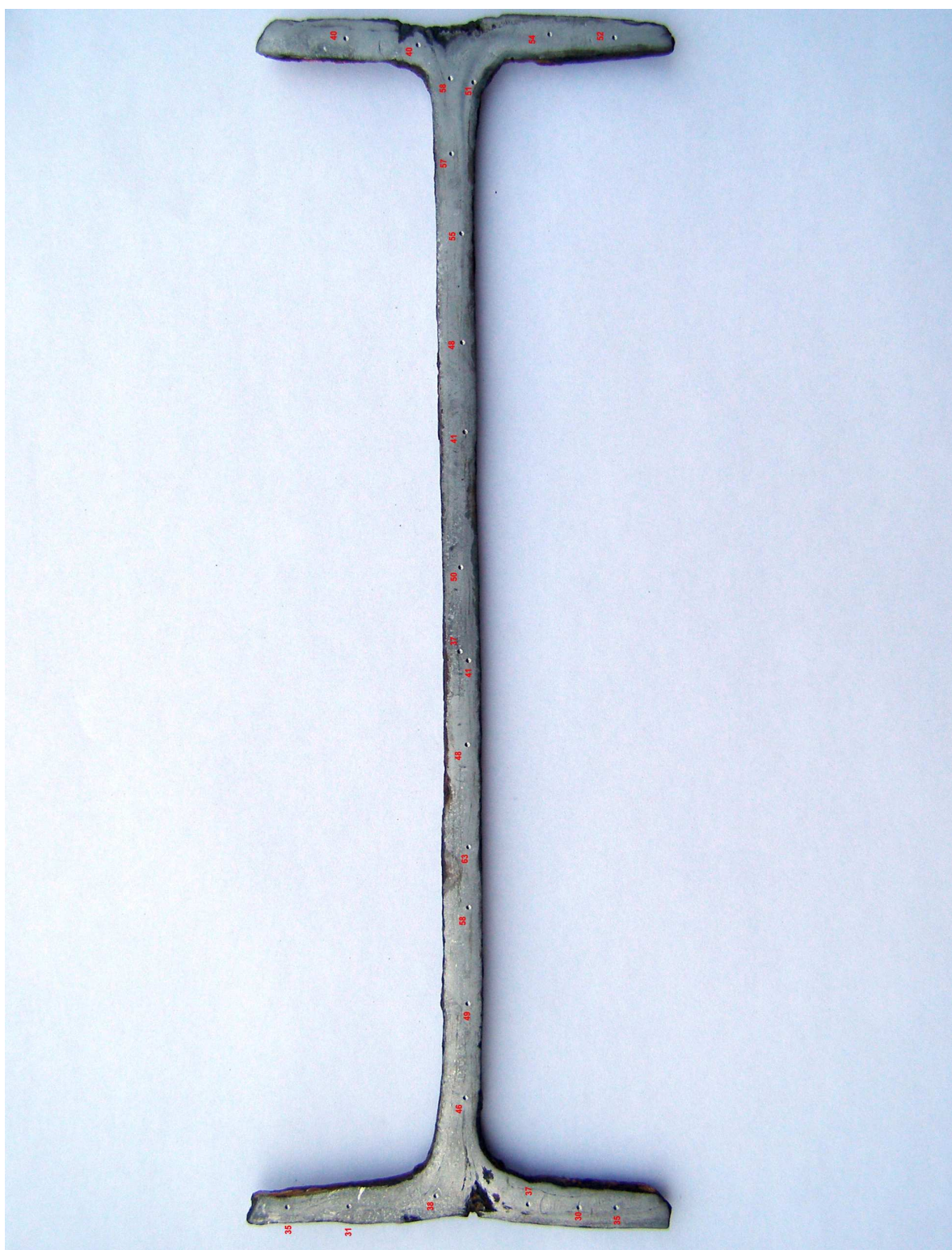
Άκρο α1.....: 35- 31- 38

Άκρο α2.....: 35- 30- 37

Άκρο γ1.....: 40- 40- 58

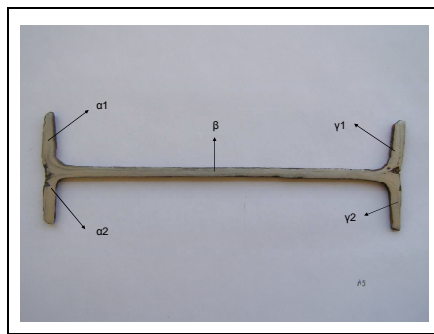
Άκρο γ2.....: 52- 54- 51

Κυρίως στέλεχος.....: 46- 49- 58- 63- 48- 41- 37- 50- 41- 48- 55- 57



Εικόνα 3.27. Ο σύνδεσμος A5- Σκληρομέτρηση

*Συμπέρασμα:* Γενικά, ο σύνδεσμος A5 είναι σύμφωνα με τις παραπάνω σκληρομετρήσεις ένας μαλακός σίδηρος, εφόσον η περιεκτικότητά του σε άνθρακα βρεθεί να είναι μικρότερη του 0.04%, ή μαλακός χάλυβας, εάν είναι πάνω από αυτό το όριο. (Οι διαφορές πιθανόν να οφείλονται στη χημική σύνθεση και στη μεταλλογραφική δομή, που θα μελετηθεί αργότερα).



Εικόνα 3.28. Θέσεις, όπου πραγματοποιήθηκαν οι σκληρομετρήσεις και ισχύει για όλους τους συνδέσμους.

Παρατηρούμε ότι η τιμή της σκληρότητας δεν είναι συγκεκριμένη κατά μήκος του συνδέσμου. Επίσης δεν παρατηρείται κάποια διαφορά στα T του συνδέσμου. Δηλαδή η σκληρότητά τους δεν είναι ούτε πιο υψηλή, αλλά ούτε και πιο χαμηλή συγκριτικά με το στέλεχος. Σε γενικές γραμμές κυμαίνονται από 30 έως 58 HRB, το οποίο αντιστοιχεί από 85-107 HV. Με βάση τον τύπο (2) για τους μαλακούς χάλυβες η αντοχή του συνδέσμου κυμαίνεται μεταξύ :

$$Re = HV/3,06 = 85/3,06 = 27,7 \text{kp/mm}^2.$$

$$\text{Έως και: } Re = HV/3,06 = 107/3,06 = 34,9 \text{kp/mm}^2.$$

Στη συνέχεια έχουμε  $27,7 * 9,807 = 271,6 \text{ N/mm}^2$  έως και  $34,9 * 9,807 = 342,2 \text{ N/mm}^2$ .

## Σκληρομέτρηση του συνδέσμου B4

Η σκληρομέτρηση της επιφανείας του συνδέσμου A5, με βάση την εικόνα 2, έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Άκρο α1.....: 62- 13- 18

Άκρο α2.....: 25- 32

Άκρο γ1.....: 47- 51- 32- 30- 33- 34- 52

---

Άκρο γ2.....: 34- 54- 26- 40

Κυρίως στέλεχος.....: 36- 50- 38- 38- 38- 35- 42- 46- 46- 51- 50- 45 43- 13-  
92- 48- 45- 14- 38



Εικόνα 3.29. Ο σύνδεσμος Β4- Σκληρομέτρηση



---

*Συμπέρασμα:* Οι μετρήσεις έδειξαν, ότι πρέπει να υπάρχουν μεγάλες τοπικές διακυμάνσεις ως προς τη σύνθεση του συνδέσμου. Επειδή οι διαστάσεις του είναι μικρές ως προς το πλάτος του θα υπάρξει δυσκολία στη πραγματοποίηση χημικής ανάλυσης στον φασματογράφο. Η μεταλλογραφική, ωστόσο, μελέτη στα διάφορα σημεία του στελέχους θα δείξει οπωσδήποτε τις διαφορές.

Ο σύνδεσμος B4 επίσης δεν έχει μεγάλη διαφορά στη σκληρότητα κατά μήκος του. Η πλειοψηφία των μετρήσεων κυμαίνονται από 25-52 HRB, με εξαίρεση λίγες πολύ χαμηλές και μία αρκετά υψηλή. Δηλαδή κυμαίνονται από 83-101 HV με αντοχή από 27-33kp/mm<sup>2</sup> ή από 264,7-323,6 N/mm<sup>2</sup>. Οι περισσότερες μετρήσεις μας υποδεικνύουν πως ο σύνδεσμός μας έχει λίγο άνθρακα και πιθανόν να ανήκει στην κατηγορία του μαλακού σιδήρου (Πίνακας 1). Τα νούμερα 13, 14 και 18 δεν αντιπροσωπεύουν τιμές σκληρότητας για τους χάλυβες, συνεπώς για τις τρεις αυτές μετρήσεις συμπεραίνουμε πως έχουμε μαλακό σίδηρο στα σημεία αυτά..

### Σκληρότητες του συνδέσμου B8

Άκρο α1.....: 50- 10- 77- 79- 69- 71- 35- 55

Άκρο α2.....: 50- 72- 80- 38- 71

Άκρο γ1.....: 72- 39- 55-30- 72

Άκρο γ2.....: 25- 33- 37- 12- 24- 48

Κυρίως στέλεχος.....: 47- 66- 38- 42- 64- 43- 55- 55- 58- 73- 21- 13- 69- 76-

57- 28- 69- 43- 42- 53- 58- 65- 77- 81- 42- 55- 41- 82-

62- 42.



Εικόνα 3.30. Ο σύνδεσμος Β8- Σκληρομέτρηση

---

*Συμπέρασμα:* Και αυτός ο σύνδεσμος δείχνει μεγάλες διαφορές σκληρότητας και βεβαιώνει, ότι αποτελείται από μεταλλικές στρώσεις σιδήρου και χάλυβα, που συγκολλήθηκαν με σφυρηλασία σε υψηλές θερμοκρασίες (1200° C). Η μεταλλογραφική μελέτη θα διαλευκάνει πολλές απορίες γύρω από αυτό το θέμα. Οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται μεταξύ 40 και 80 HRB, δηλαδή από 91 έως 152 HV. Διαιρώντας με το 3,06 η αντοχή κυμαίνεται από 30 έως 50 kp/mm<sup>2</sup> ή από 294,2-490 N/mm<sup>2</sup>. Αυτή η σκληρομέτρηση φανερώνει πως ο B8 είναι πιο σκληρός από τους A5 και B4.

### Σκληρομέτρηση του B9

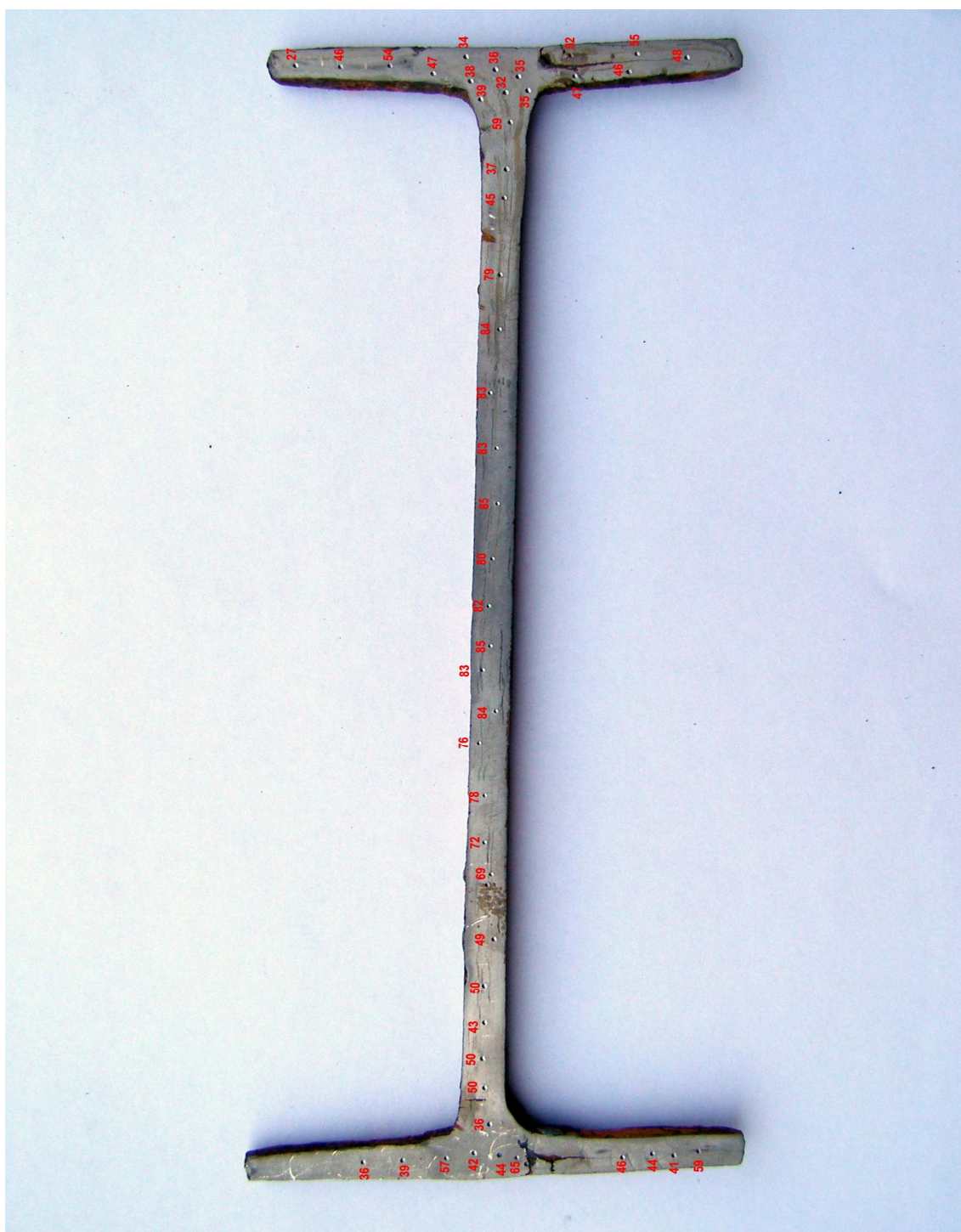
Άκρο α1.....: 36- 39- 57- 42- 44

Άκρο α2.....: 59- 41- 44- 46- 65

Άκρο γ1.....: 27- 46- 54- 47- 34- 38- 39- 32- 36

Άκρο γ2.....: 48- 46- 55—47- 52- 35- 35

Κυρίως στέλεχος.....: 36- 50- 50- 43- 50- 49- 69- 72- 78- 76- 84- 83-  
85- 82- 80- 85- 83- 83- 84- 79- 45- 37- 59



Εικόνα 3.31. Ο σύνδεσμος Β9- Σκληρομέτρηση

---

*Συμπέρασμα:* Κανονικά, οι παραπάνω μετρήσεις μας πληροφορούν, ότι θα έπρεπε στην μακροσκοπική εικόνα να δείχνει και μια στρώση χάλυβα, δηλαδή να υπάρχει μια μελανή στρώση, όπως δείχνει εικόνα του συνδέσμου B19. Η μεταλλογραφική εξέταση θα δείξει καλύτερα την πραγματική εικόνα. Η πλειοψηφία των μετρήσεων κυμαίνεται από 40 έως 85 HRB. Δηλαδή από 91 έως 172HV, που σημαίνει 30-56 kp/mm<sup>2</sup> ή 294,2-549 N/mm<sup>2</sup>.

### Σκληρομέτρηση του συνδέσμου B19

Άκρο α1.....: 62-73-67-92-91-96 Άκρο α2.....: 64-83-  
72-60-92

Άκρο γ1.....: 35-34-65-84

Άκρο γ2.....: 52-50-47-76-54

Κυρίως στέλεχος.....: 91-79-52-88-94-75-70-72-71-59-52-72-79-89-60-91-59-  
85-78-81-84



Εικόνα 3.32. Ο σύνδεσμος B19- Σκληρομέτρηση

---

*Συμπέρασμα:* Το κύριο στέλεχος έδειξε μια σχετική ομοιομορφία ως προς το σκληρό τμήμα του, προφανώς, γιατί το πλάτος του ανάγκασε να γίνουν οι μετρήσεις ακριβώς στη μελανή στρώση, πλούσια σε άνθρακα, δηλαδή στη χαλύβδινη περιοχή (. Η χημική και μεταλλογραφική εξέταση του συνδέσμου θα μας δώσει περισσότερες πληροφορίες). Οι περισσότερες από τις μετρήσεις κυμαίνονται από 45 έως 90 HRB, δηλαδή από 95 έως 192 HV ή 31-62.7 kp/mm<sup>2</sup> ή 304-615 N/mm<sup>2</sup>. Φαίνεται να είναι ο πιο σκληρός σύνδεσμος από όλους, κάτι που φάνηκε και από τη μακροσκοπική παρατήρησή του.

### 3.3 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Με το πέρας όλων των σκληρομετρήσεων ακολούθησε εκ νέου λείανση και στίλβωση του κάθε άκρου για κάθε σύνδεσμο ξεχωριστά, με σκοπό την περαιτέρω εξέτασή τους στο οπτικό μικροσκόπιο. Η κοπή των άκρων έγινε από τη στιγμή που η στίλβωση ολόκληρου των συνδέσμων ήταν αδύνατη λόγω του μεγάλου μεγέθους τους. Συνεπώς έπρεπε να επιλεγθούν κάποια τμήματά τους και να κοπούν. Αποφασίστηκε ότι τα πιο αντιπροσωπευτικά τμήματα του κάθε συνδέσμου είναι τα άκρα του, μιας και εκτός από στοιχεία της μικροδομής που αναμένουμε να εξετάσουμε, ίσως αυτά μας φανερώσουν τον ακριβή τρόπο διαμόρφωσής τους κατά τη σφυρηλασία, μελετώντας τον προσανατολισμό των κόκκων, (εάν υφίσταται) καθώς και την κατεύθυνση των επιπέδων της σφυρηλασίας. Μετά τη στίλβωση ακολούθησε χημική προσβολή με Nital 2%.

#### Σύνδεσμος A5

Με βάση τις παρατηρήσεις στο οπτικό μικροσκόπιο, ο σύνδεσμος στις περισσότερες περιοχές του είναι φερριτικός. Το αριστερό τμήμα του άκρου T1 δείχνει να έχει μόνο φερρίτη. Στο δεξί τμήμα του άκρου διακρίνουμε σε κάποια σημεία περλίτη στα όρια των κόκκων του φερρίτη. Αν και το άκρο T1 είναι κατά βάση φερρίτης, παρατηρούμε έντονη ανομοιογένεια ως προς το μέγεθος των κόκκων του. Η διαφορά του μεγέθους των κρυσταλλιτών οφείλεται στην εν θερμώ σφυρηλασία του συνδέσμου. Όταν ο τεχνίτης το άφηνε να κρυώσει αργά το αποτέλεσμα ήταν η διόγκωση των κόκκων, αντίθετα η λεπτόκοκκη σύσταση φανερώνει την απότομη ψύξη του συνδέσμου σε εκείνο το σημείο. Στο άλλο άκρο T2 του ίδιου συνδέσμου, η μοναδική δομή που διακρίνεται είναι ο φερρίτης. Καρβίδια δε διακρίνονται πουθενά, και η μόνη ανομοιογένεια είναι το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη, οι οποίοι σε ορισμένα σημεία είναι αρκετά μεγάλοι.

Εκτός από τη μικροδομή του συνδέσμου η εξέτασή του στο οπτικό μικροσκόπιο απέδειξε την παραδοχή που είχε γίνει κατά τη μακροσκοπική εξέτασή του, ότι ο σύνδεσμος έχει ανοιχθεί κατά τη θερμή σφυρηλασία του. Παρατίθεται στη συνέχεια φωτογραφικό υλικό από την εξέταση των άκρων στο οπτικό μικροσκόπιο.



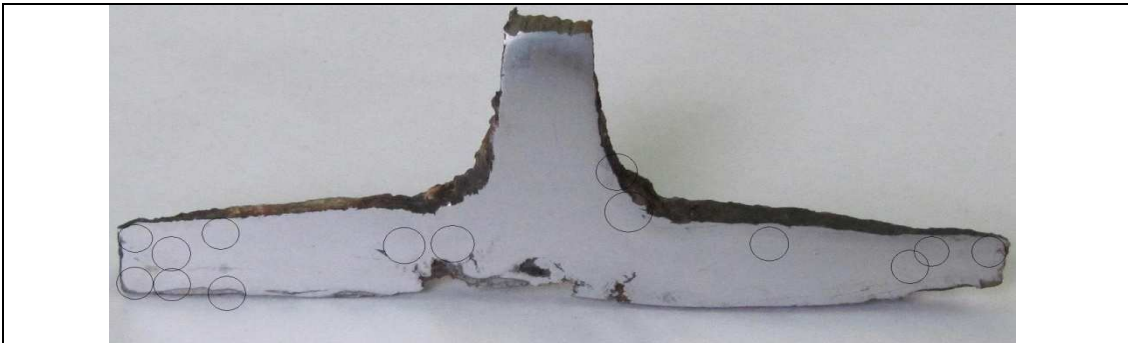
ΑΚΡΟ Τ1



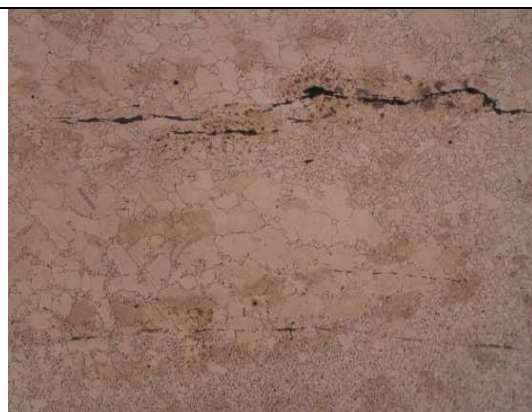
3.33 Ισαξονικοί κόκκοι φερρίτη.(x50)



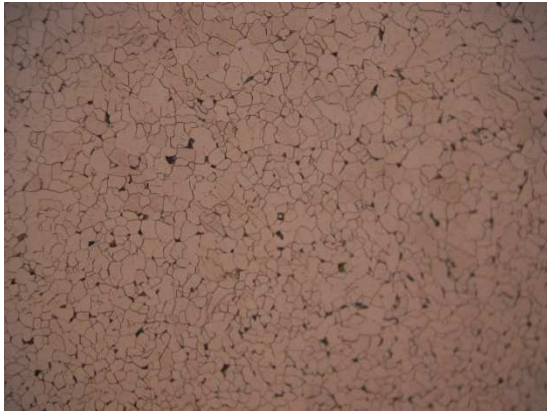
3.34 Φερρίτης στο άκρο. Φανερά κάποια εγκλείσματα.(x50)



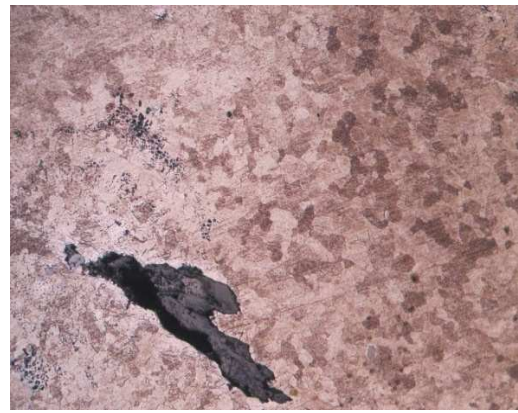
3.35: Φερρίτης(x50)



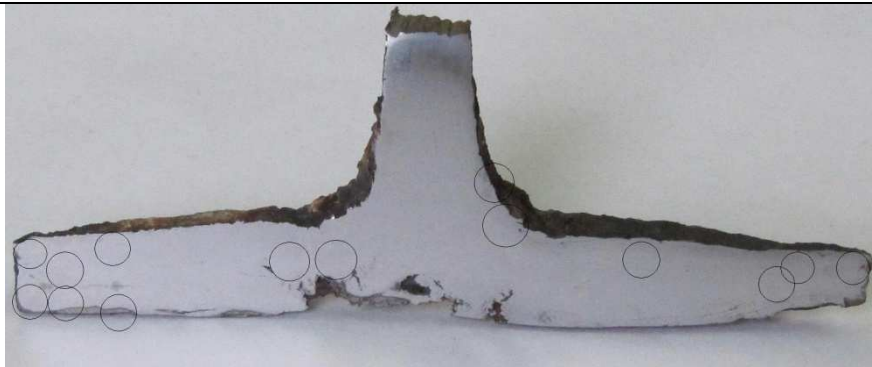
3.36: Φανερά διακρίνουμε τη διαφορά μεγέθους των κόκκων του φερρίτη. Επίσης είναι ορατά τα επίπεδα της σφυρηλασίας. Η διαμήκης γραμμή είναι το όριο της αυτογενούς συγκόλλησης του σιδήρου κατά τη σφυρηλασία του εν θερμό. Οι μαύρες κουκκίδες είναι εγκλείσματα.(x50)



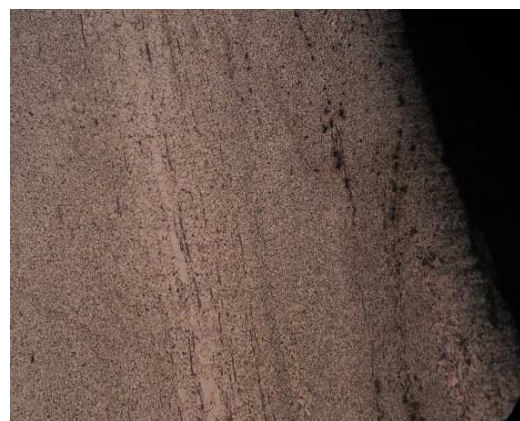
3.37 Λίγος περλίτης στα περατωτικά άκρα του φερρίτη.(x200)



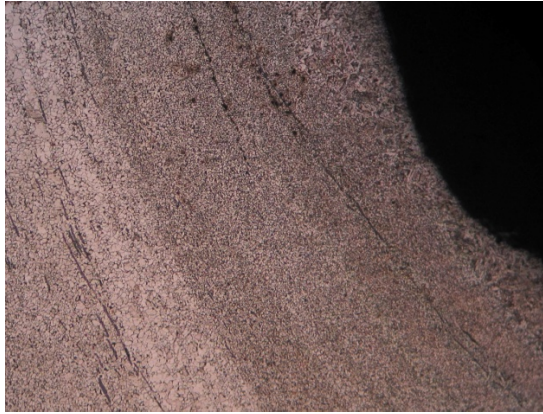
3.38 Φερρίτης και οξειδία από τη σφυρηλασία.(x50)



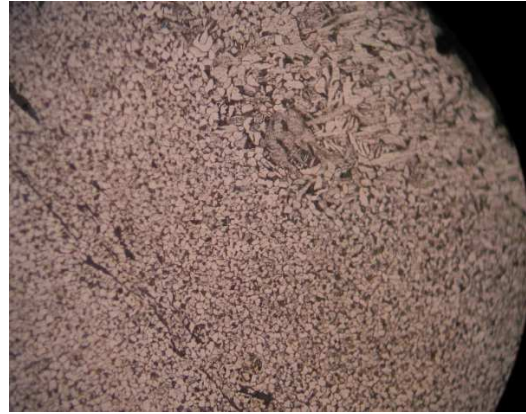
3.39 Ανομοιογένεια του μεγέθους των κόκκων του φερρίτη.(x50)



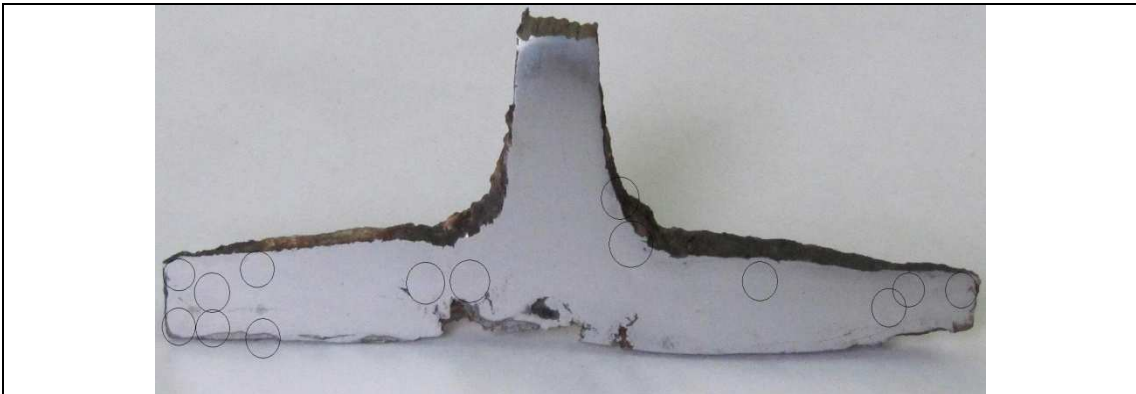
3.40 Στο λαιμό του άκρου παρατηρούμε φερρίτη με λίγο περλίτη. Ευδιάκριτα είναι τα πολλά στρώματα της σφυρηλασίας.(x50)



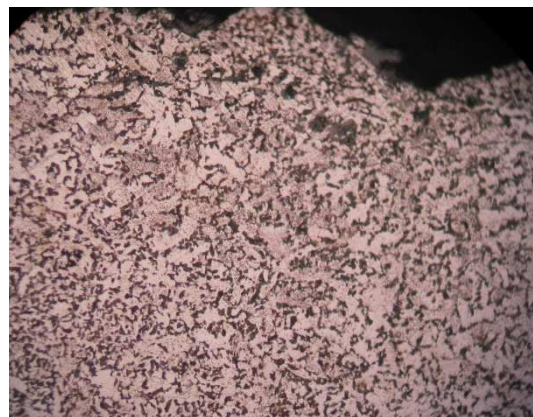
3.41.: Φαίνεται η διαμόρφωση που έχει υποστεί ο σύνδεσμος κατά τη θερμή σφυρηλασία. Ο σύνδεσμος είναι ανοιγμένος και δεν έχει αναδιπλωθεί κάτι που φαινόταν και από τη μακροπροσβολή του.(x50)



3.42: Με μεγαλύτερη μεγέθυνση η 2415 φανερώνει μια λεπτοκρυσταλλική δομή φερρίτη περλίτη. Στην άκρη παρατηρούνται διογκωμένοι κρύσταλλοι.(200)

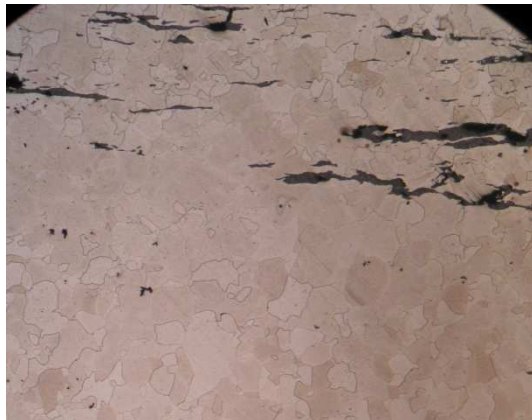


3.43: Όσο ανεβαίνω στο δεξί τμήμα του άκρου παρατηρώ ότι το ποσοστό του περλίτη συγκριτικά με το φερρίτη αυξάνεται.(x50)

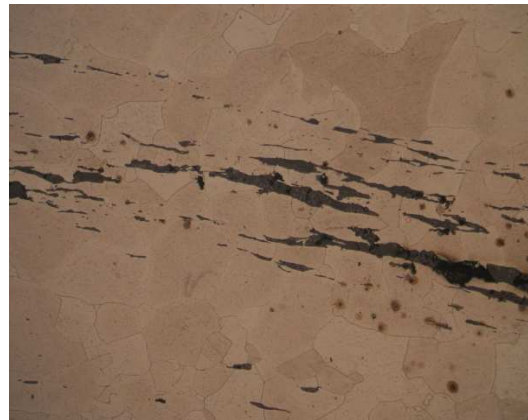


3.44: Περλίτης- φερρίτης.(200)

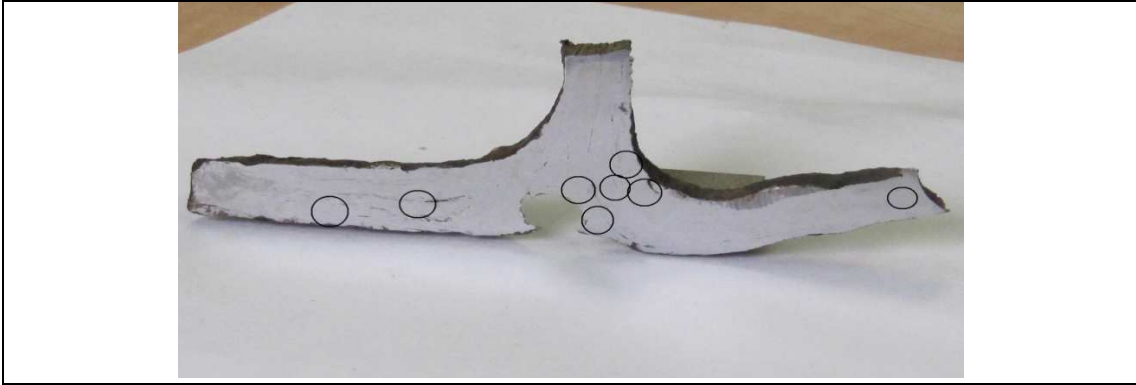
## ΑΚΡΟ Τ2



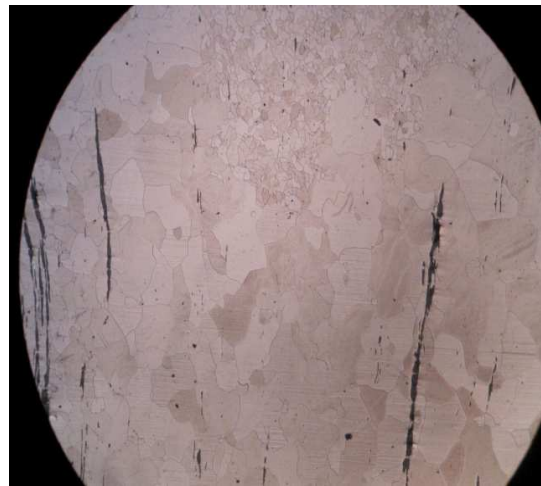
3.47: Φερρίτης, αρκετά οξειδία και εμφανείς οι στρώσεις της σφυρηλασίας.(x50)



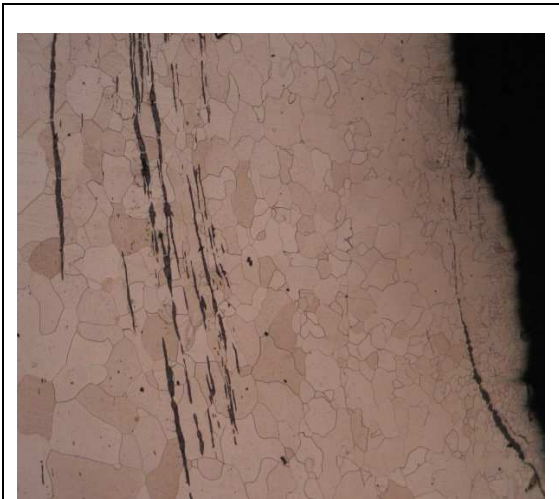
3.48: Φερρίτης(x100)



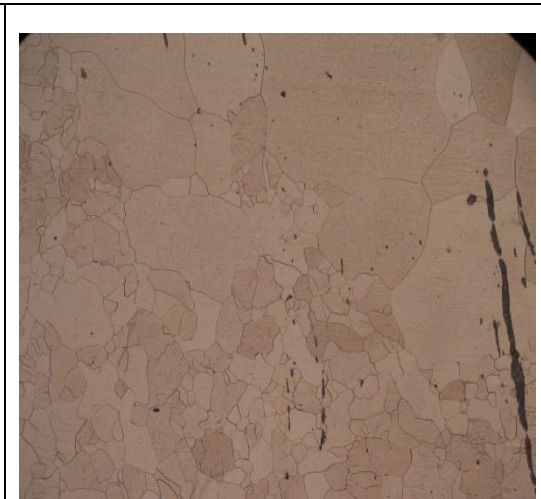
3.49: Ισαξονικοί κόκκοι φερρίτη.(x50)



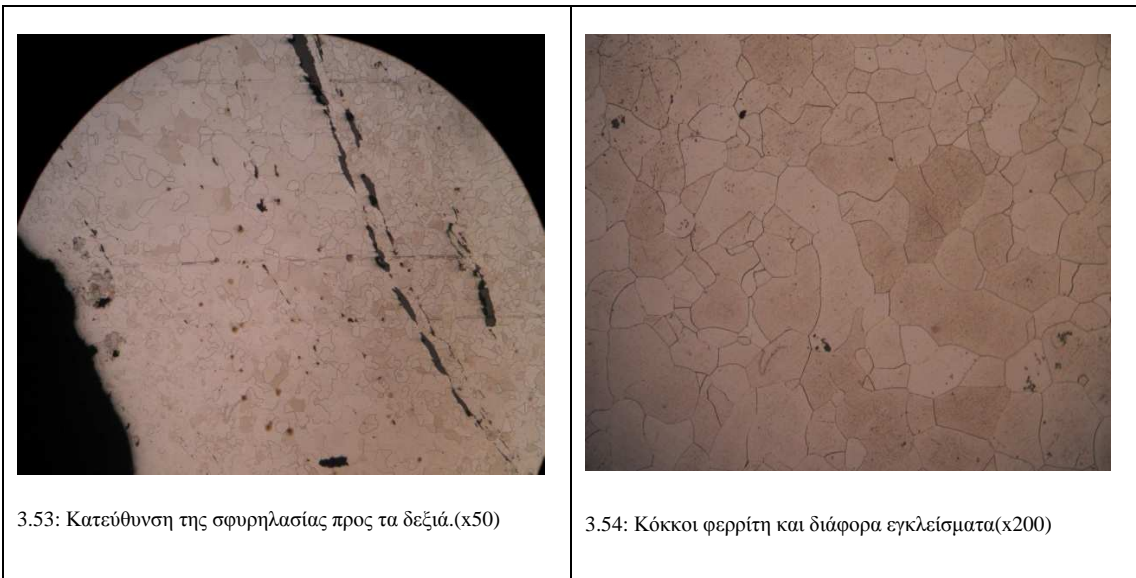
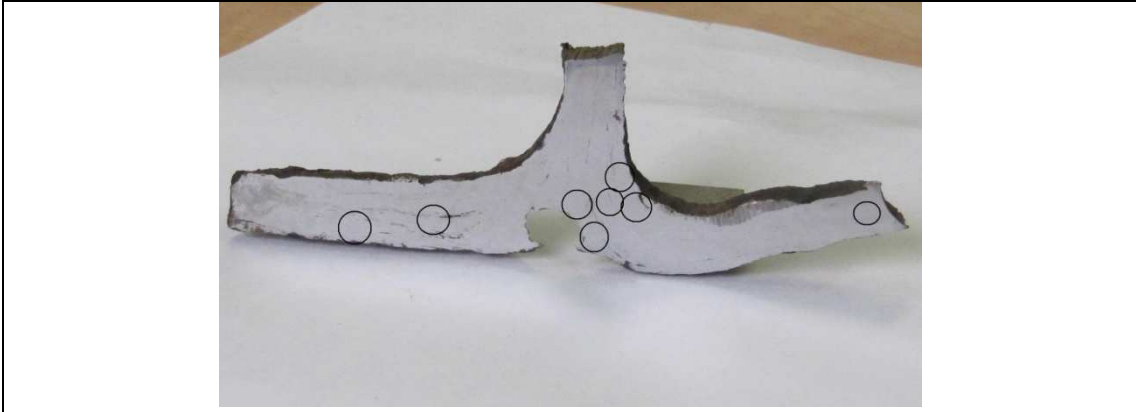
3.50: Ανομοιογένεια στο μέγεθος των κόκκων του φερρίτη. Επίσης φανερώνεται η διαμόρφωση του άκρου, με τα μισά στρώματα να ανοίγουν από τη μια κατεύθυνση και τα άλλα μισά από την άλλη.(x50)



3.51: Φερρίτης και στρώματα της σφυρηλασίας στο λαιμό του άκρου.(x50)



3.52: Μεγάλο μέγεθος κόκκων φερρίτη.(x50)



3.53: Κατεύθυνση της σφυρηλασίας προς τα δεξιά.(x50)

3.54: Κόκκοι φερρίτη και διάφορα εγκλείσματα(x200)

## Σύνδεσμος B4

Από την παρατήρηση αυτού του συνδέσμου στο οπτικό μικροσκόπιο, συμπεράθηκε ότι εμφανίζονται οι εξής μικροδομές: φερρίτης, περλίτης, σορμπίτης (όπου δεν πρόλαβε ο περλίτης να σχηματισθεί) και τέλος η ειδική κατηγορία του φερρίτη Widmanstätten. Αν και η μακροπροσβολή έδειχνε έναν κατά βάση φερριτικό σύνδεσμο, όπως ήταν ο A5, ωστόσο το οπτικό μικροσκόπιο δεν έδειχνε κάτι τέτοιο. Με βάση τις μικροδομές που αναφέρθηκαν συμπεραίνουμε πως ο σύνδεσμος αυτός περιέχει χάλυβα. Το άκρο T1 στο αριστερό τμήμα του είναι φερριτοπερλιτικό σε γενικές γραμμές. Το αριστερό τμήμα του ίδιου άκρου είναι κάτω φερριτικό και καθώς ανεβαίνουμε προς τα πάνω αυξάνει ο άνθρακας σχηματίζοντας περλίτη και φερρίτη Widmanstätten.

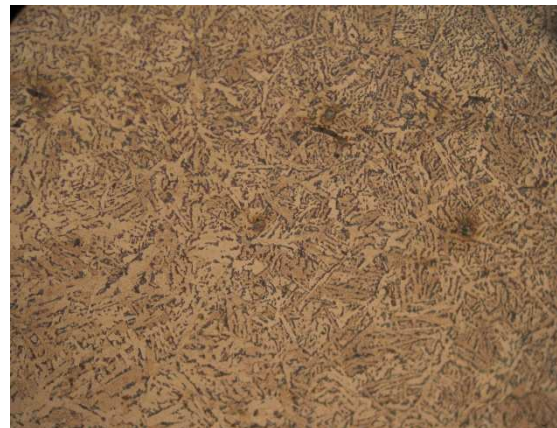
Ως προς τον τρόπο της διαμόρφωσής του, που κατά τη μακροπροσβολή δεν ήταν ιδιαίτερα εμφανής, είναι και αυτός ο σύνδεσμος ανοιγμένος. Δηλαδή κάποια στρώματα καταλήγουν από τη μία πλευρά και κάποια άλλα από την άλλη.

Παρατίθεται φωτογραφικό υλικό από την εξέτασή του στο οπτικό μικροσκόπιο.

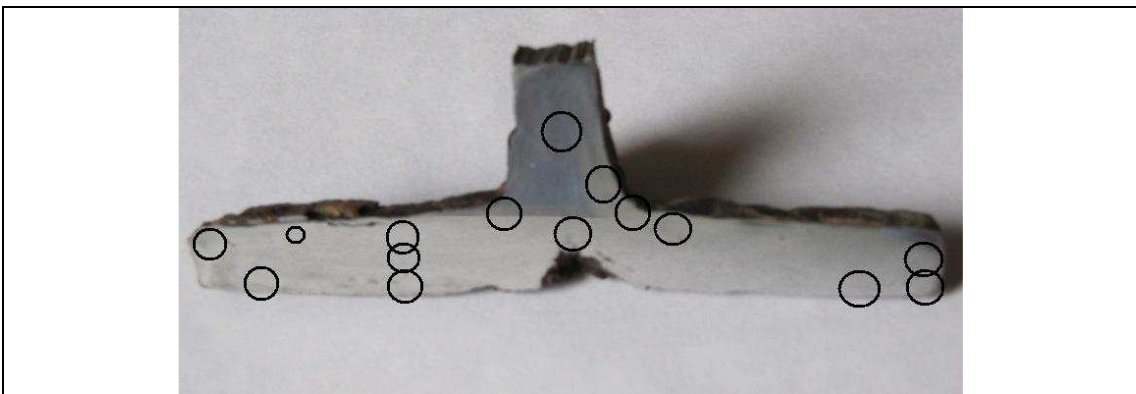
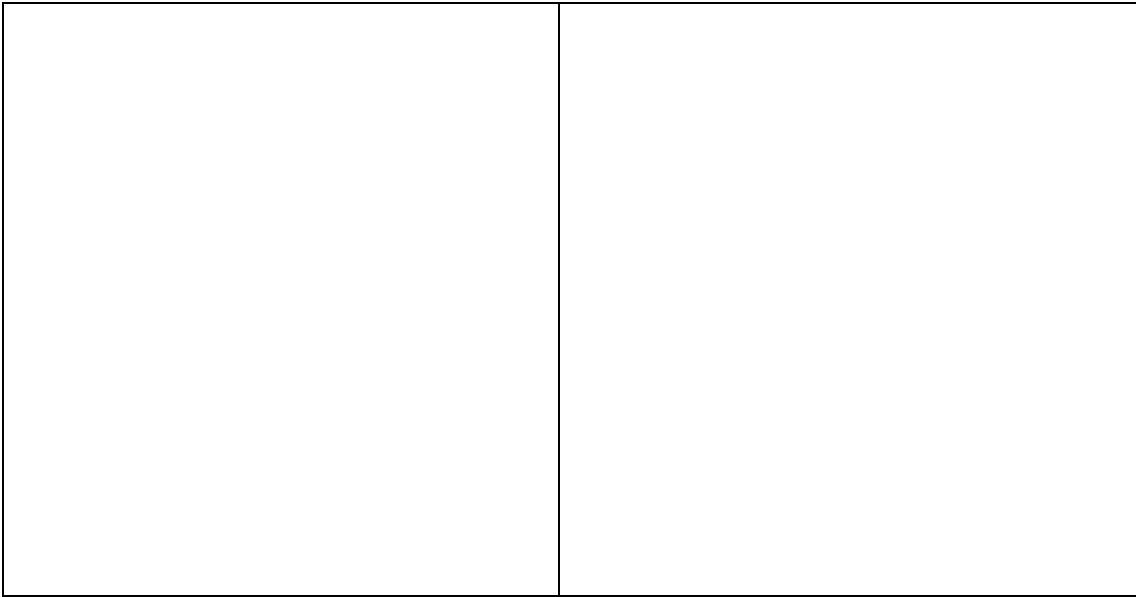
## ΑΚΡΟ Τ1


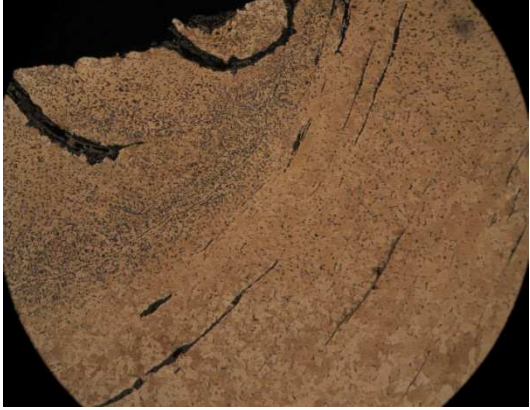


3.55: Περλίτης στα περατωτικά άκρα του φερρίτη.(x50)



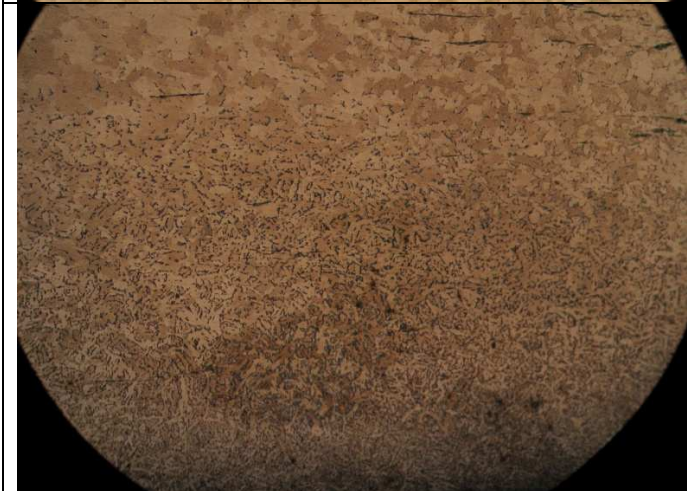


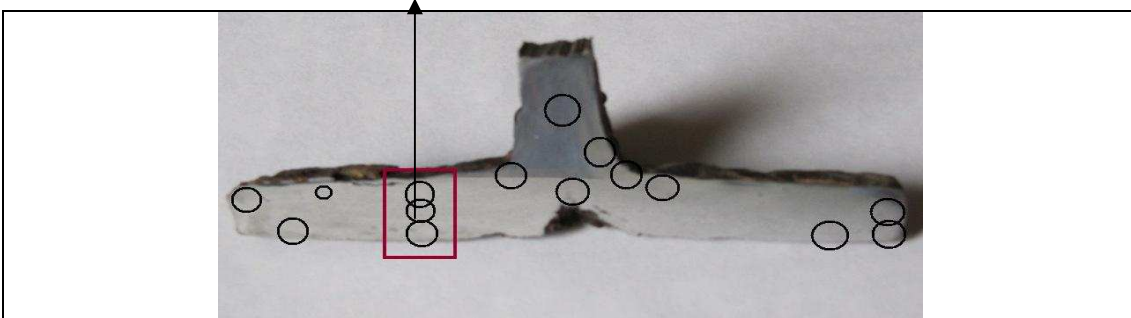
3.56: Φερρίτης περλίτης και φερρίτης Widmanstätten (η βελονοειδής μορφή).(x100)



 <p>3.57: Μεγάλοι κόκκοι φερρίτη και περλίτης στην κάτω μεριά.(x200)</p>	 <p>3.58: Στο λαιμό του άκρου παρατηρείται φερριτοπερλιτική δομή, καθώς επίσης διακρίνονται τα στρώματα της σφυρηλασίας που δείχνουν ότι ο σύνδεσμος έχει ανοιχθεί.(x50)</p>
---	--



	<p>3.59: Φερρίτης και περλίτης, ο οποίος συναντάται σε διαφορετικά ποσοστά εδώ. Επάνω είναι πιο υψηλό το ποσοστό.(x50)</p>
	<p>3.60: Εδώ συναντούμε φερρίτη, περλίτη, και σορμπίτη. Ο σορμπίτης εμφανίζεται όπου δεν πρόλαβε ο περλίτης να αναπτυχθεί και να σχηματίσει τη γνωστή πλακοειδή μορφή του. Έτσι σχηματίστηκε ο σορμπίτης που διαθέτει κοκκώδη μορφή.(x50)</p>
	<p>3.61: Περλίτης που συναντάται εντονότερα στην εξωτερική πλευρά του συνδέσμου και φερρίτης.(x50)</p>

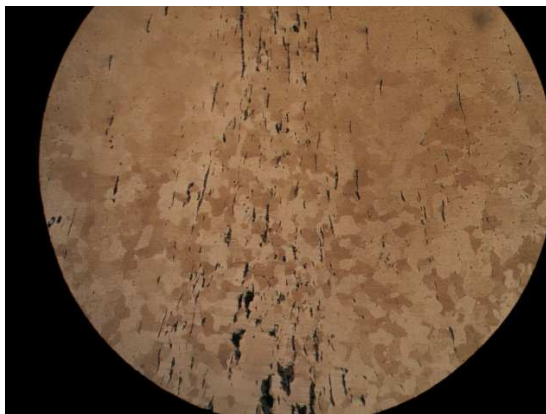
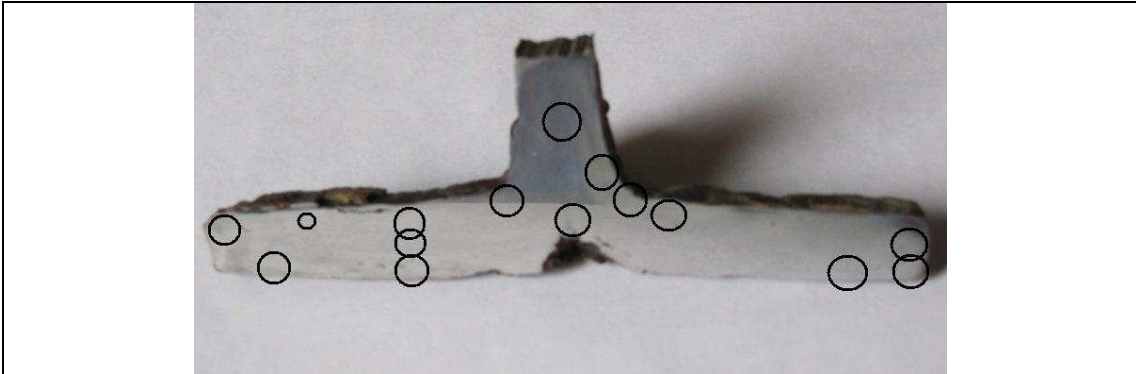




3.62: Φερριτοπερλιτική δομή.(x50)



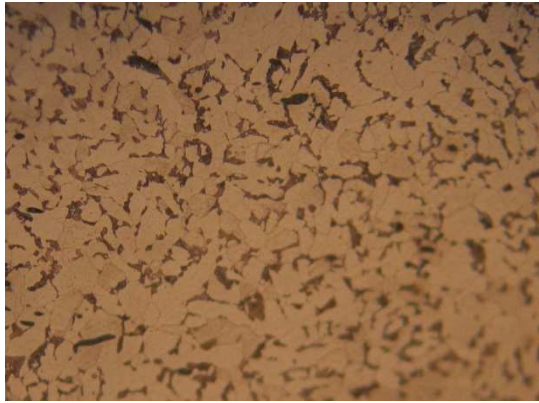
3.63: Η συγκόλληση πολλών στρωμάτων στο στέλεχος. Παρατηρείται μεγάλη διαφορά από την 2331 που είναι διπλά και όμως διαθέτει πολύ περισσότερο άνθρακα.(x50)



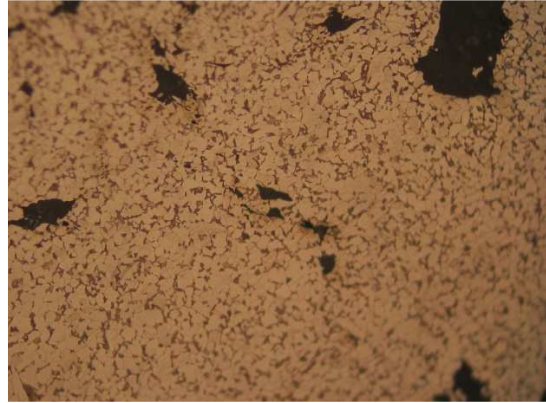
3.64: Εδώ βλέπουμε το φερρίτη και ταυτόχρονα τα στρώματα της σφυρηλασίας, να στρίβουν από τη μια και από την άλλη πλευρά. Βρισκόμαστε στην άκρη του συνδέσμου.(x50)



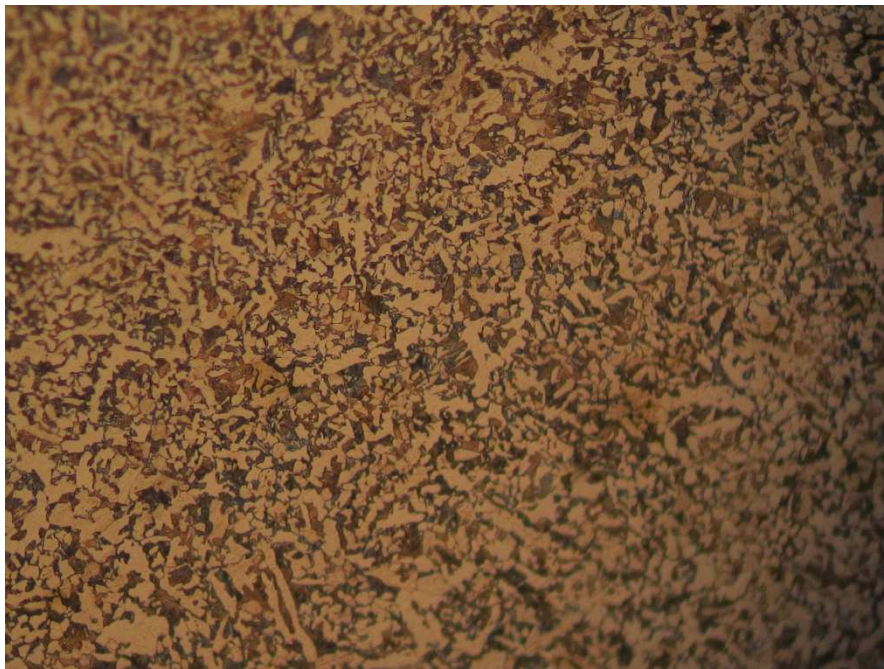
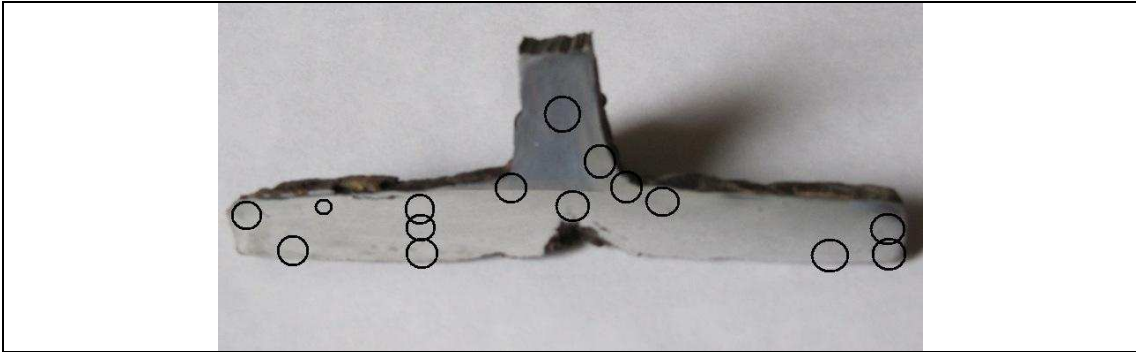
3.65: Φερρίτης-περλίτης.(x50)



3.66: Φερρίτης- περλίτης.(x200)



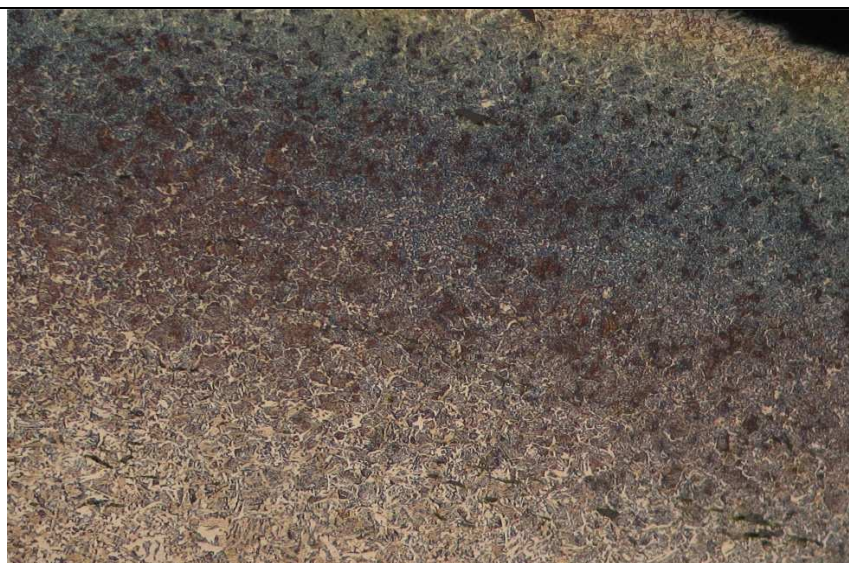
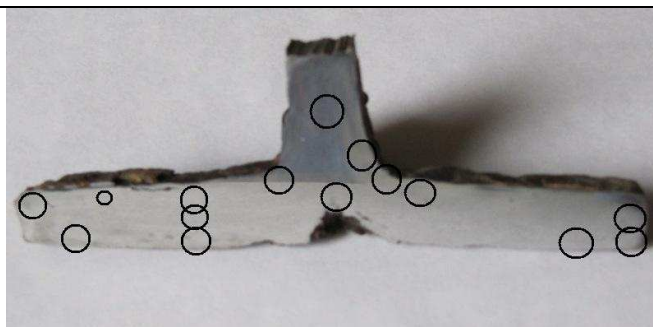
3.67: Φερρίτης περλίτης στην άκρη του συνδέσμου.(x200)



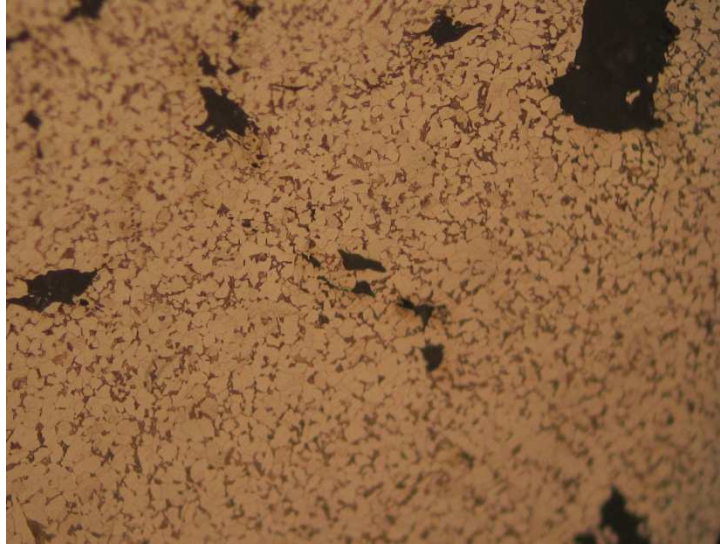
3.68: Φερρίτης περλίτης και σορμπίτης.(x200)



3.69: Παρατηρείται έντονα η παρουσία του άνθρακα, όπου εμφανίζεται με τη μορφή του σορμπίτη και όχι του περλίτη μαζί με φερρίτη. Αυτό ισχύει γιατί ο σορμπίτης εμφανίζεται με ανάγλυφη κοκκώδη δομή και όχι υπό τη μορφή στρωμάτων.(x50)



3.70: Στο ψηλότερο σημείο βλέπουμε σορμπίτη με φερρίτη και κατεβαίνοντας προς τα κάτω συναντούμε τη βελονοειδή μορφή του φερρίτη Widmanstätten.(x50)



3.71: Φερρίτης περλίτης στην άκρη του συνδέσμου.(x200)

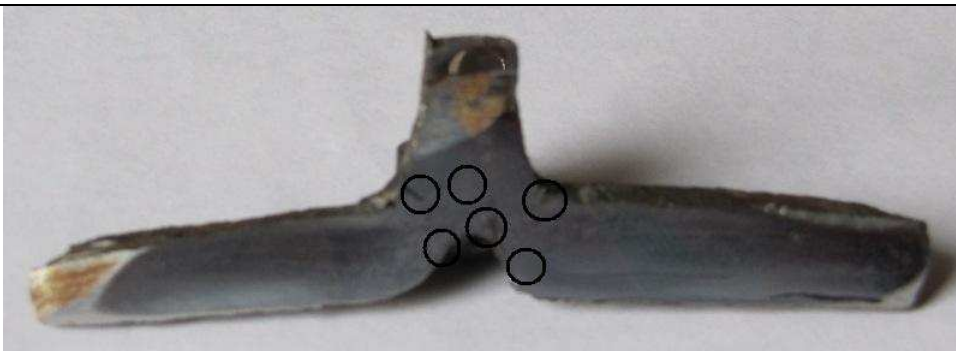
## ΑΚΡΟ Τ2



3.72: Στο λαιμό του συνδέσμου παρατηρείται φερριτοπερλιτική δομή και η κατεύθυνση των στρωμάτων της σφυρηλασίας.(x50)

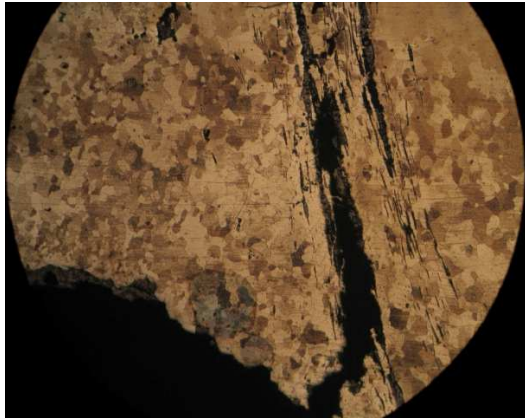


3.73: Φαίνεται προχωρημένη διάβρωση μεταξύ των στρωμάτων της σφυρηλασίας. Η δομή είναι φερριτοπερλιτική.(x50)

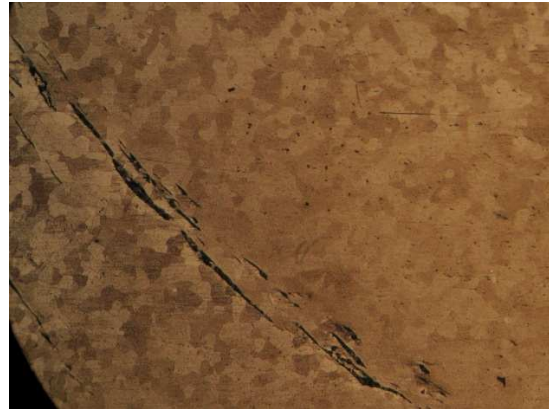




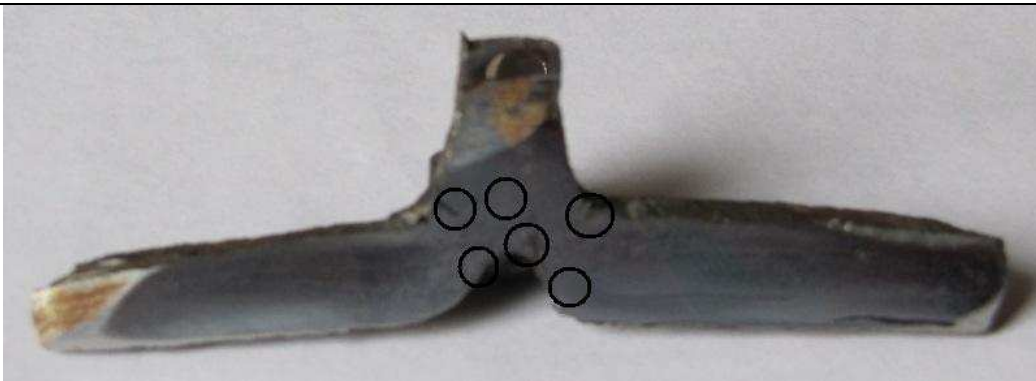
3.74: Εξωτερικά βλέπουμε λίγο περλίτη στα όρια των κόκκων του φερρίτη και καθώς προχωρούμε στο εσωτερικό του συνδέσμου έχουμε μόνο φερρίτη.

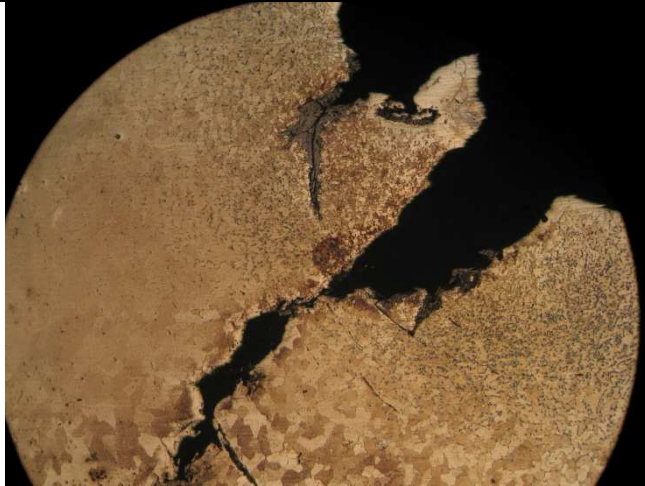


3.75: Φερρίτης και εμφάνιση διάβρωσης που έχει εισχωρήσει στη συγκόλληση των φύλλων της σφυρηλασίας.(x50)



3.76: Φερρίτης μαζί με λίγα οξειδία.(x50)





3.77: Στην άλλη πλευρά του λαμιού παρατηρείται επίσης έντονη διάβρωση, και φερριτοπερλιτική δομή.

## Σύνδεσμος B8

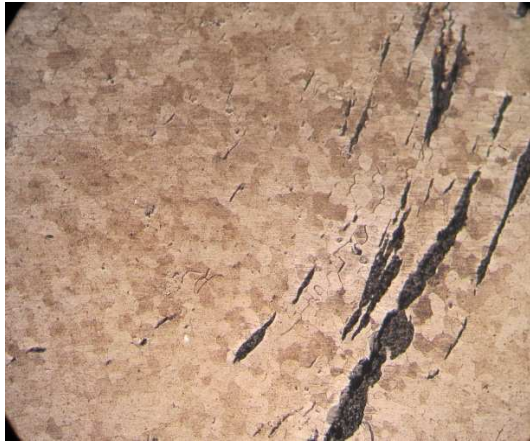
Η παρατήρηση του συνδέσμου B8 μας φανέρωσε πως το άκρο T1 είναι φερριτικό από την αριστερή πλευρά του και όχι ιδιαίτερα λεπτόκοκκο. Αντίθετα η δεξιά πλευρά του εμφανίζει φερρίτη με περλίτη και η δομή είναι αρκετά λεπτοκρυσταλλική.

Το άκρο T2 από τη δεξιά πλευρά του φαίνεται να είναι μόνο φερριτικό. Παρατηρούνται τόσο μεγάλοι κρύσταλλοι φερρίτη που κάποιοι φαίνονταν και με γυμνό μάτι, καθώς έφταναν τα δύο περίπου χιλιοστά. Στην αριστερή πλευρά του άκρου T2, το άνω τμήμα παρουσιάζει φερρίτη περλίτη, καθώς κατεβαίνουμε βλέπουμε φερρίτη με λίγο περλίτη στα όρια των κόκκων και στην άκρη μόνο φερρίτη.

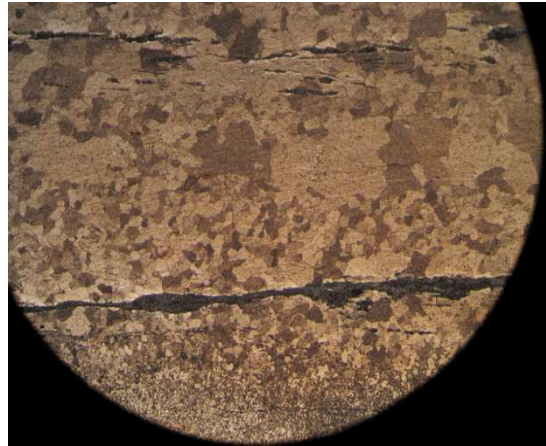
Όσον αφορά τη διαμόρφωσή του, η μακροσκοπική εξέταση του συνδέσμου μας έδειχνε πως πιθανώς το άκρο T1 να έχει υποστεί αναδίπλωση, ενώ για το άκρο T2 δεν φαινόταν κάτι τέτοιο. Η παρατήρηση του συνδέσμου στο οπτικό μικροσκόπιο μας έδειξε πως αντίθετα με την αρχική μας υπόθεση, ο σύνδεσμος B8 είναι και αυτός ανοιγμένος με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε ακριβώς και για τους προηγούμενους.



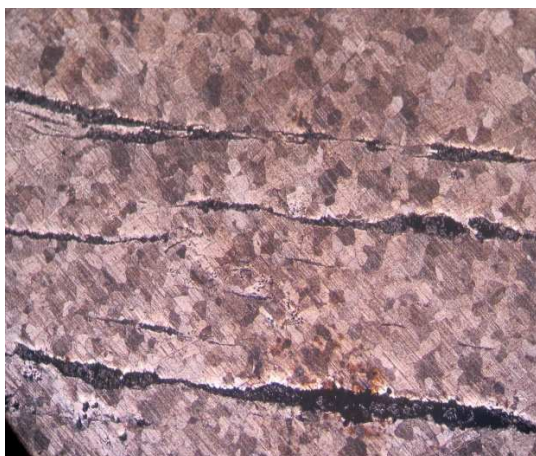
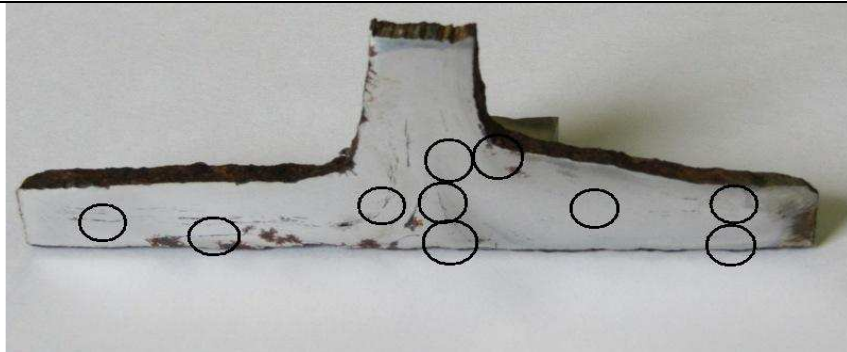
## ΑΚΡΟ Τ1



3.78: Φερρίτης με αρκετά εγκλείσματα, με προσανατολισμό που προδίδουν το άνοιγμα των φύλλων της σφρηλασίας. (x50)



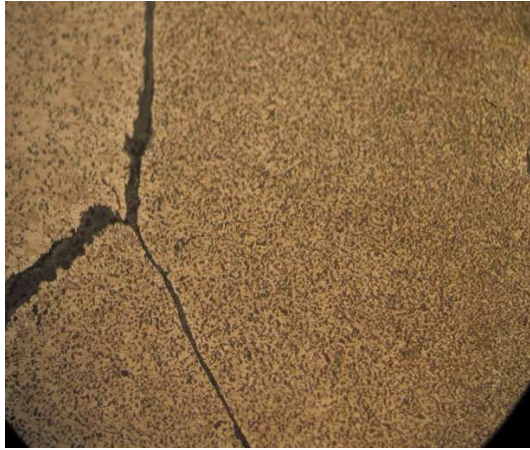
3.79: Φερρίτης αλλού λεπτοκρυσταλλικός, αλλού χονδροκρυσταλλικός. (x50)



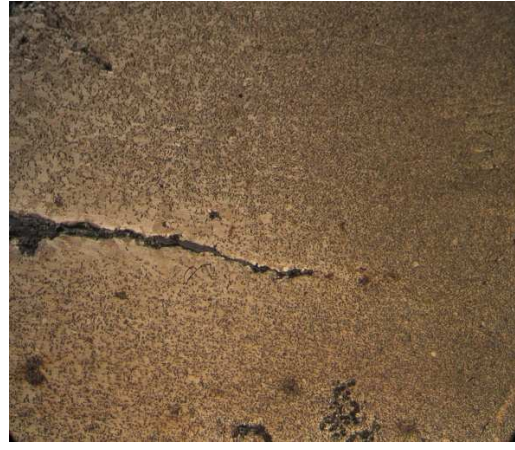
3.80: Φερρίτης και γραμμές συγκόλλησης. (x50)



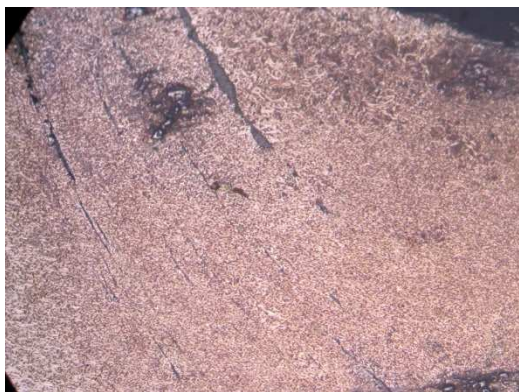
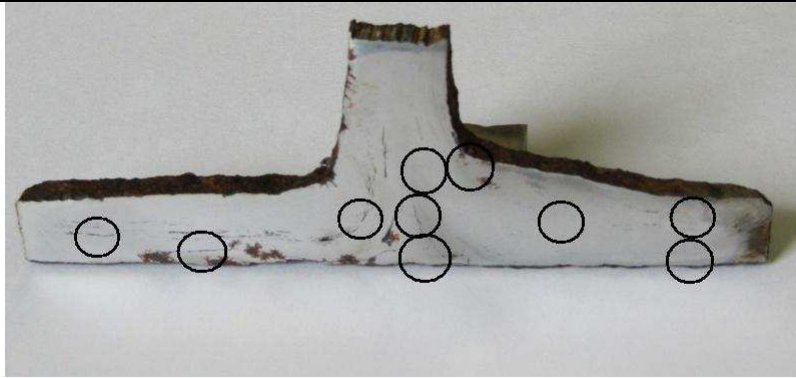
3.81: Φερρίτης με περλίτη- λεπτοκρυσταλλική δομή. (x50)



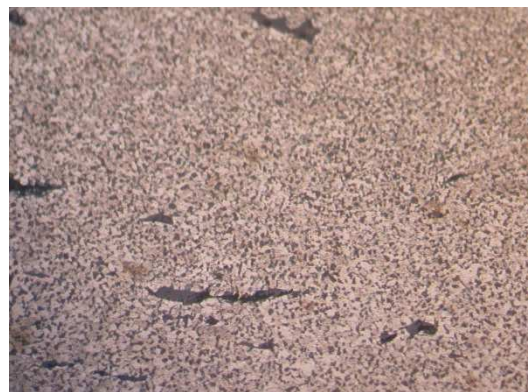
3.82: Φερρίτης περλίτης, λεπτόκοκκη δομή, με έντονη τη γραμμή της συγκόλλησης.(x100)



3.83: Λεπτοκρυσταλλική φερριτοπερλιτική δομή στην άκρη του συνδέσμου, με αρκετά σημεία που έχουν υποστεί οξείδωση.(x50)



3.84: Φερρίτης με περλίτη στο λαιμό του άκρου. Τα εγκλείσματα φανερώνουν το άνοιγμα και από αυτή τη μεριά του άκρου T1.(x50)



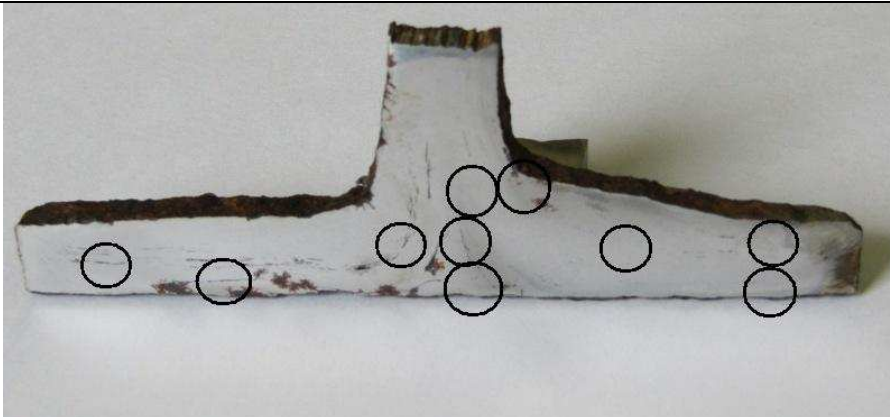
3.85: Φερρίτης με κοκκοποιημένο άνθρακα.(100)



3.86: Φερρίτης και περλίτης στα όρια των κόκκων.(x100)

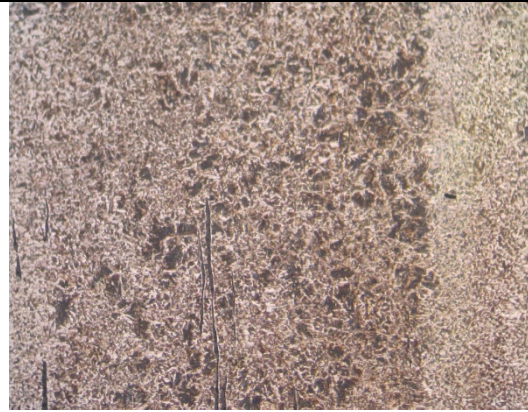


3.87: Εξωτερικά του άκρου φερρίτης με λίγο περλίτη και καθώς προχωρούμε προς το εσωτερικό του παρατηρείται αύξηση του περλίτη.(x50)

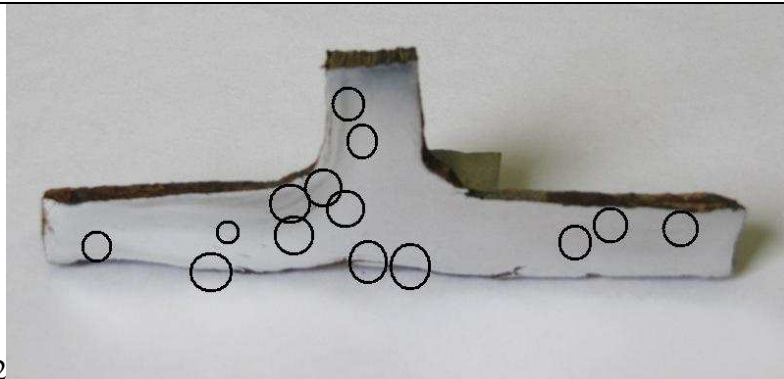




3.87: Φερρίτης με περλίτη στο λαιμό του άκρου. (x50)



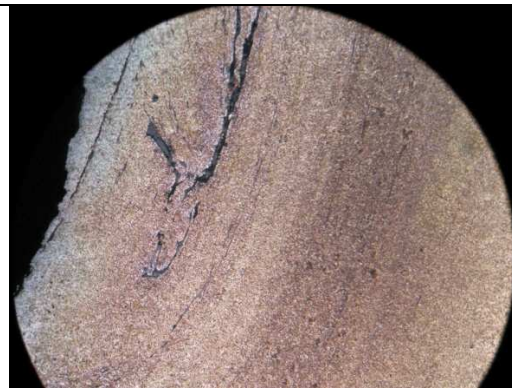
3.88: Φερρίτης με αρκετό περλίτη. Σε κάποια σημεία φαίνεται η τάση για φερρίτη Widmanstätten, λόγω της βελονοειδούς μορφής.(x100)



AKPO T2



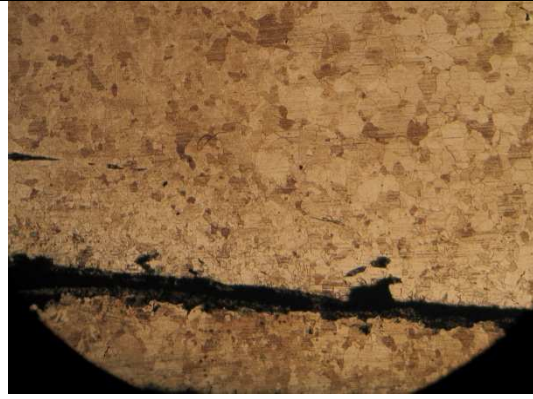
3.89: Λεπτοκρυσταλλικός φερρίτης περλίτης. Εμφανής η διαμόρφωση του συνδέσμου από τον προσανατολισμό των στρωμάτων της σφυρηλασίας.(x100)



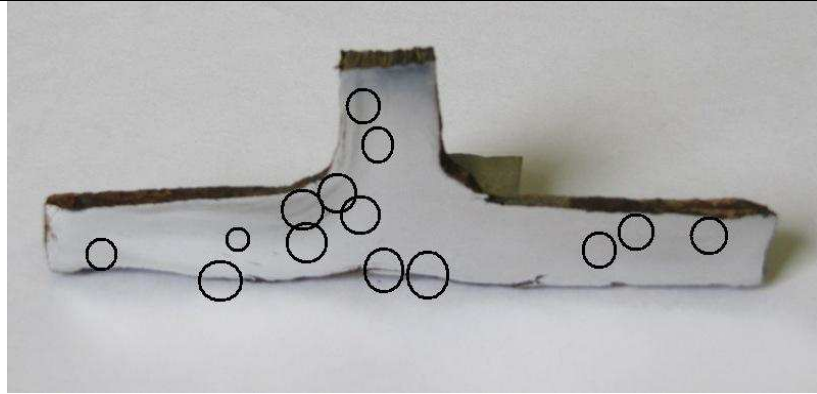
3.90: Λεπτοκρυσταλλικός φερρίτης περλίτης. Εμφανής η διαμόρφωση του συνδέσμου από τον προσανατολισμό των στρωμάτων της σφυρηλασίας.(συνέχεια με την προηγούμενη).(x50)



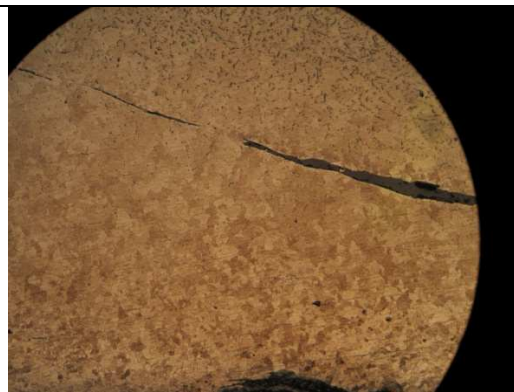
3.91: Φερρίτης από τη μία πλευρά ο οποίος αποκτά καθώς προχωρούμε αριστερά όλο και περισσότερο άνθρακα σχηματίζοντας περλίτη. Κεντρικά έχουμε φερρίτη με περλίτη στα όρια των κόκκων του φερρίτη.(X50)



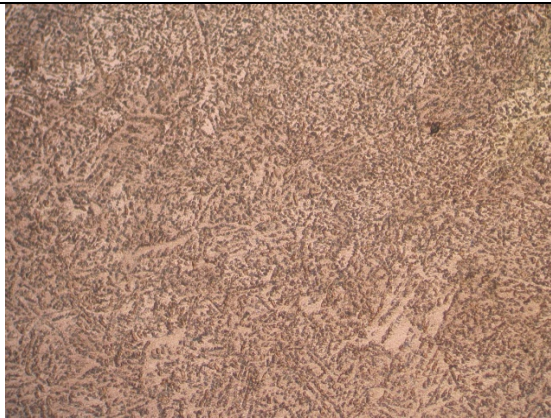
3.92: Φερρίτης λεπτόκοκκος εξωτερικά και πιο χονδρόκοκκος εσωτερικά του άκρου.(X50)



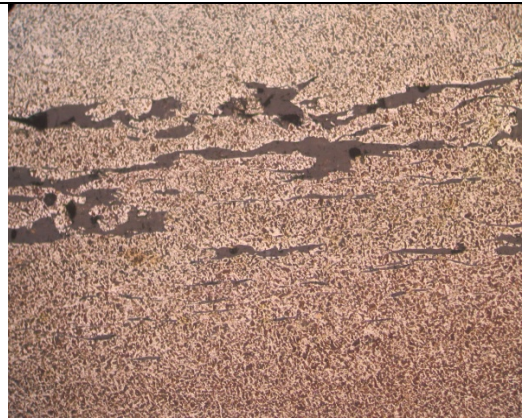
3.93: Στο άνω τμήμα παρατηρείται περλίτης ο οποίος καθώς προχωρούμε προς το κάτω τμήμα λιγοστεύει μέχρι που καταλήγει σε περλίτη στα όρια των κόκκων του φερρίτη.(x50)



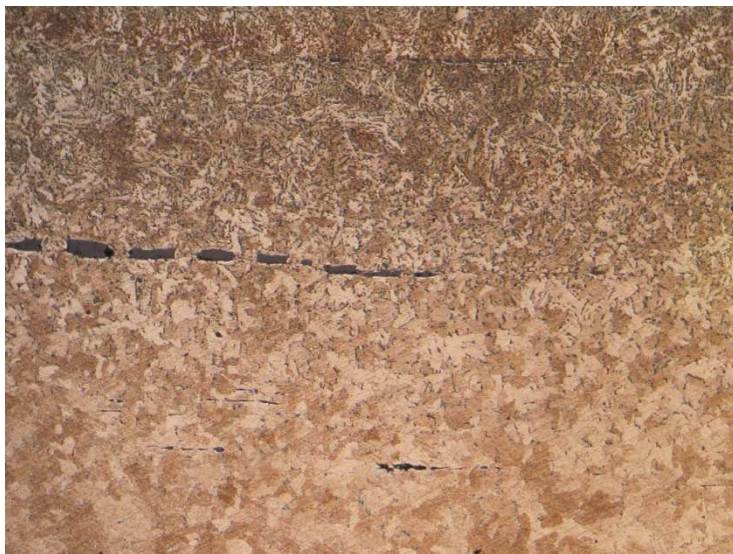
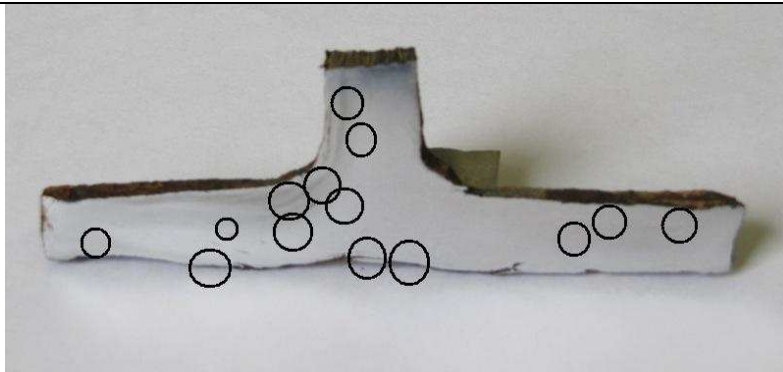
3.94: Καθώς προχωρούμε προς τα κάτω σε αυτό το άκρο ο περλίτης λιγοστεύει ακόμα περισσότερο. Στην άκρη έχουμε μόνο φερρίτη.



3.95: Φερρίτης –περλίτης.(x100)



3.96: Λεπτοί κόκκοι φερρίτη περλίτη.(x100)



3.97: Φερρίτης στο κάτω τμήμα, φερρίτης με περλίτη στα όρια των κόκκων πιο πάνω και φερρίτης με αρκετό περλίτη στο άνω τμήμα (x50)



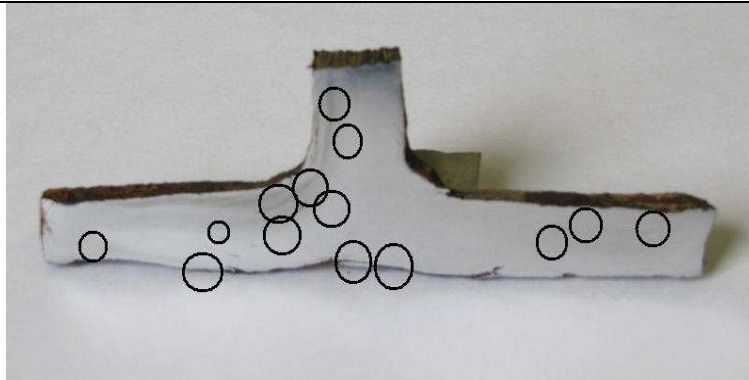
3.98: Φερρίτης στην άκρη του συνδέσμου.(x50)



3.99: Φερρίτης με κόκκους αρκετά μεγάλου μεγέθους.(x50)



3.100: Φερρίτης και στρώματα σφυρηλασίας.(x50)



3.101: Κόκκοι φερρίτη διαφορετικής διάστασης.(x50)

## Σύνδεσμος B9

Κατά την εξέταση των συνδέσμων μακροσκοπικά, ο σύνδεσμος B9 φαινόταν πως ίσως να μην έχει ανοιχθεί όπως οι υπόλοιποι. Δεν παρατηρούνταν στο λαιμό του εγκλείσματα με συγκεκριμένο προσανατολισμό, έτσι ώστε να φανεί ο τρόπος διαμόρφωσής του. Αντίθετα και στις δύο καταλήξεις των άκρων του εμφανίζονταν από μια βαθιά χαρακιά που δημιούργησε την υποψία πως ο σύνδεσμος έχει υποστεί αναδίπλωση, η οποία κατέληξε σε αυτό το σημείο (εικ). Έτσι έγινε η υπόθεση της πιθανής διαμόρφωσής του, η οποία όμως ύστερα από την παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο αποδείχθηκε λανθασμένη.

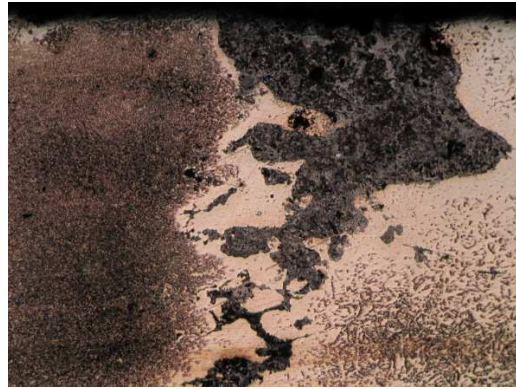
Το άκρο T1 δείχνει να είναι σε όλη του την έκταση φερριτοπερλιτικό. Σε ορισμένα σημεία διακρίνεται αρκετός περλίτης, κάτι που δε φάνηκε ιδιαίτερα από τη μακροπροσβολή του, καθώς δεν διακρίνονταν ιδιαίτερα τα μελανά σημεία.



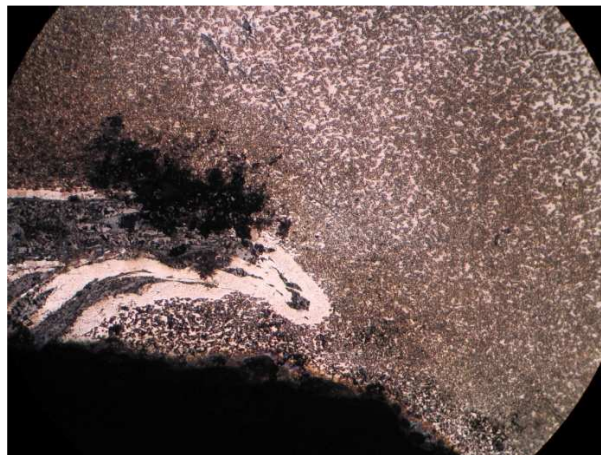
## ΑΚΡΟ Τ1



3.102: Φερριτοπερλιτική δομή.(x50)



3.103: Φερρίτης – περλίτης στην άκρη του Τ. Επίσης παρατηρείται οξείδωση η οποία έχει ξεκινήσει από έξω εισχωρώντας στο στρώμα της σφυρηλασίας.(x50)



3.104: Φερρίτης περλίτης στο λαιμό του άκρου.(x50)



3.105: Φερρίτης.(x50)



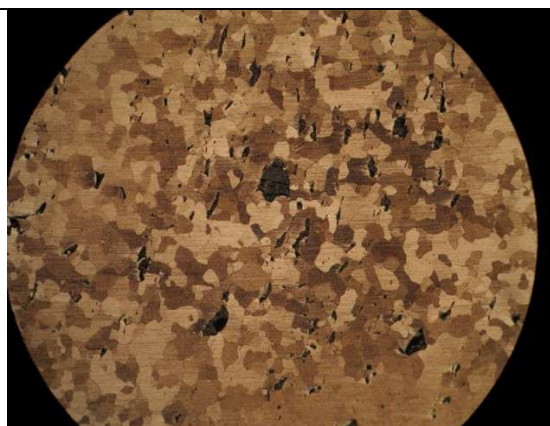
3.106: Φερρίτης.



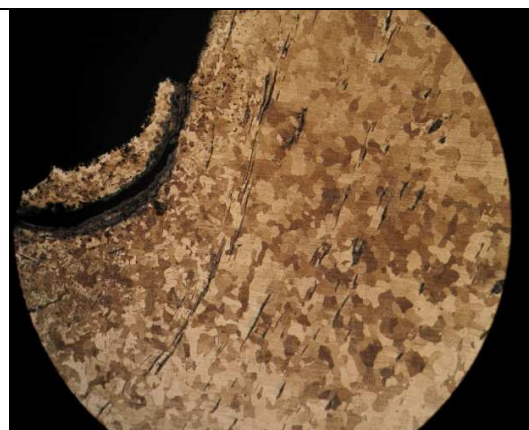
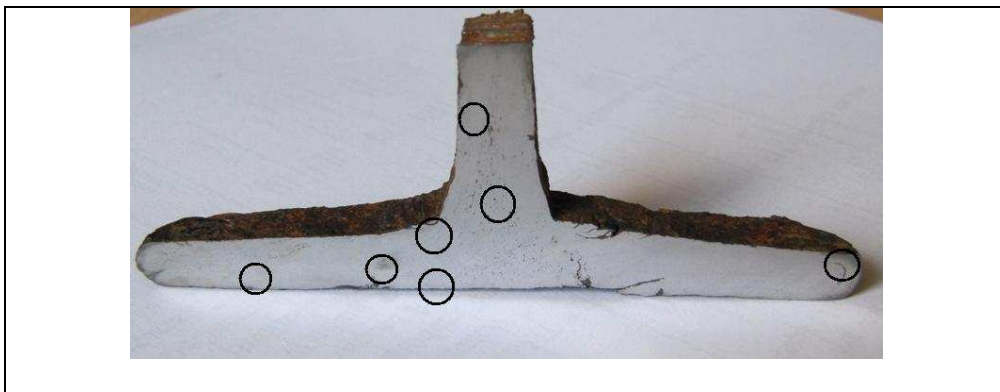
## ΑΚΡΟ T2



3.107 Φερριτική δομή. Φαίνονται καθαρά τα εγκλείσματα και η κατεύθυνσή τους. (x50)



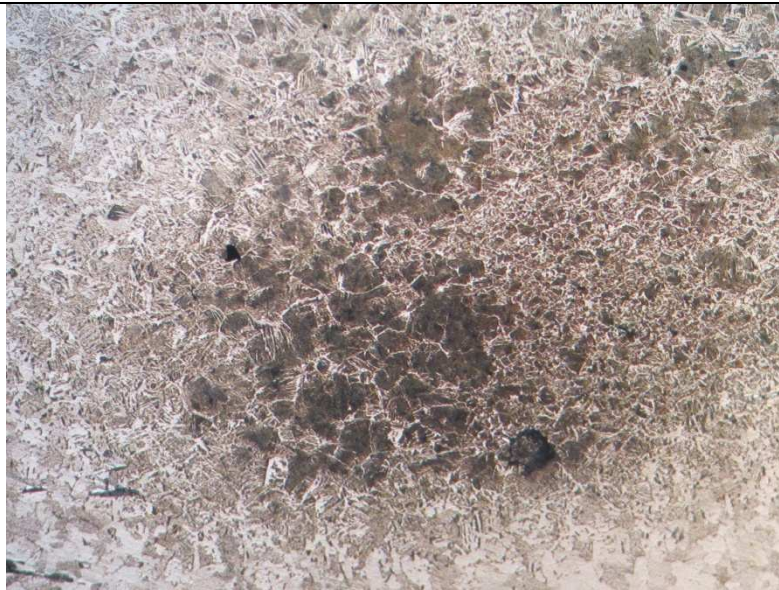
3.108 Φερρίτης στο στέλεχος του συνδέσμου. (x50)



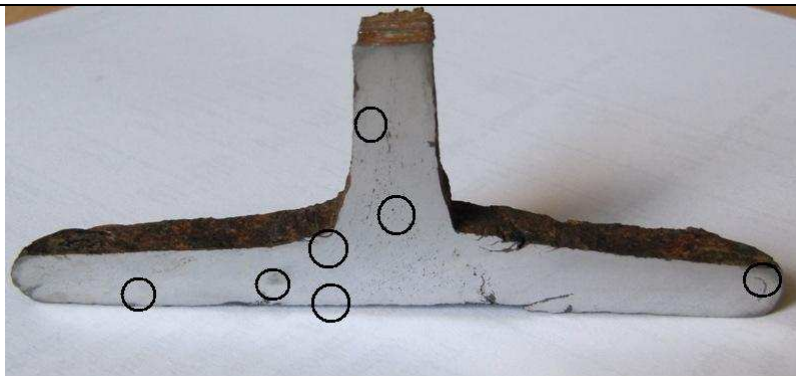
3.109: Φερρίτης λεπτοκρυσταλλικός εξωτερικά, και χονδροκρυσταλλικός εσωτερικά. Η εικόνα αυτή από το λαιμό του συνδέσμου, αποδεικνύει παρατηρώντας τα στρώματα της σφυρηλασίας ότι ο σύνδεσμος είναι ανοιγμένος. (x50)



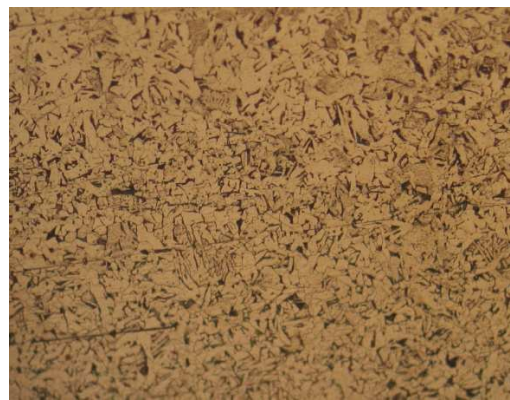
3.110: Φαίνεται ότι ο σύνδεσμος δεν έχει υποστεί αναδίπλωση όπως θεωρήθηκε κατά τη μακροσκοπική του μελέτη. (x50)



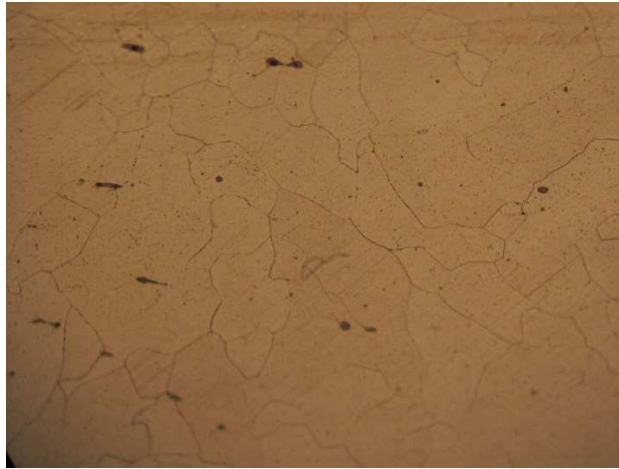
3.111: Φερρίτης Widmanstätten με τη χαρακτηριστική βελονοειδή του μορφή.(x50)



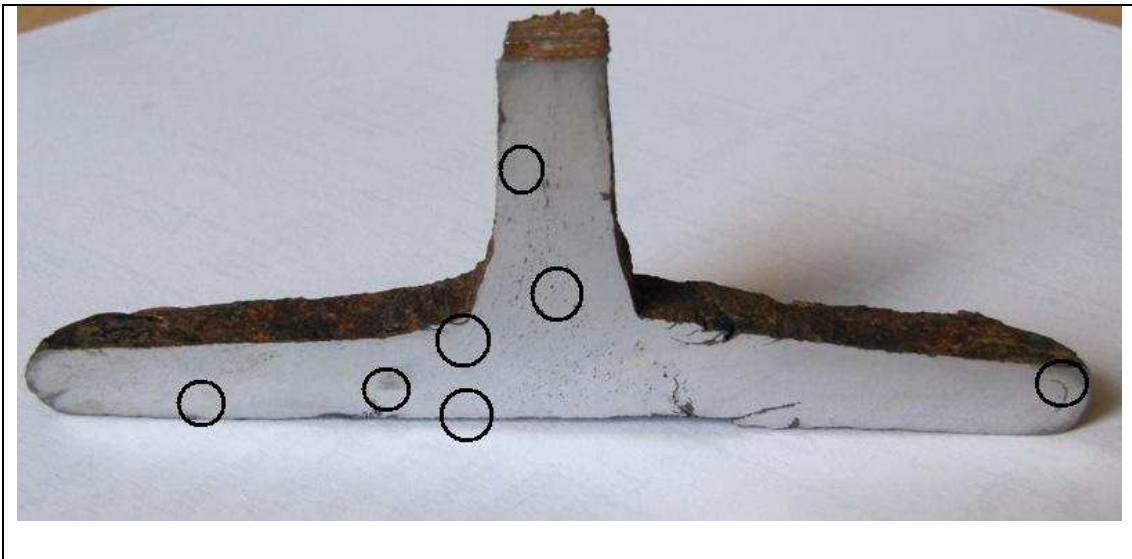
3.112: Το μαύρο κοκκώδες μέσα στο φερρίτη Widmanstätten είναι ο σορμπίτης (x200)



3.113: Φερρίτης – Περλίτης (x100)



3.114 Φερρίτης και εγκλείσματα.

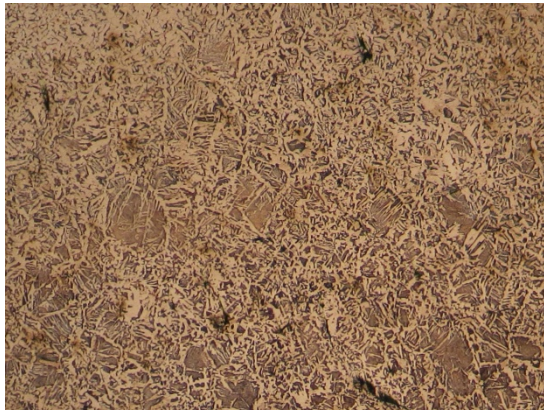


## Σύνδεσμος B19

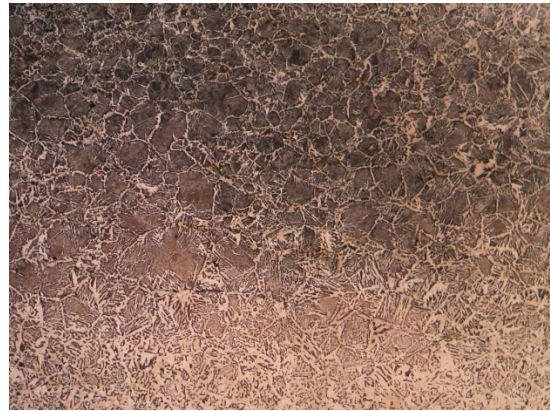
Κατά τη μακροσκοπική παρατήρησή του ο σύνδεσμος B19 λόγω της απουσίας των εγκλεισμάτων δεν διαπιστώθηκε ο τρόπος διαμόρφωσής του κάτι που φάνηκε στο οπτικό μικροσκόπιο. Όπως φαίνεται και παρακάτω διακρίνεται ότι και αυτός ο σύνδεσμος είναι ανοιγμένος με τον ίδιο τρόπο που είναι ανοιγμένοι και οι υπόλοιποι.

Μακροσκοπικά η χημική προσβολή μας έδειξε ότι αυτός ο σύνδεσμος είναι ο πιο πλούσιος σε άνθρακα και μάλιστα φανερώθηκε μια επιμήκης λωρίδα χάλυβα. Το οπτικό μικροσκόπιο μας έδειξε πως συναντούμε σε πολλά σημεία φερρίτη Widmanstätten και σορμπίτη αλλά και περλίτη. Παρακάτω βλέπουμε τις εικόνες από το οπτικό μικροσκόπιο των άκρων T1 και T2 του συνδέσμου.

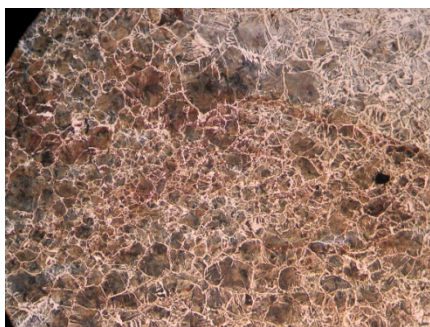
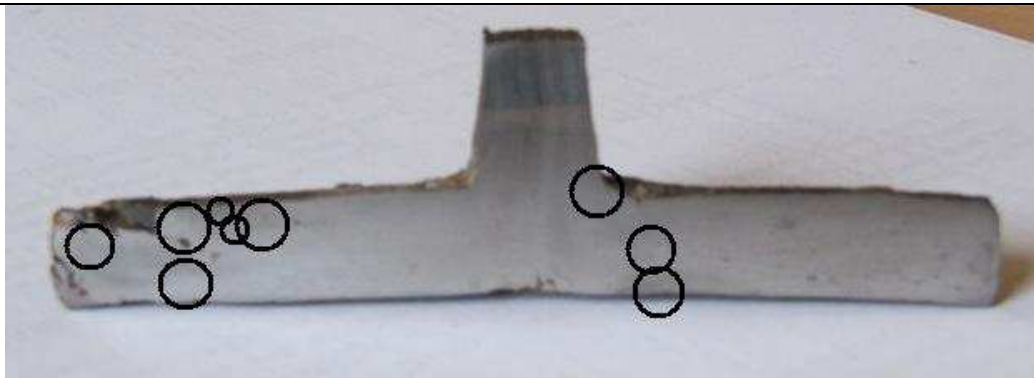
ΑΚΡΟ Τ1



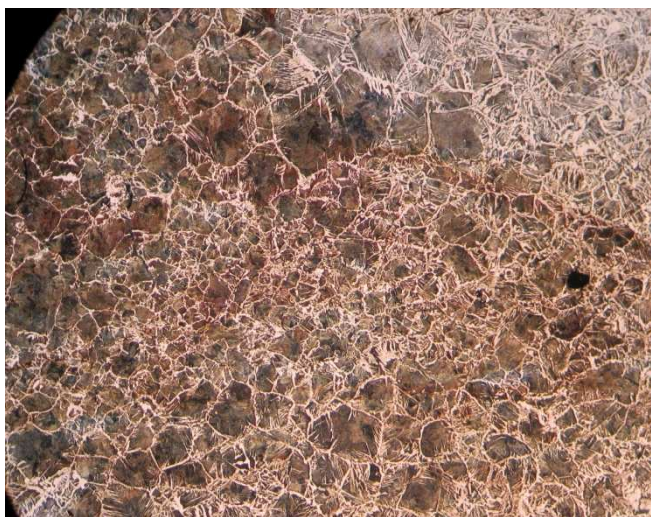
3.115 Φερρίτης Widmanstätten και σφαιρίτις.(x50)



3.116 Φερρίτης Widmanstätten και σφαιρίτις.(x50)



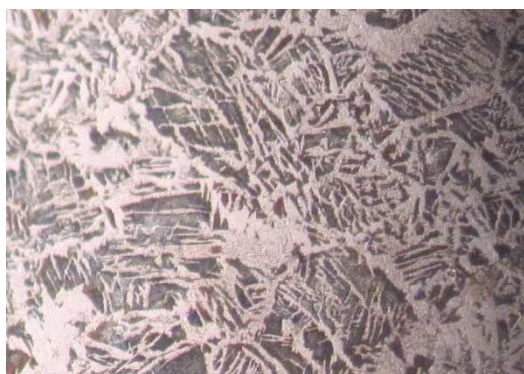
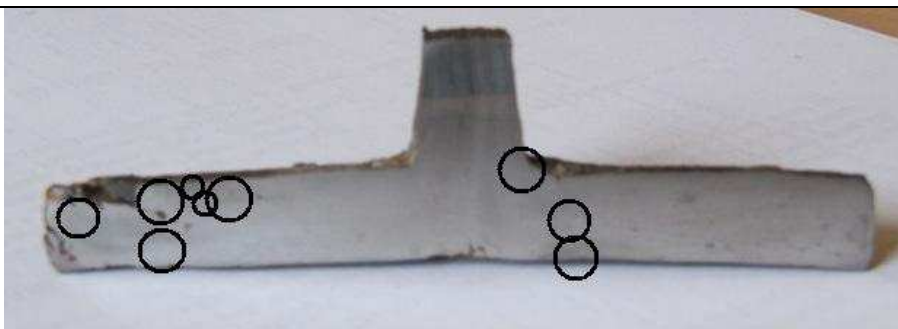
3.117: Φερρίτης Widmanstätten και σφαιρίτις.(x50)



3.118: Η 3.117σε μεγέθυνση.



3.119: Φερρίτης Widmanstätten και σφαιρίτις.(x50)

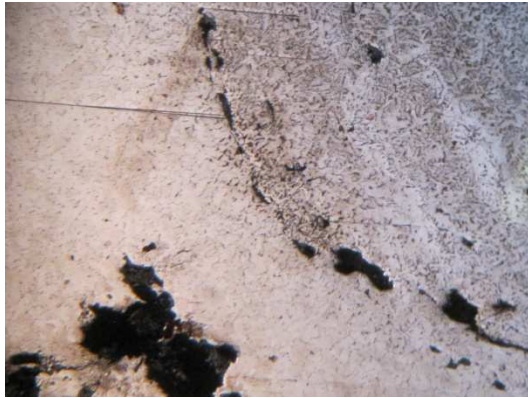


3.120: Φερρίτης Widmanstätten.(100)



3.121: Φερρίτης Widmanstätten.(x200)

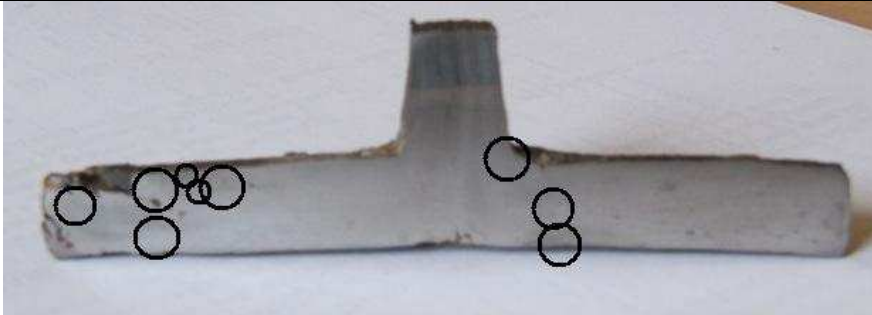




3.122 Φερρίτης περλίτης και στρώματα της σφυρηλασίας σε σημείο που προδίδουν άνοιγμα κατά τη διαμόρφωσή του.(x50)

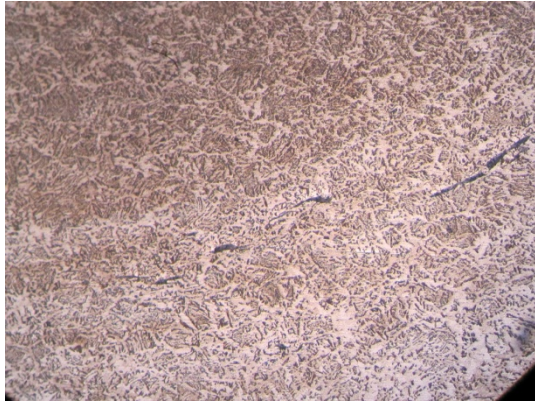


3.123: Κατεύθυνση της σφυρηλασίας.(x50)



3.124: Τα εγκλείσματα προδίδουν την κατεύθυνση της σφυρηλασίας στο λαμό του άκρου T1.

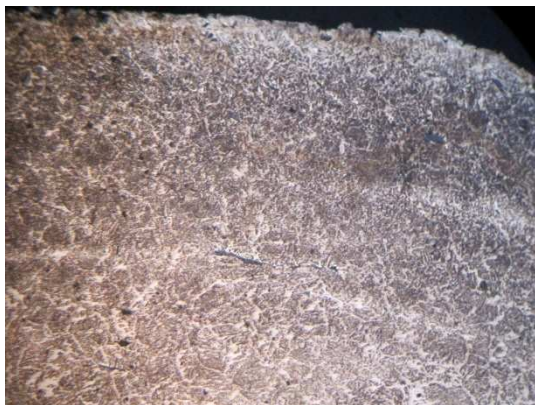
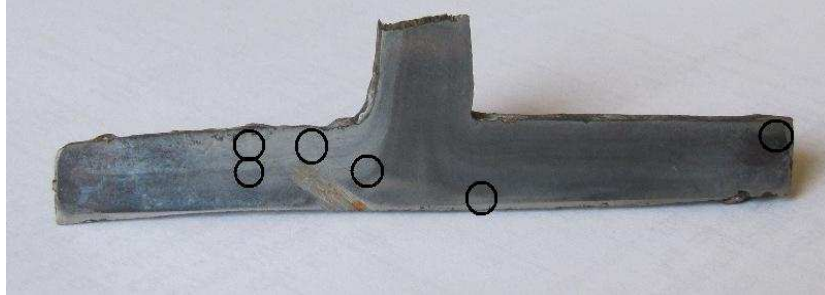
ΑΚΡΟ Τ2



3.125: Αποδεικνύεται ότι ο σύνδεσμος είναι ανοιγμένος λόγω της κατεύθυνσης των εγκλεισμάτων.(x50)



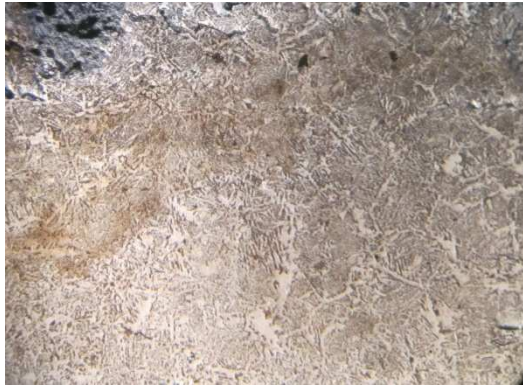
3.126: Φερρίτης-περλίτης.(x50)



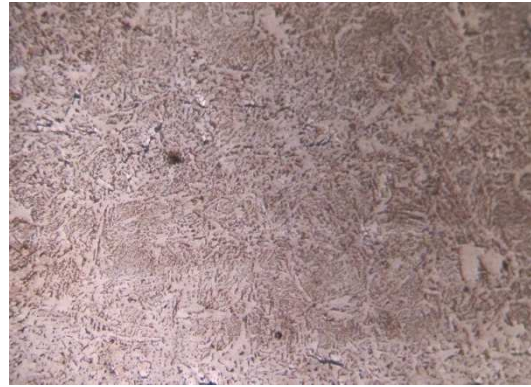
3.127: Φερρίτης-περλίτης(x50)



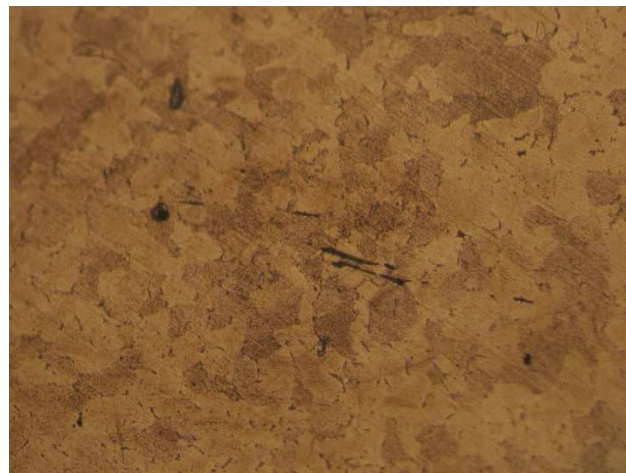
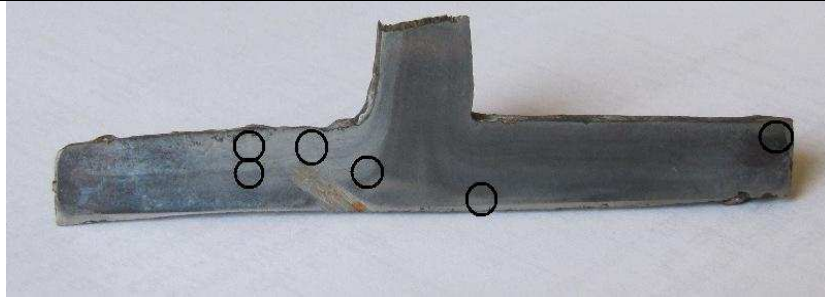
3.128: Φερρίτης-περλίτης (x200)



3.129: Φερρίτης-περλίτης (x50)



3.130: Φερρίτης-περλίτης (x50)



3.131:Φερρίτης.(x100)

### 3.4 Χημική Ανάλυση

Παρακάτω παρατίθενται δύο πίνακες χημικών αναλύσεων, οι οποίοι προέρχονται από τα άκρα T1 και T2 του συνδέσμου A5. Η περιοχή που θα γίνει η χημική ανάλυση είναι στο κέντρο του κάθε άκρου. Τα αποτελέσματα είναι συνεπώς ενδεικτικά και αντιπροσωπεύουν μόνο τη συγκεκριμένη μικρή περιοχή και όχι όλο το σύνδεσμο. Για το λόγο αυτό άλλωστε δεν μπορούμε να έχουμε μια ολοκληρωμένη άποψη για το σύνδεσμο χαρακτηρίζοντάς τον καθαρό σίδηρο ή χάλυβα και χρησιμοποιήθηκαν άλλες μέθοδοι όπως : οι σκληρομετρήσεις, η μακροσκοπική παρατήρηση, η παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο και η παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Παρόλα αυτά η χημική ανάλυση έδωσε στοιχεία που μας βοηθούν στην ταυτοποίηση της προέλευσης του μεταλλεύματος που χρησιμοποιούνταν για τους συνδέσμους.

Πίνακας 3.2. Χημική ανάλυση του συνδέσμου A5. Άκρο T2.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
ποσοστό	0.011	0.041	0.02	0.067	0.0067	<0.0005	0.084	<0.001
	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Co</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
ποσοστό	0.0057	0.056	0.034	<0.0005	<0.001	<0.001	<0.007	<0.001
	<b>B</b>	<b>Sb</b>	<b>Sn</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Ta</b>	<b>Ca</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
ποσοστό	0.0022	<0.001	0.004	<0.001	0.048	<0.0015	<0.007	0.006
	<b>Ce</b>	<b>Zr</b>	<b>La</b>	<b>Se</b>	<b>N</b>	<b>Fe</b>		

	%	%	%	%	%	%		
ποσοστό	<0.002	<0.0015	0.0012	<0.002	0.0088	99.6		

Πίνακας 3.3. Χημική Ανάλυση του συνδέσμου A5. Άκρο T1.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
ποσοστό	0.016	0.042	0.02	0.07	0.0075	<0.0005	0.082	<0.001
	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Co</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
ποσοστό	0.0077	0.054	0.033	<0,0005	<0,001	<0,001	<0,007	<0,001
	<b>B</b>	<b>Sb</b>	<b>Sn</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Ta</b>	<b>Ca</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
ποσοστό	0,0027	<0,001	0,004	<0,001	0,048	<0,0015	<0,007	0,0064
	<b>Ce</b>	<b>Zr</b>	<b>La</b>	<b>Se</b>	<b>N</b>	<b>Fe</b>		
	%	%	%	%	%	%		
Ποσοστό	<0,002	<0,0015	0,0012	<0,002	0,0069	99,6		

## Σχολιασμός

- 1) Ο άνθρακας (C) είναι, όπως αναφέρεται στους Πίνακες 1 και 2 πολύ χαμηλός. Εξάλλου αυτό φαίνεται και από τη χαμηλή τιμή της σκληρότητας.
- 2) Είναι ενδιαφέρουσα η χημική σύνθεση, η οποία δείχνει, ότι τα συνυπάρχοντα στοιχεία, ιδιαίτερα το θείο (S) και ο φωσφόρος (P) βρίσκονται σε ίχνη. Τα δύο αυτά στοιχεία τα χαρακτηρίζουμε ως ασθένειες του σιδήρου και χάλυβα, ιδιαίτερα, όπως γνωρίζουν οι χαλυβουργοί, το θείο. Το τελευταίο βρίσκεται με τη μορφή του θειούχου σιδήρου (FeS) στα περατωτικά άκρα των κόκκων. Ο θειούχος σίδηρος όμως έχει ένα χαμηλό σημείο τήξεως, γύρω στους 960° C και για το λόγο αυτό στις υψηλές θερμοκρασίες της διαμόρφωσης με έλαση ή με σφυρηλάτηση, που πραγματοποιείται συνήθως στους 1100° – 1200° C, τήκεται, με αποτέλεσμα οι κόκκοι να ολισθαίνουν μεταξύ τους και τότε έχουμε διάσπαση του σιδήρου ή του χάλυβα σε τεμάχια με δυσμενείς συνέπειες στην παραγωγή και το κόστος.
- 3) Το χαμηλό ποσοστό σε περιεκτικότητες στοιχείων όπως το θείο, ο φώσφορος, ο χαλκός, που είναι ανεπιθύμητα στο σίδηρο μας βεβαιώνουν ότι τα σιδηρομεταλλεύματα προέρχονται από τα μεταλλεία της Λακωνίας, με τα πολύ πλούσια και καθαρά της σιδηρομεταλλεύματα κυρίως από απόψεως θείου και φωσφόρου. Είναι η μοναδική περιοχή στην Ελλάδα με τέτοια καλή ποιότητα μεταλλευμάτων σιδήρου και αυτό αποδεικνύεται ως εξής: Ο καθηγητής Γιώργος Βαρουφάκης, σημερινός πρόεδρος της εταιρείας Χαλυβουργική Α.Ε., έχοντας τη γνώση των περιεκτικότητων σε ξένα στοιχεία όλων των μεταλλείων στη χώρα και λαμβάνοντας υπόψη του τις παραπάνω χημικές αναλύσεις βεβαιώνει την προέλευση των σιδηρομεταλλευμάτων: «Όταν στη Χαλυβουργική λειτουργούσαν οι υψικάμινοι χρησιμοποιούσαν μεταλλεύματα από τη Σέριφο, Σκύρο, Θάσο και για ένα διάστημα της δυτικής Κρήτης, γιατί εκεί υπήρχαν από προπολεμικά οργανωμένα μεταλλεία σιδηρομεταλλευμάτων, τα οποία τροφοδοτούσαν τις μεγάλες χαλυβουργίες της Γερμανίας. Τότε, πολλοί ιδιώτες έφεραν στο εργαστήριο ποιότητας της εταιρείας, σάκους με μέταλλευμα σιδήρου από διάφορες άλλες περιοχές της χώρας με την ελπίδα να τα πουλήσουν και να πλουτίσουν, δεδομένου, ότι για την ημερήσια παραγωγή 1200 τόνων χυτοσιδήρου απαιτούντο περίπου 2400 τόνοι μεταλλεύματος. Με τον τρόπον αυτόν, γνώρισε τη σύνθεση και την καθαρότητα των σιδηρομεταλλευμάτων σχεδόν όλης της χώρας. Μία

περίπτωση είναι και η Λακωνία με τα υψηλής καθαρότητας μεταλλεύματα. Αντιθέτως, αυτά, που χρησιμοποιούσαν στις υψικαμίνους, προέρχονταν από τα αναφερθέντα νησιά και ήταν σχετικά φτωχά σε σίδηρο (γύρω στα 30%) και το χειρότερο περιείχαν αρκετό θείο, φωσφόρο και άλλα ανεπιθύμητα ξένα στοιχεία, όπως χαλκό και μόλυβδο. Αυτός είναι και ο λόγος, που η εν λόγω εταιρία προσανατολίστηκε στην εισαγωγή από Λιβερία, Μαρόκο, Νότια Αφρική και ιδιαίτερα από Αυστραλία με περιεκτικότητα σε σίδηρο πάνω από 60%. Τώρα, γιατί η εταιρία δεν χρησιμοποίησε τα μεταλλεύματα της Λακωνίας, οφείλεται στο γεγονός, ότι δεν υπήρχε εκεί καμιά οργανωμένη υποδομή εκμετάλλευσης. Είναι όμως γνωστό, ότι στην αρχαιότητα οι Λάκωνες και κυρίως οι Σπαρτιάτες εκμεταλλεύονταν τα μεταλλεία αυτά και είχαν αναπτύξει μια εξαιρετική χαλυβουργία για την κατασκευή εργαλείων και όπλων. Σήμερα, έχει διαπιστωθεί, ότι πολλοί δρόμοι στην περιοχή αυτή έχουν κατασκευαστεί από σκωρίες, που παρήχθησαν από την αναγωγική τήξη των εν λόγω μεταλλευμάτων.»

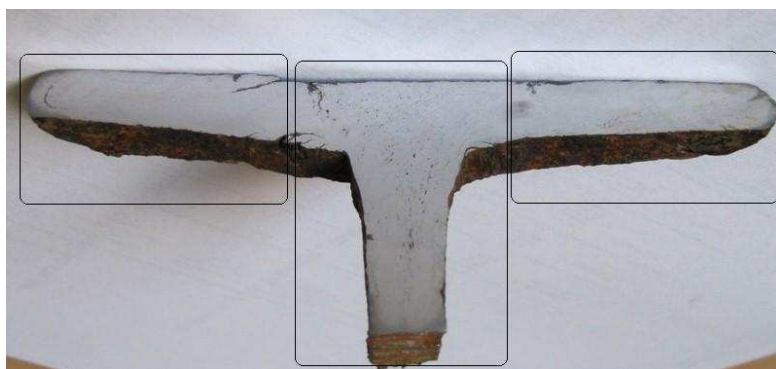
- 4) Τέλος δεν πρέπει να παραλείψουμε πως τα μεταλλεία της Λακωνίας ήταν πιο κοντά από όλα τα υπόλοιπα μεταλλεία της χώρας, γεγονός που δεν θα τους άφηνε αδιάφορους, καθώς το κόστος των μεταφορών θα ήταν μεγάλο. Η Σπάρτη είχε ανάγκη χρημάτων και είναι μάλιστα γνωστό ότι εξήγαγε σιδηρομετάλλευμα στην Αθήνα, από το οποίο κατασκευάστηκαν οι σύνδεσμοι του Παρθενώνα. Θα πρέπει ακόμα να σημειωθεί, ότι την εποχή αυτή, δηλαδή λίγο μετά τα μηδικά, οι σχέσεις Αθήνας και Σπάρτης ήταν πολύ καλές.

### 3.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (S.E.M.)

Μετά την παρατήρηση και των δέκα άκρων των πέντε συνδέσμων του ναού στο οπτικό μικροσκόπιο ακολούθησε η παρατήρηση του ενός άκρου από αυτά, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Σκοπός ήταν:

- Η λεπτομερέστερη παρατήρηση της μικροδομής του συνδέσμου σε πολύ μεγαλύτερες μεγεθύνσεις από αυτές του οπτικού μικροσκοπίου.
- Η στοχευόμενη σάρωση επιλεγμένων σημείων του άκρου με στόχο τη χημική ανάλυση του κάθε σημείου και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων για την καθαρότητα των συνδέσμων, καθώς και για το είδος των προσμίξεων σε αυτόν.
- Η πιο σωστή και σίγουρη διεξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο διαμόρφωσης των συνδέσμων.

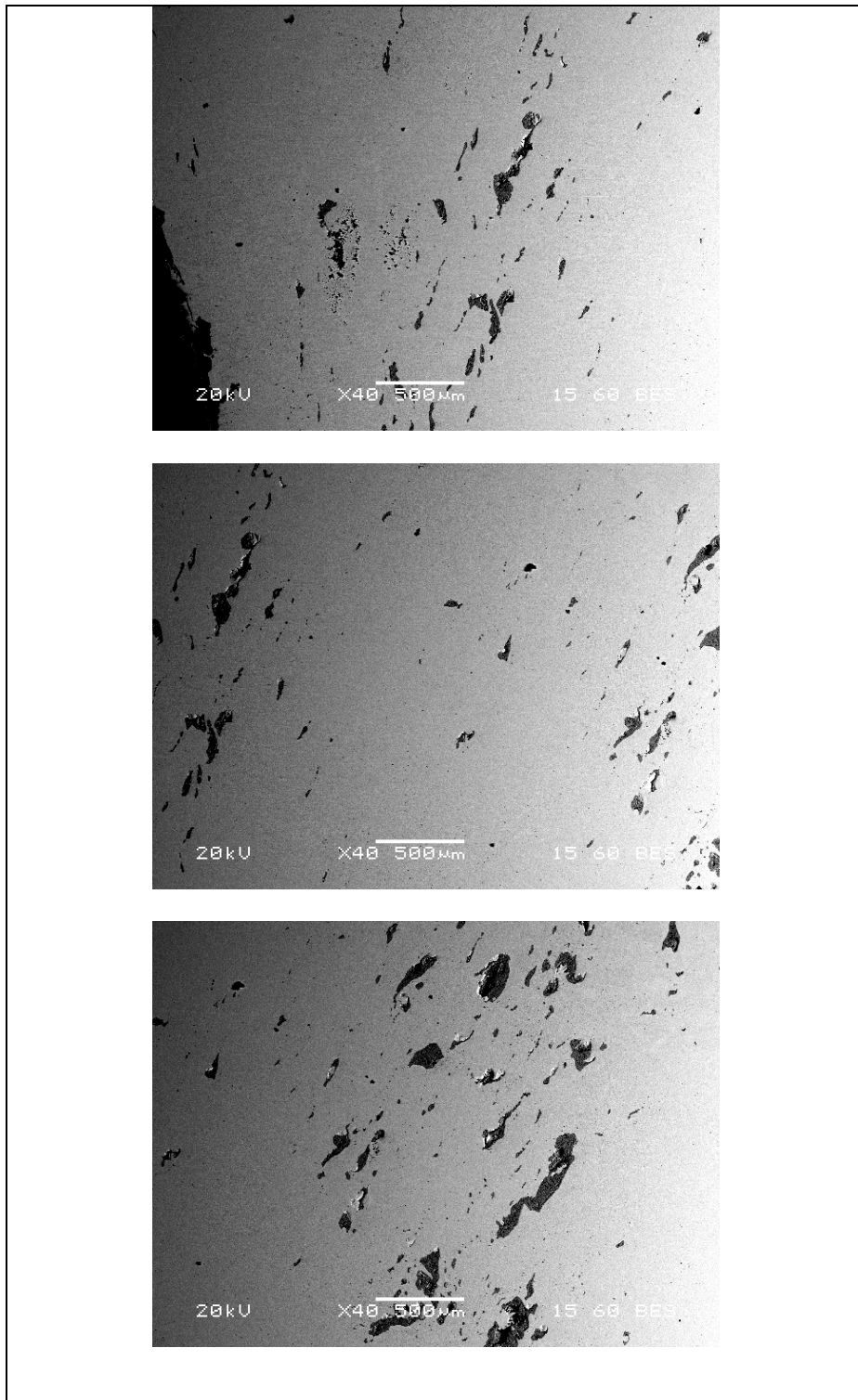
Το άκρο που επιλέχθηκε ήταν το T2 του συνδέσμου B9. Παρατηρήθηκε η μικροδομή του άκρου στις εξής μεγεθύνσεις: x35, x40, x50, x100, x150, x200, x250, x300, x500, x750, x1000, x2000, x2500. Το άκρο τοποθετήθηκε όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα και εξετάστηκε στις περιοχές: αριστερή περιοχή, κεντρική περιοχή και δεξιά περιοχή, όπως είναι σημειωμένες παρακάτω. Στη συνέχεια ακολουθεί η χημική ανάλυση των διαφόρων σημείων.

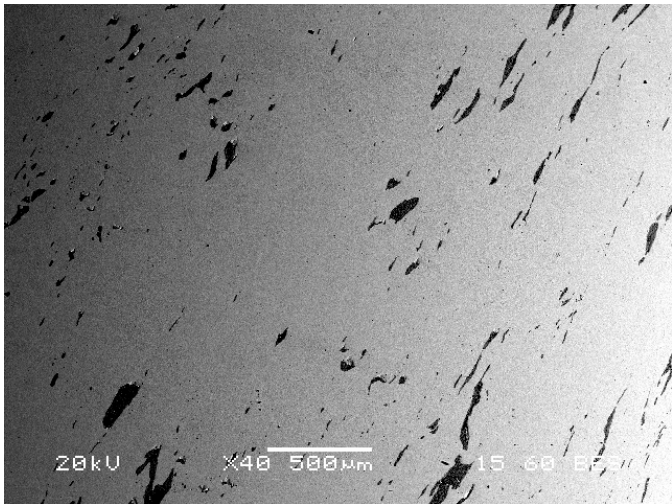
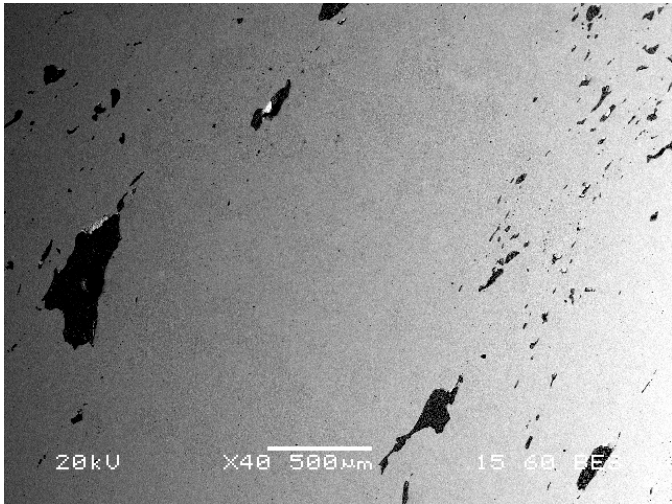
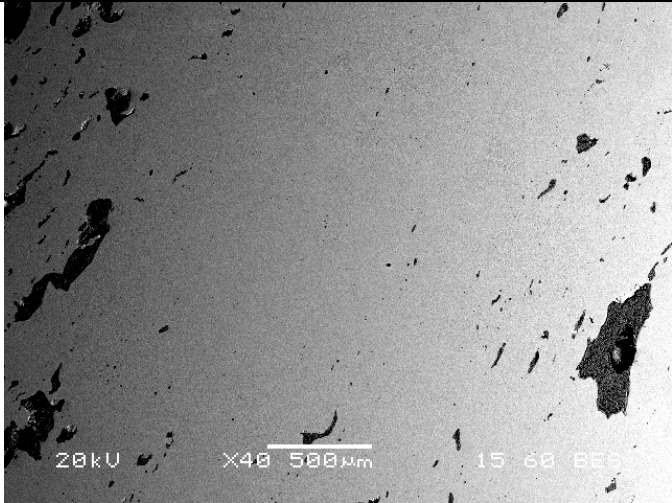


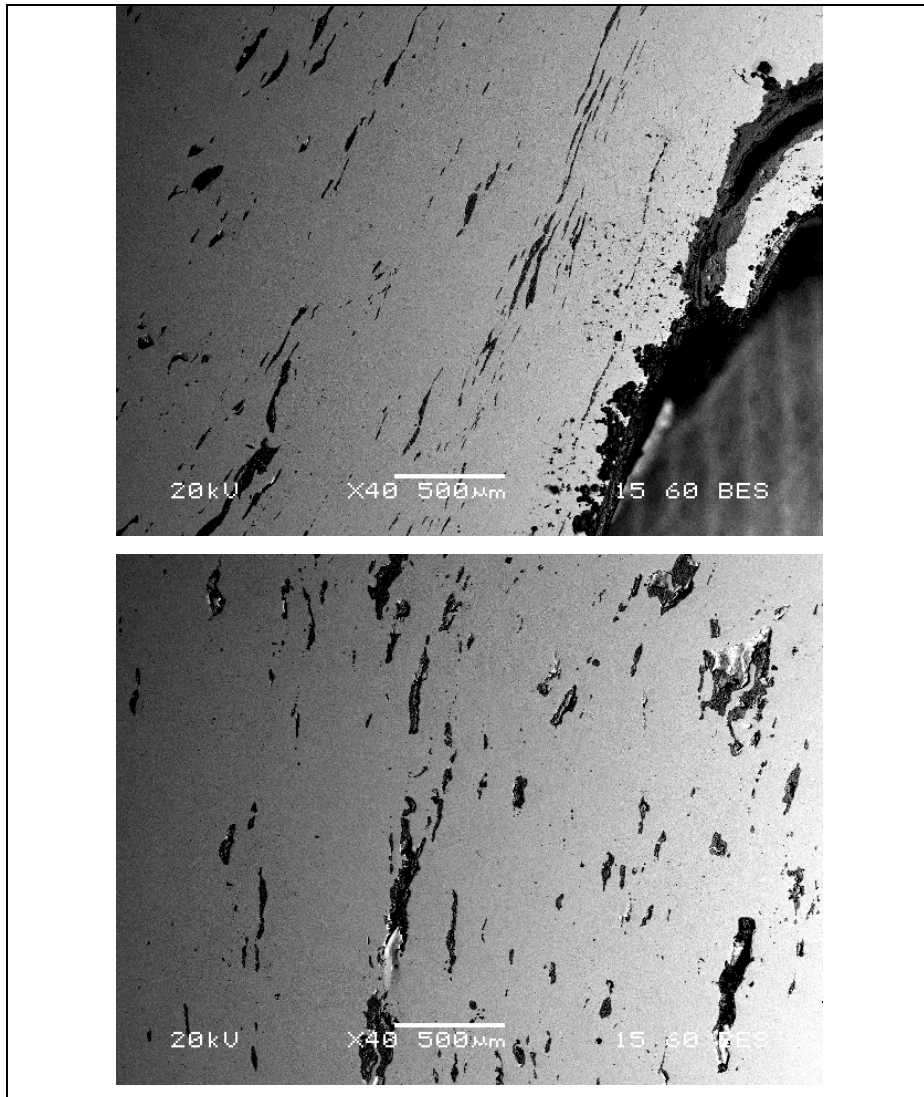
ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΤΜΗΜΑ, ΚΕΝΤΡΟ, ΔΕΞΙ ΤΜΗΜΑ



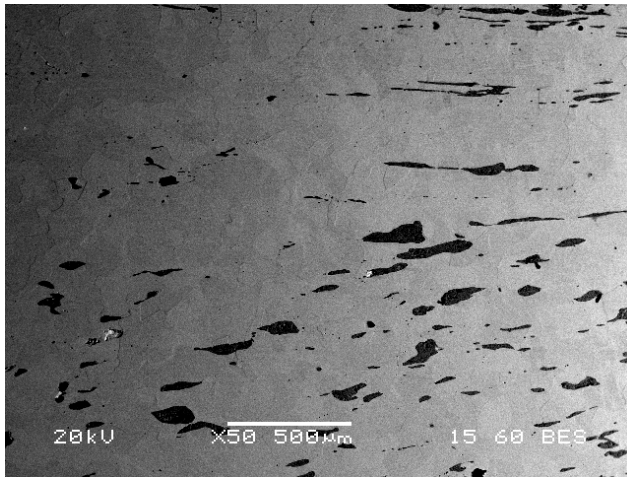
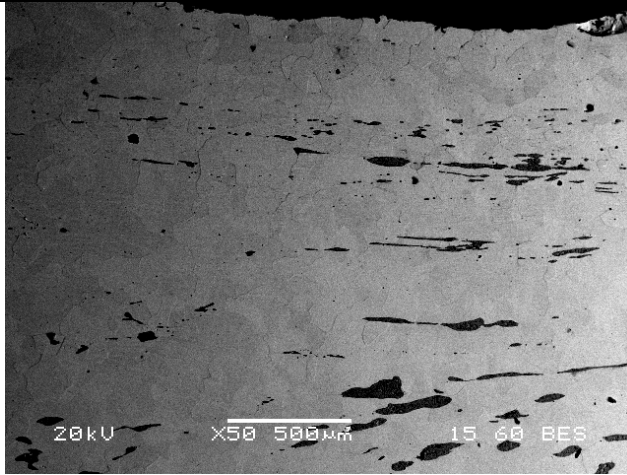
Παρατηρείται η μικροδομή και ο τρόπος διαμόρφωσης του άκρου ανά περιοχή.  
Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από το κέντρο του άκρου σε διάφορες μεγεθύνσεις.

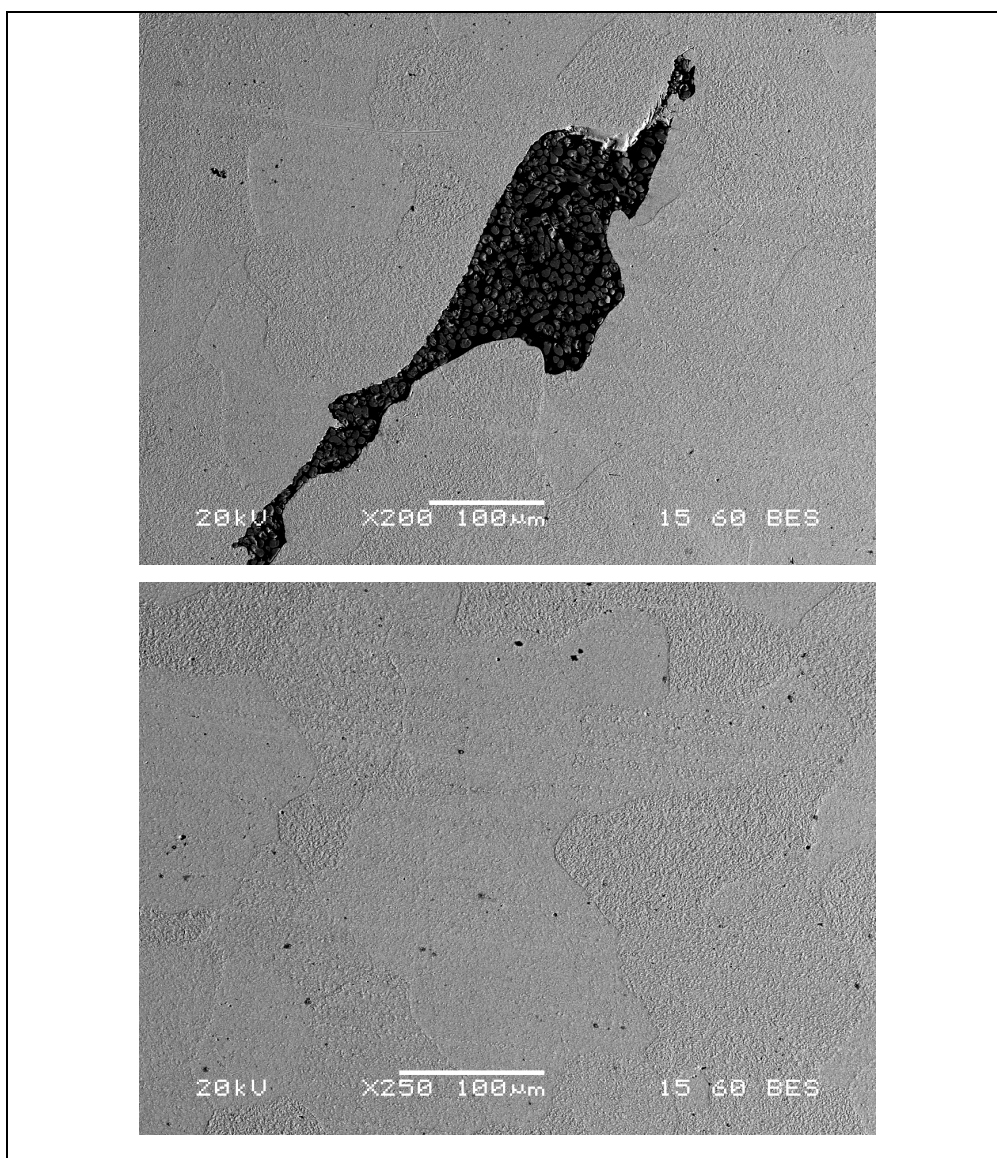




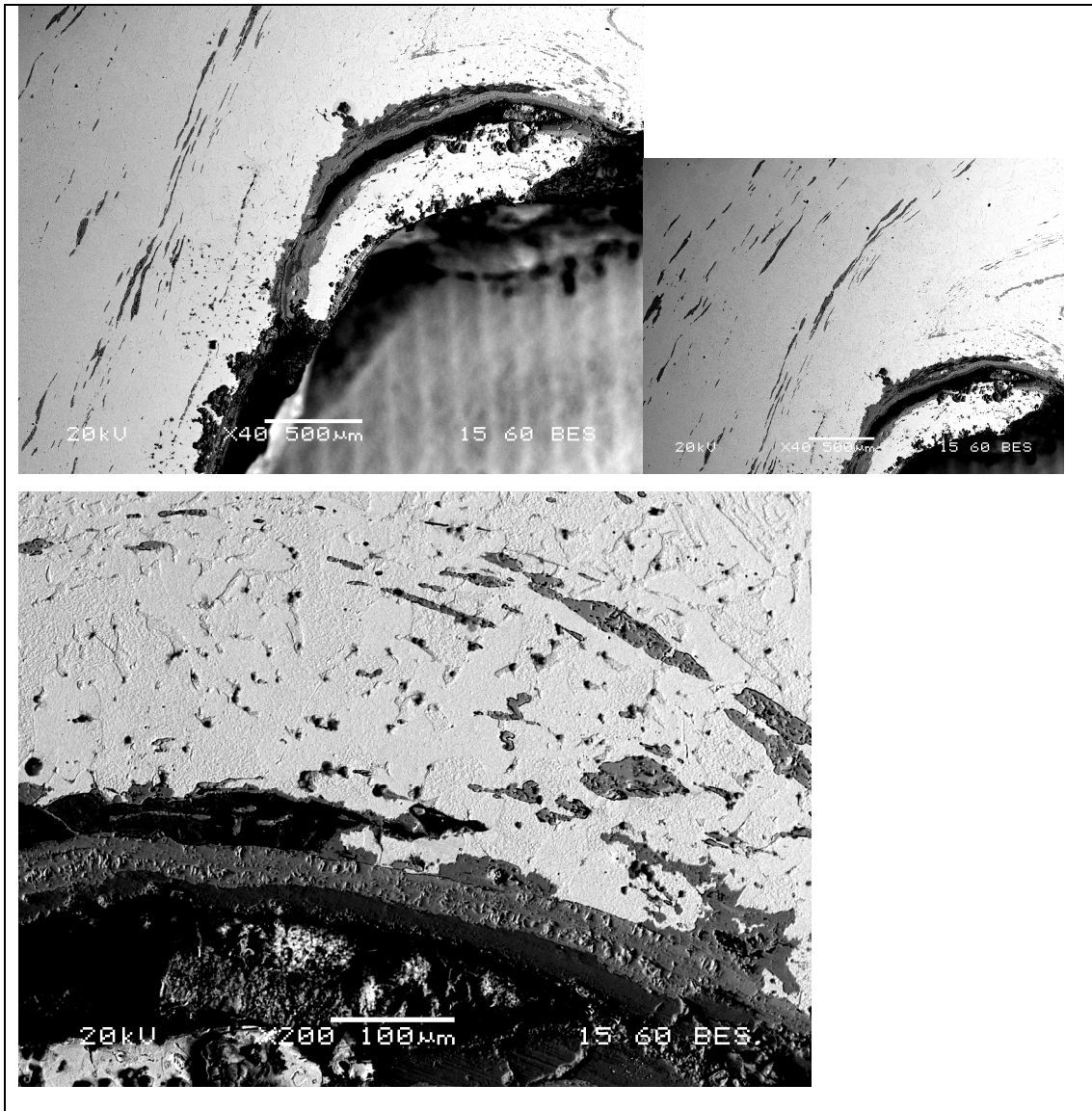


Οι παραπάνω εικόνες οι οποίες είναι σε μικρή μεγέθυνση απεικονίζουν τμήματα του στελέχους του άκρου και τμήματα του κέντρου του. Αυτό που παρατηρείται από τις εικόνες αυτές είναι η έντονη παρουσία της σκουριάς σε αυτά. Το γεγονός αυτό μας αποκαλύπτει πως το στέλεχος δεν είναι ιδιαίτερα σφυρηλατημένο από τον τεχνίτη στο στέλεχος. Υποθέτουμε λοιπόν πως το επίμηκες σχήμα του δεν χρειάστηκε ιδιαίτερη κατεργασία για να διαμορφωθεί, συνεπώς δε δουλεύτηκε τόσο ώστε να απομακρυνθεί η σκουριά από την περιοχή εκείνη. Ακολουθούν εικόνες από το κέντρο του άκρου στο άνω τμήμα του.

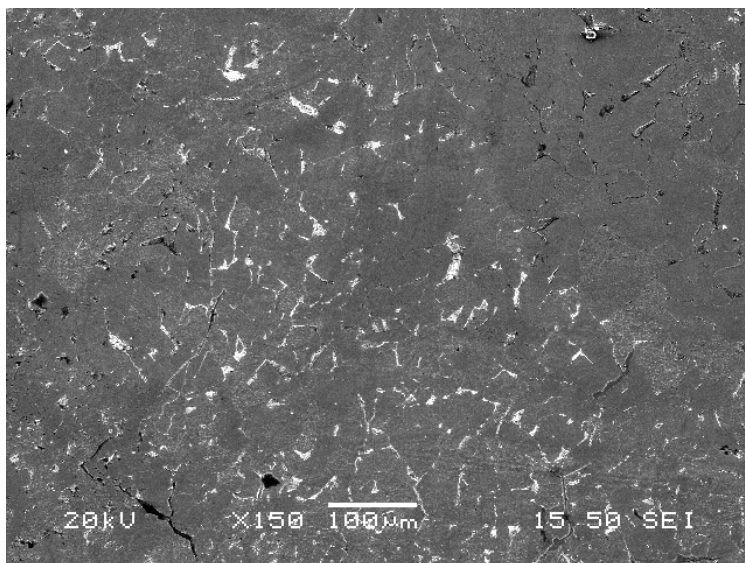
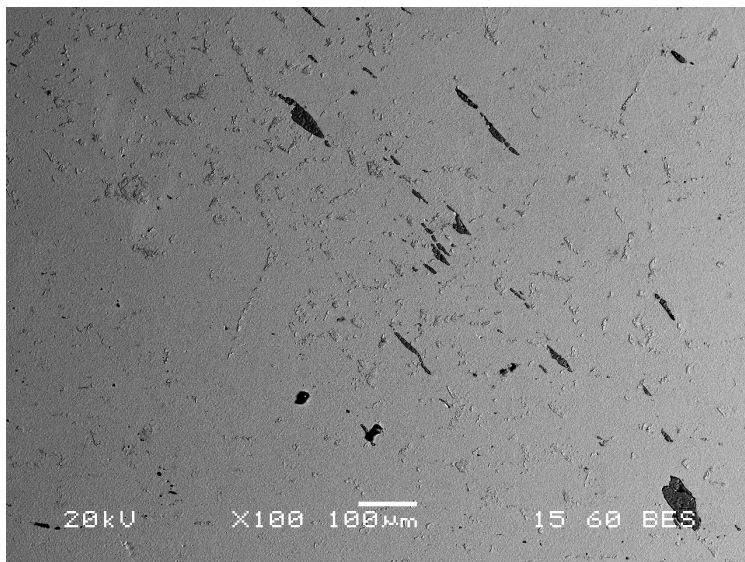
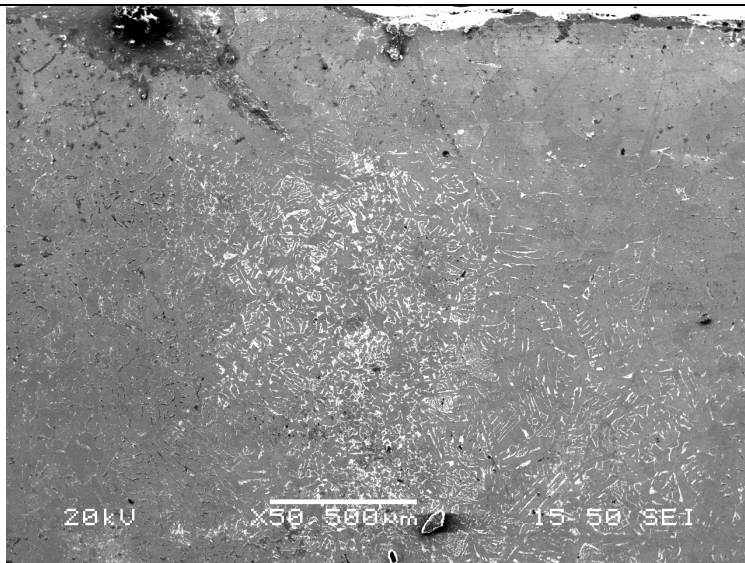




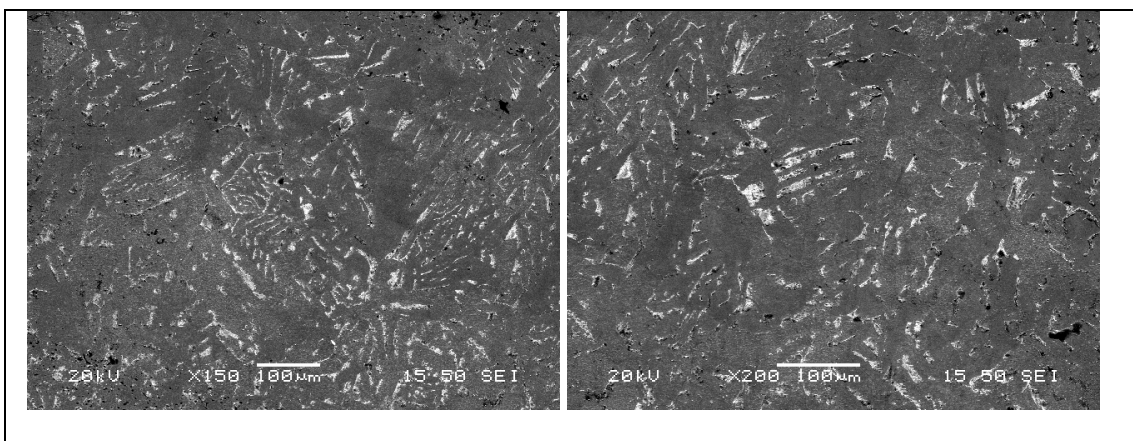
Όλες οι παραπάνω εικόνες μας υποδείχνουν εκτός από τα πολλά εγκλείσματα σκουριάς για το λόγο που αναφέρθηκε, μια καθαρά φερριτική περιοχή στο κέντρο του συνδέσμου. Ακολουθούν εικόνες από την περιοχή του λαιμού:



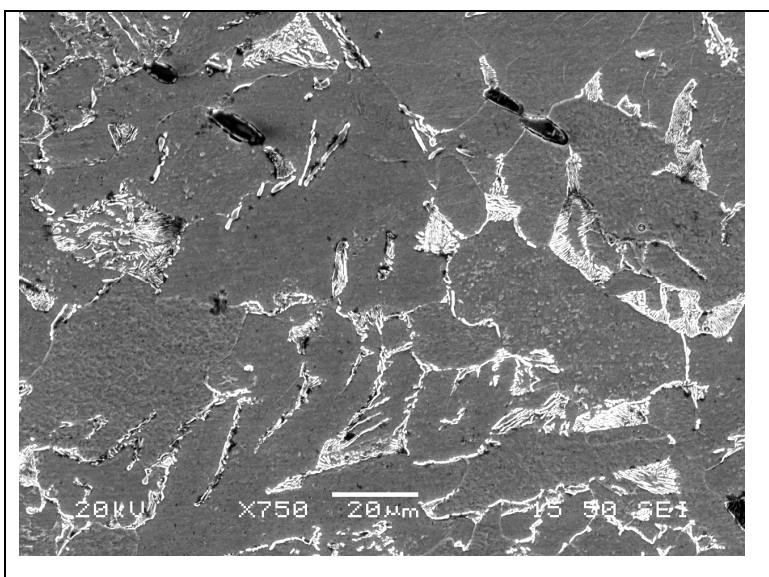
Ο πίνακας μας επιβεβαιώνει το γεγονός ότι ο σύνδεσμος κατά τη διαμόρφωσή του από τον τεχνίτη χωρίστηκε σε δύο τμήματα που αποτέλεσαν τα άκρα του, εάν παρατηρήσουμε τα επίπεδα της σφυρηλασίας. Φανερά διακρίνεται η οξείδωση και η σκουριά όπως επιβεβαιώθηκε προηγουμένως από τη χημική ανάλυση. Δε βλέπουμε καθόλου περλίτη. Η περιοχή είναι φερριτική. Οι εικόνες που ακολουθούν προέρχονται από την αριστερή πλευρά του άκρου.



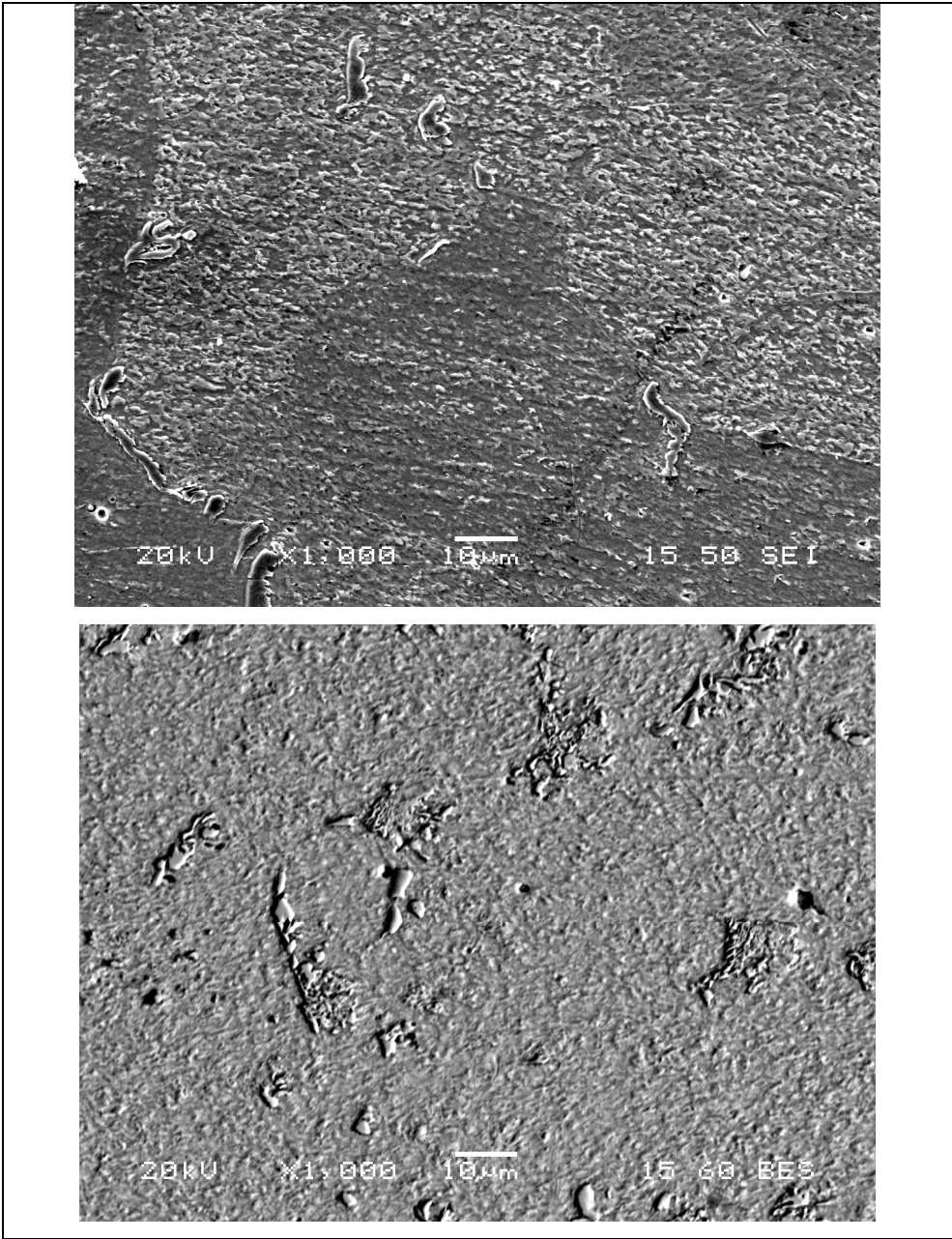
Καθώς κατευθυνόμαστε αριστερά του άκρου παρατηρούμε ότι έχουμε φερρίτη και περλίτη αν και ο περλίτης δεν εμφανίζεται σε μεγάλο ποσοστό. Η παρουσία του περλίτη προέρχεται από την ενανθράκωση του συνδέσμου. Κατά τη σφυρηλασία του δηλαδή, η οποία έγινε σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία, άνθρακας διείσδυσε στο στέλεχος με αποτέλεσμα τη δημιουργία περλίτη. Αυτή η θερμοκρασία ωστόσο μπορεί να μην ήταν αρκετά υψηλή, έτσι ώστε να δημιουργηθεί περισσότερος περλίτης. Η κατεύθυνση της σκουριάς επίσης είναι εμφανής. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα εγκλείσματα είναι πολύ λιγότερα από ότι στην περιοχή του στελέχους, γεγονός που επιβεβαιώνει την παραπάνω θεωρία. Δηλαδή ότι το στέλεχος είναι πολύ λιγότερο σφυρηλατημένο από τα άκρα τα οποία πιθανώς ταλαιπώρησαν τον τεχνίτη να τους δώσει το τελικό τους σχήμα και δουλεύτηκαν πολύ περισσότερο.



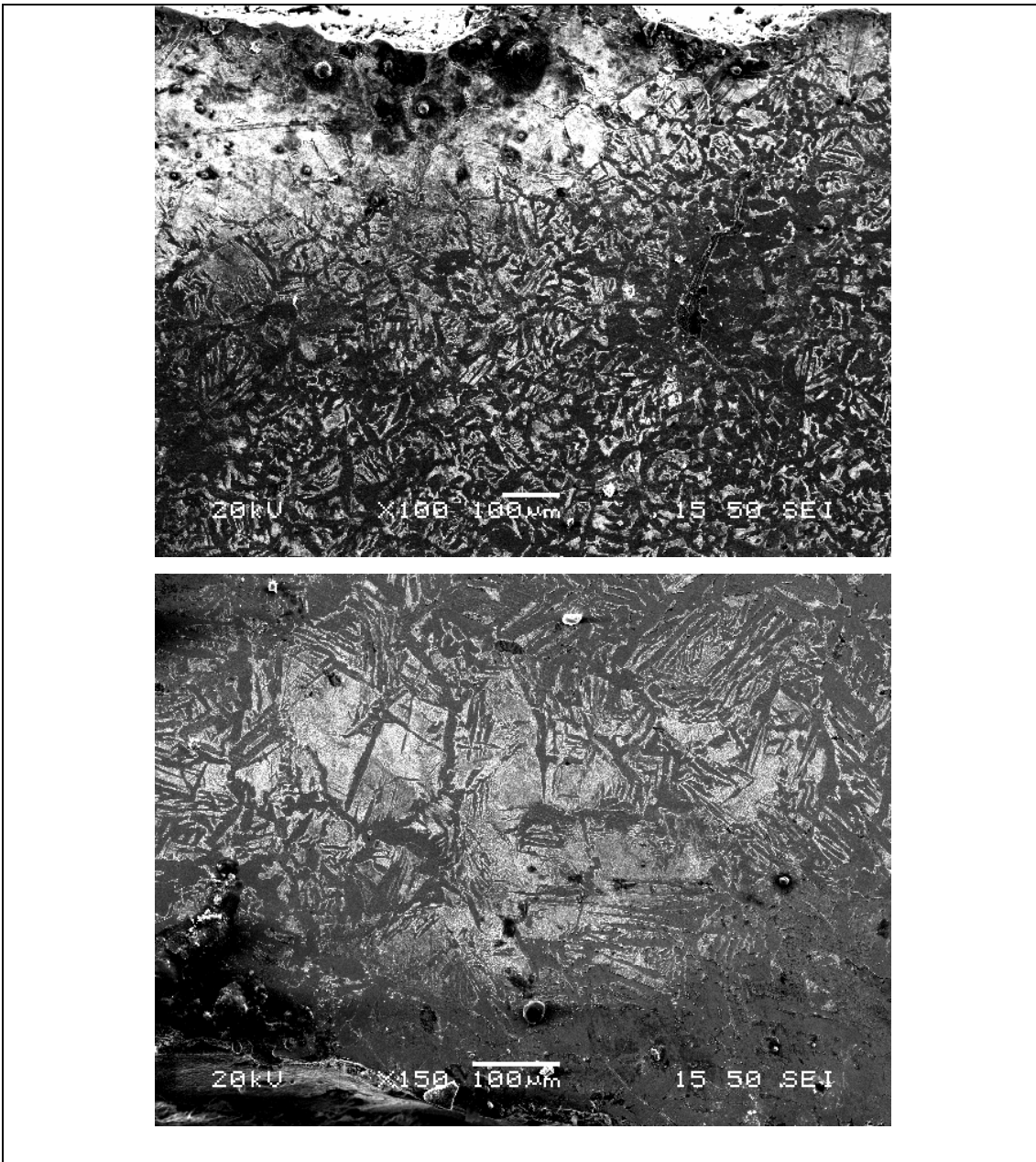
Συνεχίζουμε με το αριστερό τμήμα με πολύ μεγαλύτερες μεγεθύνσεις.





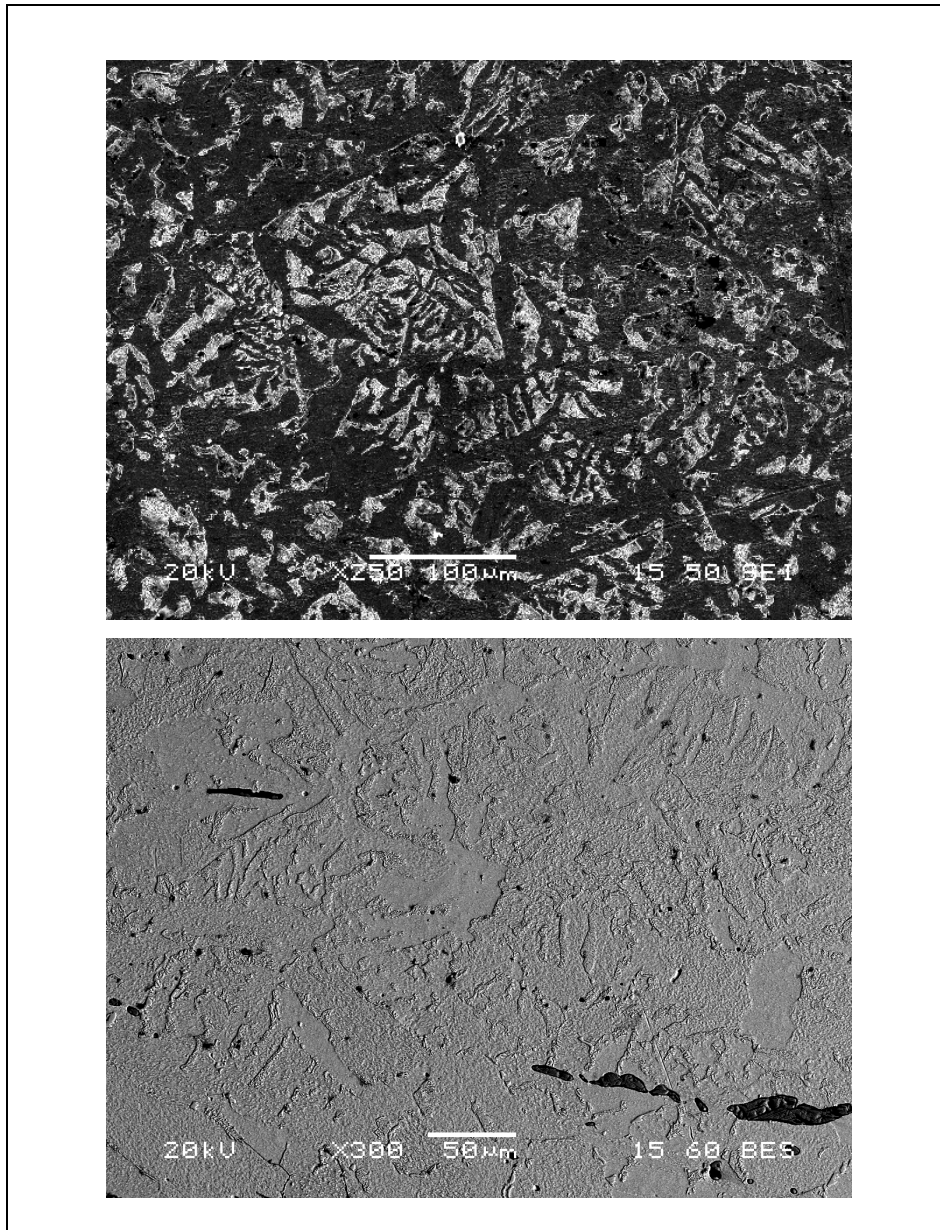


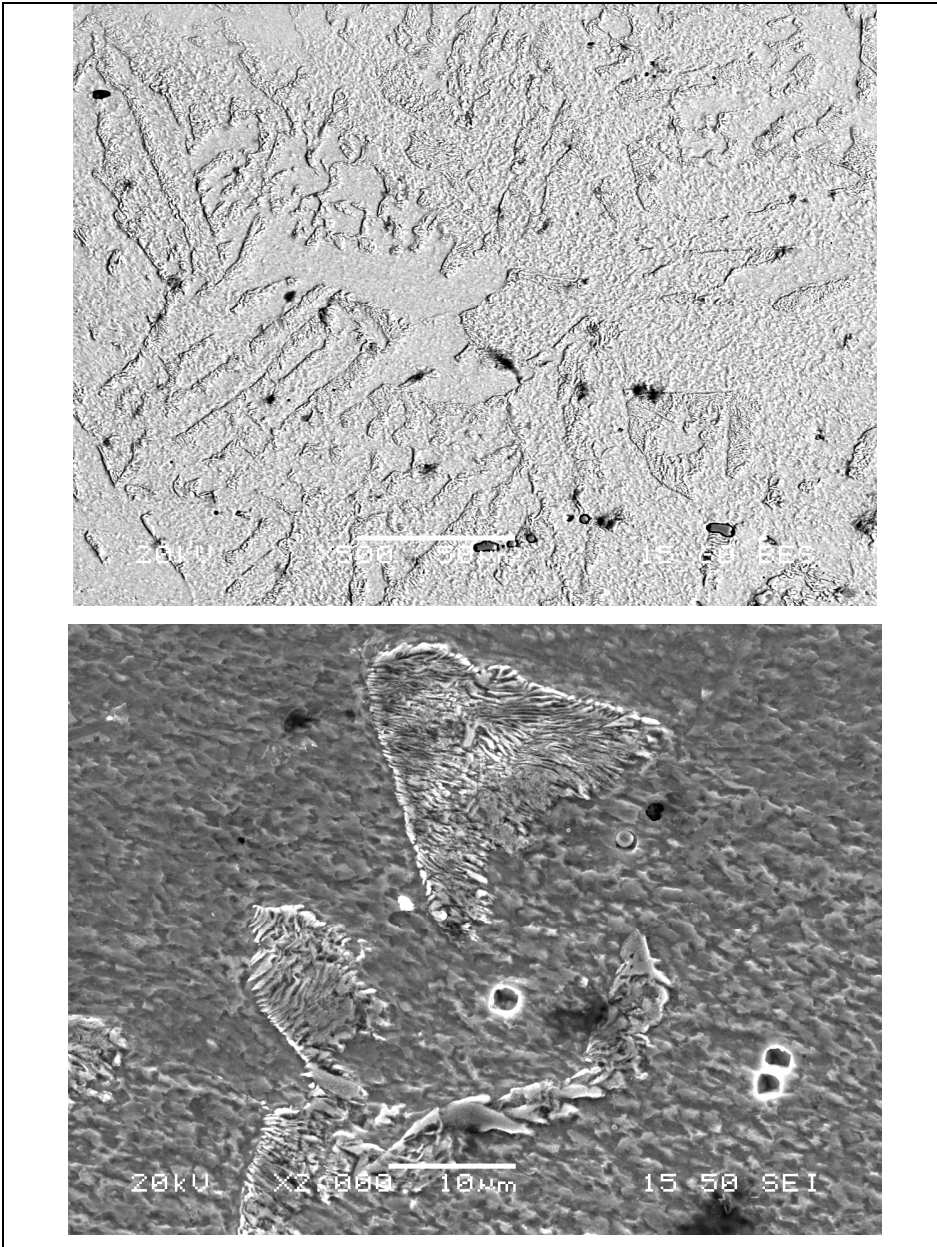
Παρακάτω ακολουθούν εικόνες του δεξιού τμήματος του άκρου.



Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρείται η φερριτοπερλιτική δομή του άκρου. Εδώ είναι αρκετά πιο έντονη η παρουσία του περλίτη και φαίνεται να είναι σε μεγαλύτερο ποσοστό συγκριτικά με την αριστερή πλευρά του άκρου. Αυτό εξηγείται πιθανότατα λόγω της σφυρηλασίας του δεξιού άκρου σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του αριστερού, με αποτέλεσμα να έχω εντονότερη ενανθράκωση κι έτσι να σχηματιστεί περισσότερος περλίτης. Επίσης τα εγκλείσματα της σκουριάς είναι πολύ λιγότερα συγκριτικά με αυτά στο κεντρικό τμήμα του άκρου και της αρχής του στελέχους. Το

γεγονός αυτό επιβεβαιώνει πως το άκρο σφυρηλατήθηκε πολύ περισσότερο από το στέλεχος. Συνεχίζουν φωτογραφίες του δεξιού τμήματος σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις.





Συνοψίζοντας η ηλεκτρονική παρατήρηση του άκρου T2 του συνδέσμου B9 μας οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- ✚ Το άκρο αποτελείται από φερρίτη στο κεντρικό τμήμα του και στο στέλεχός του και από φερρίτη-περλίτη στην αριστερή και δεξιά περιοχή του. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα της ενανθράκωσής του κατά τη σφυρηλασία.
- ✚ Το κέντρο και το στέλεχος δείχνουν έντονη την παρουσία της σκουριάς κάτι που δε συμβαίνει καθώς καταλήγουμε προς την αριστερή και δεξιά πλευρά του, κάτι που αποδεικνύει την πολύ πιο επίμονη σφυρηλασία τους συγκριτικά με το κυρίως στέλεχος του συνδέσμου.

- ✚ Το δεξί τμήμα φαίνεται να έχει περισσότερο περλίτη συγκριτικά με το αριστερό. Πιθανότατα η σφυρηλασία δεν έγινε σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες στην αριστερή πλευρά και δεν παρουσιάζεται έντονη ενανθράκωση συγκρίνοντας με τη δεξιά. Ο περλίτης αριστερά έχει σχηματιστεί οριακά.
- ✚ Το άκρο έχει διαμορφωθεί από το 'χωρισμό' του στελέχους σε δύο τμήματα. Φαίνεται σαν να είναι ανοιγμένος και πουθενά δεν παρατηρείται αναδίπλωση. Αυτό εξηγείται από την παρατήρηση του προσανατολισμού των εγκλεισμάτων της σκουριάς.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

## 4.1 Η ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΪΚΗ ΚΑΙ ΚΛΑΣΙΚΗ ΕΠΟΧΗ

### Περίληψη

Η μελέτη των σιδερένιων συνδέσμων των ναών της Ακρόπολης και ιδίως του Παρθενώνα και εκείνων του Ναού της Τραπεζιάς του 6<sup>ου</sup> αιώνα π. Χ. έχει πολύ μεγάλη σημασία, γιατί αποκαλύπτει την εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα της μεταλλουργίας του σιδήρου από υστεροαρχαϊκή μέχρι την κλασική περίοδο.

### Μακροσκοπική εξέταση και χημική σύνθεση ενός διπλού ταυ από τον ναό της Τραπεζιάς

Στην εικόνα 1 εμφανίζεται η μακροσκοπική μορφή του ενός διπλού ταυ μετά από λείανση, στίλβωση και προσβολή με nital 10%. Εδώ παρατηρείται, ότι αριστερά υπάρχει μία μεγάλη νησίδα σκληρού χάλυβα. Παρόμοιες, αλλά μικρότερες νησίδες υπάρχουν διάσπαρτες, με αποτέλεσμα η σκληρότητα σε Rockwell B να κυμαίνεται από 33 μέχρι 110 HRb, ιδιαίτερα στη μεγάλη νησίδα, όπως δείχνει και η εικόνα 2, λεπτομέρεια της εικόνας 1. Άλλη περιοχή χάλυβα είναι και αυτή της εικόνας 3. Τέλος, στην εικόνα 4 παρατηρείται η συγκόλληση δύο απλών ταυ σε ένα διπλό, όπως και στην περίπτωση των συνδέσμων των ναών της Ακρόπολης.

side B



Εικόνα 4.1. Διπλό Ταυ από το ναό της Τραπεζιάς. Παρατηρούνται α) Νησίδα σκληρού χάλυβα και β) Περιοχή συγκόλλησης.





Εικόνα 4.2. Λεπτομέρεια της εικόνας 1. Νησίδα σκληρού χάλυβα.



Εικόνα 4.3. Νησίδα σκληρού χάλυβα.



Εικόνα 4.4. Λεπτομέρεια της εικόνας 1. Περιοχή συγκόλλησης δύο απλών ται σε ένα απλό διπλό ται.

**Οι περιοχές μαλακού και σκληρού χάλυβα έχουν την ακόλουθη σύνθεση και σκληρότητα**

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1**

	%C	%Mn	%S	%P	%Si	%Ni	%Cr	%Cu	%Al	%Pb	HR <sub>B</sub>
Μαλακός Σίδηρος	0.012	0.045	0.007	0.028	0.062	0.009	0.002	0.071	0.007	0.003	33-56
Σκληρό Χάλυβας	0.33	0.078	0.003	0.010	0.034	0.012	0.003	0.085	0.008	0.005	105-110

Η μεγάλη διαφορά ανάμεσα στη μεταλλουργική τεχνολογία της αρχαϊκής και κλασικής εποχής.

Η διαφορά ανάμεσα στις δύο εποχές οφείλεται ακριβώς στο ότι στην αρχαϊκή εποχή χρησιμοποιούσαν έναν σίδηρο, όπως προερχόταν από την κάμινο παραγωγής (εικόνα 1), δηλαδή μαλακό σίδηρο με χαμηλό άνθρακα με νησίδες σκληρού χάλυβα. Αντίθετα, στην κλασική εποχή γνώριζαν να παράγουν χωριστά μαλακό σίδηρο με χαμηλό άνθρακα και σκληρό χάλυβα με υψηλό άνθρακα, όπως δείχνουν οι εικόνες, που ακολουθούν. Για παράδειγμα, στην εικόνα 5 εμφανίζεται ένας διπλός σιδερένιος σύνδεσμος του από τον Παρθενώνα. Στην εικόνα 6 το σκαρίφημα δείχνει, πως προστατευόταν ο σύνδεσμος μέσα σε μόλυβδο, ενώ στην εικόνα 7 φαίνεται το σημείο συγκόλλησής του με ένα άλλο απλό του προς ένα διπλό. Αξίζει να σημειωθεί, ότι μετά τη μακροσκοπική εξέτασή του, φαίνονται οι δύο ποιότητες, α) του μαλακού σιδήρου (λευκό χρώμα), συγκολλημένου εξωτερικά με δύο φύλλα σκληρού χάλυβα (μαύρο χρώμα). Η συνύπαρξη μαλακού και σκληρού χάλυβα κάνει να φαίνεται η συγκόλληση ευκρινέστερη από την περίπτωση του αρχαϊκού συνδέσμου

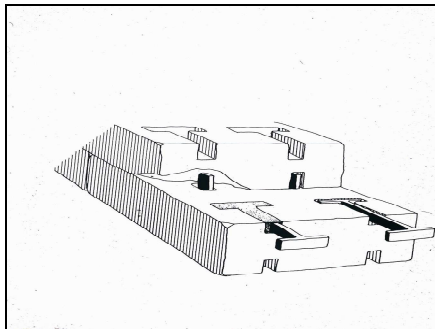
(εικόνα 3), όπου δεν υπάρχουν διακριτές περιοχές σιδήρου και χάλυβα για τους αναφερθέντας λόγους.

Εικόνα 4.5



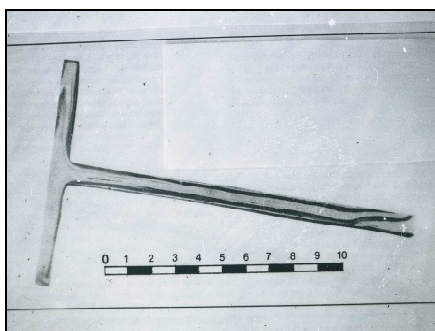
Σιδερένιο διπλό ταυ από τον Παρθενώνα.

Εικόνα 4.6



Σκαρίφημα, που δείχνει τον τρόπο τοποθέτησης των σιδερένιων διπλών ταφ και των γόμφων, καλυμμένων με μόλυβδο.

Εικόνα 4.7



Μακροσκοπική εξέταση ενός συνδέσμου μετά τη λείανση, στίλβωση και προσβολή με Nitral 10%. Εμφανίζεται η μακροσκοπική δομή του σιδερένιου ταφ, όπου μία μαλακή σιδερένια στρώση έχει συγκολληθεί ανάμεσα σε δύο σκοτεινόχρωμες χαλύβδινες στρώσεις με σφυρηλασία σε μια θερμοκρασία περίπου 1250°C-1300°C.

## *Γενικά Συμπεράσματα*

Από τη μεταλλουργική μελέτη των σιδερένιων συνδέσμων του Ναού της Τραπεζιάς συνάγονται τα ακόλουθα ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

- 1) Όλοι οι σύνδεσμοι παρήχθησαν από μεταλλεύματα σιδήρου της Λακωνίας, τα οποία είναι πλούσια σε σίδηρο και το πιο σημαντικό δεν περιέχουν παρά μόνο σε ίχνη ξένες βλαβερές για το παραγόμενο μέταλλο ενώσεις θείου και φωσφόρου. Παλαιότερες μελέτες των σιδερένιων συνδέσμων του Παρθενώνα έδειξαν, ότι και εκεί είχε χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη μέταλλευμα σιδήρου από την Λακωνία. Το ίδιο ισχύει και για τους σιδερένιους τρίποδες της Ολυμπίας, που μελέτησα το 1979 και παρουσίασα τη μελέτη μου ως διατριβή επί υφηγεσία.
- 2) Τα μεταλλεύματα σιδήρου, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων του της Τραπεζιάς και των ναών της Ακρόπολης αποτελούν τα μόνα κοινά σημεία ανάμεσα στη τεχνολογία της Αρχαϊκής και της μετέπειτα κλασικής εποχής.

Οι κύριες διαφορές ανάμεσα στις δύο εποχές, Αρχαϊκή και κλασική, όπως αναφέρθηκε οφείλονται στο ότι στην περίπτωση του Παρθενώνα και του Ερεχθείου, οι σύνδεσμοι είχαν κατασκευαστεί από δύο διακριτά είδη σιδήρου: α) μαλακό σίδηρο και β) σκληρό χάλυβα. Ποια είναι η διαφορά; Ο μαλακός σίδηρος περιέχει ελάχιστο άνθρακα, ενώ ο χάλυβος είναι ένα κράμα σιδήρου και άνθρακα. Και στις δύο περιπτώσεις, ο άνθρακας δε βρίσκεται με τη μορφή του ελεύθερου άνθρακα, αλλά ως μία ένωση σιδήρου και άνθρακα. Η ένωση αυτή, δηλαδή ο χάλυβας, αποκτά τη μαγική ιδιότητα να σκληραίνει, όταν πυρακτωμένος βυθιστεί απότομα στο νερό ή στο λάδι, τη γνωστή διαδικασία της βαφής. Αυτή η μαγική ιδιότητα επηρέασε τον Όμηρο τόσο πολύ, που την αναφέρει, όταν κάνει παραλληλισμό ανάμεσα στη σκλήρυνση του χάλυβα και την τύφλωση του Πολύφημου από τον πανούργο Οδυσσέα και τους συντρόφους του. «...Πως, όταν το σκεπάρνι του για το τρανό πελέκι χώνει στο κρύο το νερό χαλκιάς (βέβαια πυρακτωμένο), χοχλοβουίζει εκείνο και δύναμη στο σίδηρο γεννώντας, έτσι τσίριζε το μάτι (του Πολύφημου) στο λιόξυλο τριγύρω.»

Οι Αθηναίοι λοιπόν τεχνίτες γνώριζαν να παράγουν χωριστά μαλακό σίδηρο με ελάχιστο άνθρακα και σκληρό χάλυβα. Αυτές, λοιπόν, τις δυο ποιότητες, τις συγκολλούσαν μεταξύ τους με σφυρηλάτηση σε υψηλές θερμοκρασίες (1200<sup>0</sup> – 1300<sup>0</sup>C). Είναι οι θερμοκρασίες στις οποίες ο χάλυβας βγάζει σπίθες, είναι πολύ μαλακός και συγκολλιέται κατά το γνωστό: Το σίδηρο στη βράση του κολλάει.

Αντίθετα, στην περίπτωση του Ναού της Τραπεζιάς οι μεταλλοτεχνίτες της αρχαϊκής εποχής παρήγαν ένα σίδηρο, που περιείχε εδώ και εκεί νησίδες σκληρού χάλυβα.

Με άλλα λόγια δεν γνώριζαν στην εποχή τους να παράγουν χωριστά μαλακό σίδηρο και σκληρό χάλυβα, αλλά ό,τι έβγαινε από το καμίνι. Αυτή είναι η μεγάλη διαφορά ανάμεσα στην τεχνολογία της αρχαϊκής και κλασικής περιόδου και αποτελεί μια σοβαρή μεταλλουργική πρόοδο.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να τονίσω, ότι η παρούσα έρευνα έδειξε τη μεγάλη τεχνολογική διαφορά ανάμεσα στην τεχνολογία της αρχαϊκής και εκείνης των κλασικών χρόνων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**



## 5. ΣΥΝΟΨΗ

Η μελέτη των σιδερένιων συνδέσμων του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα περιελάμβανε τα εξής στάδια:

- Μακροσκοπική μελέτη των συνδέσμων αφού έχουν προετοιμαστεί με λείανση και χημική προσβολή.
- Σκληρομέτρηση των συνδέσμων σε όλο το μήκος τους.
- Εξέταση στο οπτικό μικροσκόπιο αφού έχει προηγηθεί κοπή και των δύο άκρων του κάθε συνδέσμου καθώς και λείανση και χημική προσβολή του κάθε ενός από αυτά.
- Χημική ανάλυση των άκρων των συνδέσμων Α5.
- Εξέταση του άκρου Β9 στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα από το κάθε στάδιο αυτής της έρευνας, σε συνδυασμό με τη γνώση της Αρχαιομεταλλουργίας εκείνης της εποχής διεξήχθησαν όλα τα συμπεράσματα για την κατασκευή τους.

Οι σύνδεσμοι όπως αποδείξαμε δεν κατασκευάστηκαν σύμφωνα με κάποιες προδιαγραφές από τον κάθε τεχνίτη. Επίσης παρατηρήσαμε ότι ο χρησιμοποιηθείς σίδηρος δεν παρουσιάζει νησίδες χάλυβα, αλλά αποτελείται από στρώσεις σιδήρου, συγκολλημένες εν θερμώ με σφυρηλασία σε υψηλή θερμοκρασία ( περίπου 1200° C). Ακόμα και η περιοχή του χάλυβα είναι ενιαία σαν μια μελανή στρώση συγκολλημένη ανάμεσα σε μαλακές στρώσεις σιδήρου. Η παρατήρηση αυτή δείχνει, ότι η εφαρμοσθείσα τεχνολογία για την κατασκευή των συνδέσμων του Επικούριου Απόλλωνα συγκριτικά με εκείνη της αρχαϊκής εποχής είναι κατά πολύ ανώτερη. Όσον αφορά τη διαμόρφωσή τους οι σύνδεσμοι στα άκρα τους είναι ανοιγμένοι σε δύο τμήματα και πουθενά δεν παρουσιάζεται αναδίπλωση. Οι συνθήκες παραγωγής τους είναι γνωστές από την γνώση της μεταλλουργίας της εποχής. Γνωρίζουμε πως τότε ο μεταλλουργός παρήγαγε τον καθαρό σίδηρο σε διάπυρη μορφή μιας και δεν έφτανε το σημείο τήξης του. Στη συνέχεια το διαμόρφωνε θερμαίνοντας και σφυρηλατώντας το συνεχώς. Εκτός από τη γνώση της θεωρίας αυτής το γεγονός αυτό διασταυρώθηκε κατά τη μελέτη των άκρων στο οπτικό και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Παρατηρήθηκαν αρκετές φορές κόκκοι πολύ μεγάλου μεγέθους που αποδείκνυαν τη συνεχή θέρμανσή τους. Παρατηρήθηκε απουσία σκουριάς στο άκρο του Β9 στη μελέτη του στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σε αντίθεση με την έντονη παρουσία της στο στέλεχος, κάτι που αποδεικνύει την έντονη σφυρηλασία του άκρου. Επίσης κεντρικά υπήρχε φερρίτη ενώ προχωρώντας προς τα άκρα συναντούσαμε όλο και περισσότερο περλίτη, γεγονός που μας

αποδεικνύει την ενανθράκωση του συνδέσμου κατά τη σφυρηλασία του σε υψηλή θερμοκρασία. Τέλος ταυτοποιήθηκε η προέλευση του μεταλλεύματος σιδήρου μιας και έγινε διαπίστωση της υψηλής καθαρότητάς του σε σίδηρο από τη χημική ανάλυση της οποίας τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την καθαρότητα των μεταλλευμάτων της εποχής. Τα μεταλλεία της Λακωνίας συνεπώς καθώς παρήγαγαν άριστης ποιότητας μετάλλευμα, αλλά ήταν και τα πιο κοντινά, αποδείχθηκε ότι ήταν αυτά που έδωσαν την πρώτη ύλη στους μεταλλοτεχνίτες.

Συγκριτικά με συνδέσμους άλλων ναών αυτοί του Επικούριου Απόλλωνα αποτελούνται από ένα μόνο κομμάτι σιδήρου, αποτελούνται από στρώσεις χάλυβα και όχι νησίδες και τέλος ο σίδηρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν μικρότερων διαστάσεων και χωρίς την ύπαρξη συγκόλλησης ανάμεσα σε δύο απλά προς ένα διπλό ταυ, όπως στην περίπτωση του υστεροαρχαϊκού ναού της Τραπεζιάς και των ναών του Παρθενώνα και του Ερεχθείου.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### ***A.ΒΙΒΛΙΑ***

1. Goffer ZVI. 1980. "Obsidian trade in Mediterranean Sea Area" in "The Archaeological Chemistry: a sourcebook on the application of chemistry to Archaeology", Advances in Chemistry Series, 55, Willey, New York, 84-87.
2. Forbes R.J. 1964 "Studies in ancient technology", Netherlands.
3. Tylecote R.F. , 1987. "The early history of metallurgy in Europe", Longman, London.
4. Βαρουφάκης Γιώργος, Η Ιστορία του Σιδήρου από τον Όμηρο στον Ξενοφώντα, Ελληνικά Γράμματα, Αθήνα 2005
5. R.F. Tylecote: Bull. HMG, 1972
6. K.R. MAXWELL-HYSLOP and H.W.M. Hodges: Iraq, 1966
7. M.A. FRANCE-LANORD: RHS 1963
8. SIR F. PETRIE: 'Naukratis, Pt.' 1866, Third Memoir, London, Egypt Exploration Fund
9. R. PLEINER: 'Ironworking in ancient Greece', 1969, Prague, National Technical Museum
10. H. BLUMNER: 'Technologie und terminologie der gewerbe und kunste bei Griechen und Romern', 152, 1886-7, vol.4, Leipzig
11. C.J. LIVADEFS: J. Iron Steel Ins., 1956, 182, 49
12. R. PLEINER: 'The beginnings of the Iron Age in ancient Persia', 1967, Prague, National Technical Museum
13. Τσάιμου Κ.Γ., Αρχαιογνωσία των Μετάλλων, Αρχαία Μεταλλευτική και Μεταλλουργική Τεχνική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1997
14. Τσάιμου Κ.Γ. Κατεργασίες των Μετάλλων στην Αρχαιότητα, Αθήνα 1999
15. The Metallography And Heat Treatment Of Iron And Steel, Albert Sauver, Mc GRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. New York and London, 1935.
16. Μεταλλογνωσία, Κ. Κωνοφάγου, ΕΘΝΙΚΟΝ ΜΕΤΣΟΒΙΟΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΝ, ΑΘΗΝΑΙ 1974.
17. Μεταλλοτεχνία, Γ.Δ. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Ε.Μ.Π.)
18. R.F. Tylecote, A History of Metallurgy, 1976, London
19. Φυσική Μεταλλουργία Σιδήρου και Χάλυβα, Χαϊδεμενόπουλος.

### ***B. ΑΡΧΑΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ***

1. Θουκυδίδης Ιστορία 1-6. Εισαγωγή-Μετάφραση-Σχόλια, Αναστάσιος Γεωργοπαπαδάκος και Loeb 1.
2. Ησίοδος, Έργα και Ημέραι
3. Ομήρου Ιλιάδα
4. Ομήρου Οδύσσεια
5. Ηροδότου Ιστορία, Εισαγωγή –Μετάφραση-Σχόλια Αδ. Θεοφίλου, Επιστημονική Εταιρεία των Ελληνικών Γραμμάτων Πάπυρος, Αθήναι 1953.

#### ***Γ. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ***

1. <http://www.tdpeae.gr/index.php?ID=KIqQe4npXjQ9hzaE>
2. [http://www.messinia.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=373&Itemid=102&lang=el](http://www.messinia.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=373&Itemid=102&lang=el)
3. [http://www.culture.gr/h/2/gh2560.jsp?obj\\_id=1142&page=3](http://www.culture.gr/h/2/gh2560.jsp?obj_id=1142&page=3)
4. <http://arcadia.ceid.upatras.gr/arkadia/archsites/xwroi/epik.htm>
5. <http://www.kairatos.com.gr/afieromata/epikoyrapolon.htm>
6. <http://olympia.gr/>