

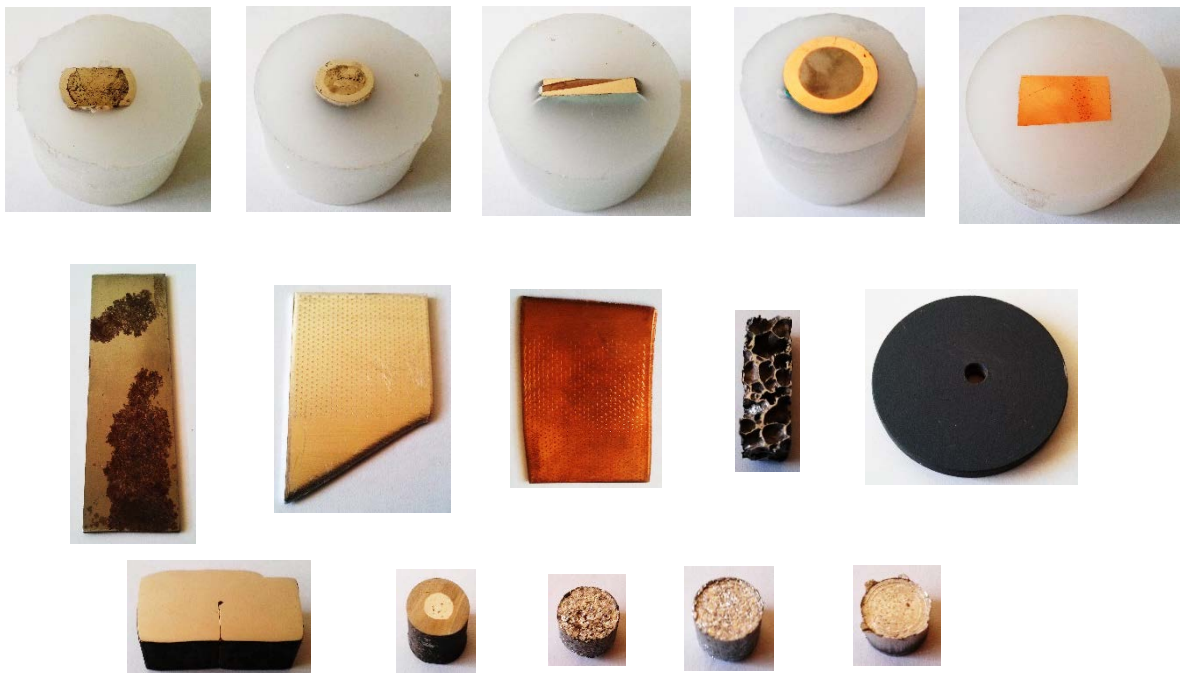


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



ΓΑΒΑΛΑΣ ΘΕΟΦΑΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

.....

Γαβαλάς Θεοφάνης

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα για την εργασία καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας αλλά και για την πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Πρέσσαγια την βοήθειά του στην εκτέλεση των πειραμάτων, την καθοδήγησή του και την εποικοδομητική συνεργασία κατά την εκπόνησή της.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

Θεοφάνης Γαβαλάς
Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την μεταλλογραφική παρατήρηση μεταλλικών δοκιμίων που έχουν κατασκευασθεί με διάφορες τεχνικές όπως εκρηκτική συμπύεση, κονιομεταλλουργία και δοκίμια από καθαρά μέταλλα που παρουσιάζουν ελαττώματα είτε λόγω κατασκευής είτε μετά από κάποια δοκιμή αντοχής. Σκοπός της εργασίας είναι ο χαρακτηρισμός των ατελειών και ελαττωμάτων που παρατηρήθηκαν μετά την κατάλληλη προετοιμασία των δοκιμίων, σύγκριση με τα συνήθη ελαττώματα που παρουσιάζονται σε παρόμοιες καταστάσεις και πρόταση τεχνικών περιορισμού ή και αποφυγής των συγκεκριμένων ελαττωμάτων.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή στη μεταλλογραφία και μια ιστορική αναδρομή της τεχνικής, ενώ γίνεται αναφορά στην μικροανάλυση και την μακροσκοπική εξέταση των δοκιμίων.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** ασχολείται με την παρουσίαση των δοκιμίων που επιλέχθηκαν για εξέταση, την ονοματολογία της πληθώρας των δεδομένων που λήφθηκαν και περιγραφή του εξοπλισμού του εργαστηρίου για την προετοιμασία των δοκιμίων προκειμένου να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η μεταλλογραφική παρατήρηση.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλυτικά τα δοκίμια που εξετάζονται, με τον τρόπο από τον οποίο έχουν προέλθει, την διαδικασία προετοιμασίας που πραγματοποιήθηκε σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, τις φωτογραφίες που λήφθηκαν από το οπτικό μικροσκόπιο και οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από αυτές.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** κατηγοριοποιούνται τα δοκίμια και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα από τις παρατηρήσεις του προηγούμενου κεφαλαίου. Τέλος, προτείνονται τεχνικές περιορισμού των σφαλμάτων που παρατηρήθηκαν και συγκρίνονται με την βιβλιογραφία.

Τέλος, στο **παράρτημα** ακολουθεί η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή της εργασίας, αλλά και την κατανόηση του αντικειμένου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... | 3 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 4 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ..... | 5 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ..... | 8 |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ..... | 8 |
| 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ..... | 11 |
| 1.3 ΜΑΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ..... | 17 |
| 1.3.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΟΜΕΩΝ..... | 18 |
| 1.3.2 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΘΡΑΥΣΗΣ..... | 22 |
| 1.4 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ..... | 37 |
| 1.4.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ..... | 38 |
| 1.4.2 ΜΙΚΡΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ..... | 44 |
| 1.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ..... | 50 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 63 |
| 2.1 ΓΕΝΙΚΑ..... | 63 |
| 2.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..... | 63 |
| 2.3 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..... | 64 |
| 2.4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ..... | 65 |
| 2.4.1 ΚΟΠΤΙΚΟΣ ΤΡΟΧΟΣ..... | 65 |
| 2.4.2 ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..... | 66 |
| 2.4.3 ΛΕΙΑΝΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..... | 67 |
| 2.4.4 ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ..... | 69 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..... | 70 |
| 3.1 ΓΕΝΙΚΑ..... | 70 |
| 3.2 ΔΟΚΙΜΙΟ Α..... | 70 |
| 3.2.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ..... | 70 |
| 3.2.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ..... | 70 |
| 3.2.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ..... | 71 |
| 3.2.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... | 74 |
| 3.3 ΔΟΚΙΜΙΟ Β..... | 75 |
| 3.3.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ..... | 75 |
| 3.3.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ..... | 75 |
| 3.3.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ..... | 76 |
| 3.3.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... | 79 |
| 3.4 ΔΟΚΙΜΙΟ Γ..... | 80 |
| 3.4.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ..... | 80 |
| 3.4.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ..... | 80 |
| 3.4.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ..... | 81 |
| 3.4.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... | 84 |

| | | |
|--------|---------------------------------|-----|
| 3.5 | ΔΟΚΙΜΙΟ Δ | 85 |
| 3.5.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 85 |
| 3.5.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 85 |
| 3.5.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 86 |
| 3.5.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 89 |
| 3.6 | ΔΟΚΙΜΙΟ Ε | 90 |
| 3.6.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 90 |
| 3.6.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 90 |
| 3.6.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 91 |
| 3.6.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 91 |
| 3.7 | ΔΟΚΙΜΙΟ Ζ | 92 |
| 3.7.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 92 |
| 3.7.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 92 |
| 3.7.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 93 |
| 3.7.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 93 |
| 3.8 | ΔΟΚΙΜΙΟ Η | 94 |
| 3.8.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 94 |
| 3.8.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 94 |
| 3.8.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 95 |
| 3.8.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 95 |
| 3.9 | ΔΟΚΙΜΙΟ Θ | 96 |
| 3.9.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 96 |
| 3.9.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 96 |
| 3.9.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 97 |
| 3.9.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 97 |
| 3.10 | ΔΟΚΙΜΙΟ Ι | 98 |
| 3.10.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 98 |
| 3.10.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 98 |
| 3.10.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 99 |
| 3.10.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 99 |
| 3.11 | ΔΟΚΙΜΙΟ Κ | 100 |
| 3.11.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 100 |
| 3.11.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 100 |
| 3.11.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 101 |
| 3.11.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 104 |
| 3.12 | ΔΟΚΙΜΙΟ Λ | 105 |
| 3.12.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 105 |
| 3.12.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 105 |
| 3.12.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 106 |
| 3.12.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 109 |
| 3.13 | ΔΟΚΙΜΙΟ Μ | 110 |
| 3.13.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 110 |
| 3.13.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 110 |
| 3.13.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 111 |
| 3.13.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 111 |
| 3.14 | ΔΟΚΙΜΙΟ Ν | 112 |
| 3.14.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 112 |
| 3.14.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 112 |
| 3.14.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 113 |
| 3.14.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 113 |
| 3.15 | ΔΟΚΙΜΙΟ Ξ | 114 |
| 3.15.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 114 |
| 3.15.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 114 |
| 3.15.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ | 115 |
| 3.15.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 115 |

| | | |
|--------|--------------------------------------|-----|
| 3.16 | ΔΟΚΙΜΙΟ Ο | 116 |
| 3.16.1 | ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 116 |
| 3.16.2 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ | 116 |
| 3.16.3 | ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ..... | 117 |
| 3.16.4 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... | 117 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....118

| | | |
|-----|-----------------------------------|-----|
| 4.1 | ΓΕΝΙΚΑ | 118 |
| 4.2 | ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ..... | 118 |
| 4.3 | ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ | 119 |
| 4.4 | ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΑΘΑΡΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ | 120 |
| 4.5 | ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ | 120 |
| 4.6 | ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ..... | 120 |
| 4.7 | ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΠΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΑΦΡΟ | 121 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....122

| | | |
|-----|------------------------------|-----|
| Π.1 | ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 122 |
| Π.2 | ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 124 |
| Π.3 | ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ | 125 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ

Μεταλλογραφία είναι η επιστήμη που εξετάζει και προσδιορίζει τη σύσταση και την βασική δομή (ή τις χωρικές σχέσεις μεταξύ) των στοιχείων των μετάλλων, των κραμάτων και των υλικών(materialography). Η εξέταση της δομής μπορεί να γίνει σε ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων μεγέθυνσης, που κυμαίνονται από μια οπτική ή χαμηλής μεγέθυνσης εξέταση (~20x) έως μεγεθύνσεις πάνω από 1.000.000x με ηλεκτρονικά μικροσκόπια. Η μεταλλογραφία μπορεί επίσης να περιλαμβάνει την εξέταση της κρυσταλλικής δομής με τεχνικές όπως η περίθλαση ακτινών Χ. Παρόλα αυτά το πιο συνηθισμένο εργαλείο της μεταλλογραφίας είναι το οπτικό μικροσκόπιο, με μεγεθύνσεις που κυμαίνονται από ~50 έως 1000x και την δυνατότητα να αναλύει χαρακτηριστικά μικροδομής από ~0,2μm ή μεγαλύτερα.

Το άλλο σημαντικό εξεταστικό εργαλείο της μεταλλογραφίας είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Συγκρινόμενο με το οπτικό μικροσκόπιο, το SEM διευρύνει το εύρος της ανάλυσης με περισσότερο από δυο βαθμούς μεγέθυνσης, περίπου 4 nm στα συνηθισμένα όργανα, στα καλύτερα κάτω από 1 nm. Η συνήθης μεγέθυνση καλύπτει το εύρος του στερεοσκοπικού μικροσκοπίου, όλο το φάσμα του οπτικού μικροσκοπίου και ένα μεγάλο μέρος του εύρους του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου μετάδοσης (TEM) για προβολή από 1.000 x έως > 100.000 x. Το SEM, παρέχει επίσης, ένα μεγαλύτερο βάθος πεδίου από το οπτικό μικροσκόπιο, με το βάθος της εστίασης να κυμαίνεται από 1 μm σε 10.000 x έως 2 χιλιοστά σε 10 X, η οποία είναι μεγαλύτερη κατά περισσότερο από δύο τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με το οπτικό μικροσκόπιο (Πίνακας 1). Αυτό το μεγαλύτερο βάθος πεδίου επιτρέπει την καλύτερη παρατήρηση των τοπολογικών χαρακτηριστικών κατά τη διάρκεια μιας μικροσκοπικής έρευνας, όπως είναι η εξέταση της επιφάνειας θραύσης κατά την ανάλυση αστοχίας. Το βάθος πεδίου του SEM, είναι ένα επιπλέον στοιχείο για να το επιλέξουμε κατά τη μακροσκοπία, όταν πολύ τραχιές επιφάνειες εξετάζονται σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Πίνακας 1.1: Βάθος πεδίου των στόχων ενός τυπικού οπτικού μικροσκοπίου

| Τελική μεγέθυνση, διάμετροι | Στόχοι | | Τόπος Πεδίου ^(a) (μm) | Βάθος πεδίου(μm) |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| | Μεγέθυνση, διάμετροι | Διάφραγμα | | |
| 100 | 5.6 | 0.20 ^(b) | 1000 | 20 |
| 250 | 8.0 | 0.40 ^(b) | 400 | 3 |

| | | | | |
|------|------|---------------------|-----|-----|
| 500 | 21.0 | 0.65 ^(b) | 200 | 1 |
| 750 | 41.0 | 0.85 ^(b) | 135 | 0.4 |
| 1000 | 58.0 | 0.95 ^(b) | 100 | 0.1 |
| | 50.0 | 1.0 ^(c) | 100 | 0.6 |
| 1500 | 75.0 | 1.4 ^(c) | 65 | 0.2 |

(α) Για μια προβαλλόμενη τελική εικόνα 10 εκ. (4 ίντσες) σε διάμετρο.

(β) Στεγνό αντικείμενο.

(γ) Βυθισμένο σε έλαιο αντικείμενο.

Ωστόσο, ακόμη και με την έλευση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, το οπτικό μικροσκόπιο εξακολουθεί να είναι η πρώτη και πιο σημαντική συσκευή εξέτασης στη μεταλλογραφία. Μερικές φορές, η αντίθεση σε μια μικροδομή είναι ανεπαρκής με SEM κάτω των 500×, ενώ είναι ορατή με ένα βασικό οπτικό μικροσκόπιο και ένα κατάλληλα προετοιμασμένο δείγμα. Πράγματι, η οπτική μικροσκοπία είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της μεταλλογραφίας, όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα «Η προέλευση της μεταλλογραφίας», στην οποία συνοψίζεται η βασική ανακάλυψη από τον Sorby που καταδεικνύει τη σημασία της προετοιμασίας του δείγματος κατά την εξέταση των μετάλλων με ένα οπτικό μικροσκόπιο. Η αντίθεση μεταξύ των μικροδομικών συστατικών στην οπτική μικροσκοπία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την προετοιμασία του δοκιμίου. Τα οπτικά μικροσκόπια έχουν διάφορους τρόπους φωτισμού που μπορούν να αυξήσουν τις πληροφορίες που αποκτώνται από την εικόνα. Για παράδειγμα, ο φωτισμός πολωμένου φωτός μπορεί να βελτιώσει την αντίθεση φάσης και η μέθοδος αντίθεσης διαφορικής παρέμβασης (DIC) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό τοπολογικών υψομετρικών διαφορών στην επιφάνεια του δοκιμίου μικρότερων των 2μm . Ο στόχος αυτών των εργαλείων είναι να αποκαλύψουν με ακρίβεια τη δομή του υλικού στην επιφάνεια ενός δοκιμίου ή / και από μία διατομή του δοκιμίου. Η εξέταση μπορεί να γίνει σε μακροσκοπικό, μεσοσκοπικό, ή / και μικροσκοπικό επίπεδο. Για παράδειγμα, εγκάρσιες διατομές που κόπηκαν από ένα συστατικό ή ένα δείγμα μπορεί να εξεταστούν μακροσκοπικά με οπτικό φωτισμό προκειμένου να αποκαλύψουν διάφορα σημαντικά μακροδομικά χαρακτηριστικά (της τάξης από 1 mm έως 1 m) τέτοια όπως:

- Γραμμές ροής σε σφυρήλατα προϊόντα.
- Δομές στερεοποίησης σε χυτά προϊόντα.
- Χαρακτηριστικά συγκόλλησης, συμπεριλαμβανομένου του βάθους της εισχώρησης, του μέγεθους της ζώνης τήξεως και του αριθμού των περασμάτων, του μεγέθους της ζώνης θερμικής επιρροής, καθώς και του τύπου και τη πυκνότητα των ατελειών συγκόλλησης.

- Το μέγεθος και τη κατανομή των μεγάλων εγκλεισμάτων και νευρώσεων.
- Κατασκευαστικών ατελειών, όπως πτυχώσεις, εν ψυχρώ συγκολλήσεις και ραφές, σε σφυρήλατα προϊόντα.
- Πορώδης κατάσταση προερχόμενη από παγιδευμένο αέρα ή συρρίκνωση σε χυτά προϊόντα.
- Το βάθος και την ομοιομορφία του σκληρού στρώματος σε επιχαλυβδωμένο προϊόν.

Η μακροσκοπική εξέταση μιας επιφάνειας είναι επίσης απαραίτητη για την αξιολόγηση της κατάστασης ενός υλικού ή την αιτία της αστοχίας του. Αυτή μπορεί να περιλαμβάνει:

- Τον χαρακτηρισμό των μακροδομικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας θραύσης για τον εντοπισμό της θέσης έναρξης της ρωγμής και τις μεταβολές στη διαδικασία πολλαπλασιασμού των ρωγμών.
- Εκτιμήσεις της τραχύτητας της επιφάνειας, των προτύπων λείανσης και των γωνιών λείανσης.
- Αξιολόγηση της συνέχειας και της ομοιομορφίας της επικάλυψης.
- Προσδιορισμό της έκτασης και της θέσης της φθοράς.
- Εκτίμηση της πλαστικής παραμόρφωσης που συνδέεται με διάφορες μηχανικές διαδικασίες.
- Καθορισμός της έκτασης και της μορφής της διάβρωσης του σώματος. Τύποι διαβρώσεων που μπορούν να διαγνωστούν εύκολα είναι: Διάβρωση με βελονισμούς, διάβρωση χαραγής και μηχανική διάβρωση.
- Αξιολόγηση της τάσης του για οξειδωση.
- Συσχέτιση της αποτυχίας με συγκολλήσεις, κολλήσεις, και άλλες λειτουργίες επεξεργασίας.

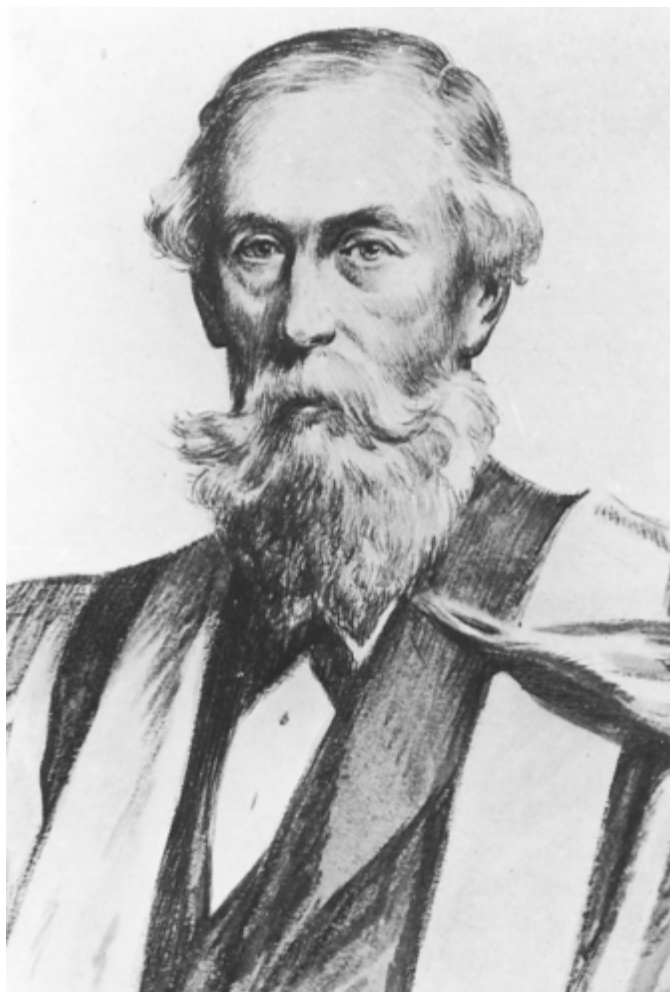
Αυτή η λίστα των μακροδομικών χαρακτηριστικών που αφορούν στον χαρακτηρισμό των μετάλλων, αν και ατελής, αντιπροσωπεύει την ευρεία ποικιλία χαρακτηριστικών που μπορούν να αξιολογηθούν από την οπτική μακροσκοπία. Η δομή μεσοκλίμακας είναι της τάξης του 1 mm έως 100 μm. Περιλαμβάνει χαρακτηριστικά μικροδομής σε μέγεθος κόκκων, χωρίς όμως να αναλύει τις περιπλοκές της δομής των κόκκων. Για παράδειγμα, η ομοιομορφία του βάθους σκλήρυνσης είναι παράδειγμα ενός χαρακτηριστικού μεσοκλίμακας. Δομές στερεοποίησης σε επίπεδο μεσοκλίμακας περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος των κυττάρων (ευτηκτικό κύτταρο), τους δενδρίτες και τους βραχίονες, τον τύπο των κόκκων (κιονοειδείς ή ισοαξονικοί), τον τύπο και τη συγκέντρωση χημικού μικροδιαφορισμού, και τη ποσότητα μικροσυρρίκνωσης, το πορώδες και τα εγκλείσματα. Ο όρος "μεσοκλίμακα"

είναι ένας σχετικά νέος όρος, που εισήχθη εν μέρει για την ακριβέστερη διάκριση μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων.

Μικροδομή είναι ο κλασικός όρος που χρησιμοποιείται στην μεταλλογραφία για να περιγράψει τα χαρακτηριστικά που παρατηρούνται από ένα μικροσκόπιο με εύρος κλίμακας από 1.000 έως 0,1 μm . Η σημασία της μικροδομής ως προς τις ιδιότητες των μετάλλων και των κραμάτων έχει από καιρό αναγνωρισθεί. Το μέγεθος των κόκκων, διδυμίες, και το μέγεθος, το σχήμα και η κατανομή της δεύτερης φάσης σωματιδίων είναι σημαντικά στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των περισσότερων μετάλλων και κραμάτων. Αυτά τα μικροδομικά χαρακτηριστικά είναι εντός των θεμελιωδών ορίων ανάλυσης του οπτικού μικροσκοπίου από 0,2 μm (ή μεγαλύτερο). Στη συνέχεια, εάν είναι αναγκαίο, η εξέταση μπορεί να κινηθεί σε υψηλότερα επίπεδα μεγέθυνσης με ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, ή ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο εκπομπής(TEM). Για παράδειγμα, διαταραχές, πολυάριθμα είδη της δεύτερης φάσης σωματιδίων, spinodal και ομαλές δομές, καθώς και πολλά είδη των μαρτενσιτικών δομών είναι πολύ μικρά για την ανάλυση με οπτικό μικροσκόπιο. Ως εκ τούτου, η μεταλλογραφική παρατήρηση αυτών των πολύ λεπτών δομικών χαρακτηριστικών γενικά περιορίζεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

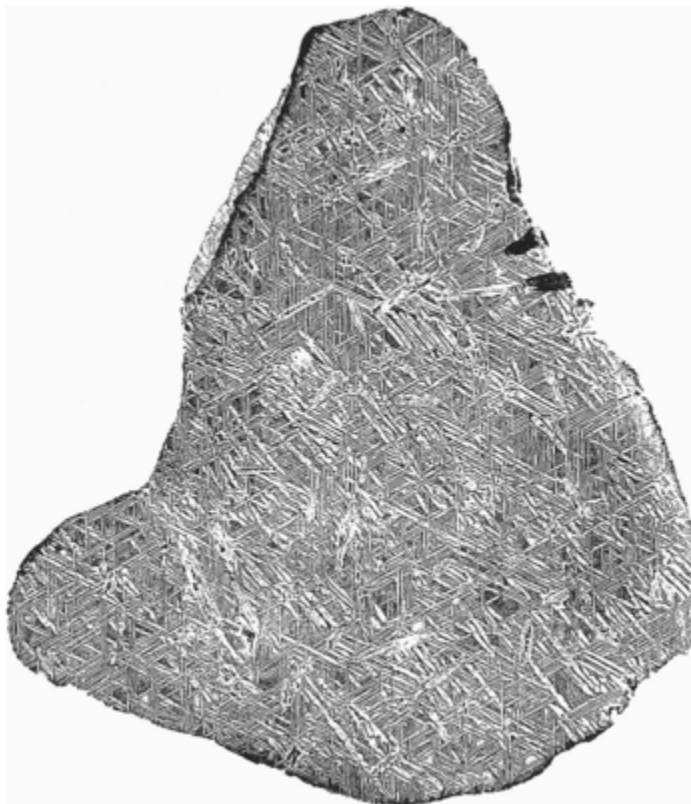
Ο σημαντικότερος παράγοντας στη παρατήρηση των μετάλλων στο οπτικό μικροσκόπιο είναι η προετοιμασία της επιφάνειας του δοκιμίου. Αυτή είναι η βασική αρχή που ανακαλύφθηκε από τον πατέρα της μεταλλογραφίας, τον Henry Clifton Sorby, που ήταν ο πρώτος που εξέτασε γυαλισμένα και χημικά προσβεβλημένα μεταλλικά δοκίμια με μικροσκόπιο το 1863. Η χρησιμοποίηση του μικροσκοπίου στην εξέταση των μετάλλων έγινε δυο αιώνες αργότερα απ' ό,τι στη βιολογία, λόγω του ότι χρειάζεται προσεκτική προετοιμασία της επιφάνειας. Σε αντίθεση με τα βιολογικά δείγματα, τα μέταλλα είναι αδιαφανή και γι' αυτό απαιτείται οπτική μικροσκοπία με αντανάκλαση για τη παρατήρηση τους (όπου το διαχεόμενο φως αντανακλάται στην επιφάνεια του δείγματος). Σε αντίθεση, τα βιολογικά δείγματα είναι διαφανή και γι αυτό μπορούν να εξεταστούν με μεταδιδόμενο φως. Ο Sorby κατάλαβε την ανάγκη για τη κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας κατά την εξέταση των μετάλλων με αντανακλώμενη οπτική μικροσκοπία. Πριν από τον Sorby, τα δείγματα ήταν μόνο 'ακανόνιστα θραύσματα και κακώς γυαλισμένες ή φθαρμένες επιφάνειες' [2]. Συμβούλευε ότι 'το τελικό γυάλισμα δεν πρέπει να δίνει λαμπερή αντανάκλαση αλλά να δείχνει όλες τις παρατυπίες του υλικού και να είναι όσο το δυνατό λιγότερο' [3].



Σχήμα 1.1: Henry Clifton Sorby (1826-1908), γεωλόγος, πετρογράφος, μεταλλειολόγος, και ιδρυτής της μεταλλογραφίας. [6]

Το άλλο δύσκολο κομμάτι της μεταλλογραφίας είναι η χημική προσβολή. Σε μια υπερβολικά λεία επιφάνεια τα χαρακτηριστικά της δεν φαίνονται όταν εξετάζεται με αντανακλώμενη οπτική μικροσκοπία γιατί το φως αντανακλάται ομοιόμορφα από την επιφάνεια και εμφανίζονται όλα ίδια στο ανθρώπινο μάτι. Γι αυτό το λόγο, χρειάζονται τεχνικές για να ενισχύσουν τις αντιθέσεις και τις διαφορές μεταξύ των διαφορετικών φάσεων των συστατικών. Αυτές οι μέθοδοι είναι η χημική προσβολή, η διάταξη λεπτού φιλμ ή ειδικές μέθοδοι φωτισμού. Από αυτές, χημικές συνταγές για τη χημική προσβολή της επιφάνειας είναι οι παλιότερες. Η χημική προσβολή προηγείται ακόμα του Sorby τουλάχιστον 4 αιώνες, όπως στη περίπτωση μακροχαρακτικών τεχνικών για να αποκαλύψουν τα δαμασκηνά μοτίβα σε σπαθιά και άλλα μέρη από πανοπλίες. Η μακροχαρακτική χρησιμοποιήθηκε επίσης για να αποκαλύψουν τη δομή γυαλισμένων μετεωριτών, όπως τη δομή του περίφημου Widmanstätten που ανακαλύφθηκε από τον κόμη Alois von Widmanstätten, ένα γεωλόγο και

έφορο μουσείου στη Βιέννη, και τον συνεργάτη του Carl von Schreiberners το 1808. Χάραξαν χημικά διάφορους μετεωρίτες για να δείξουν τα εξαιρετικά κρυσταλλικά μοτίβα στο μετεωρίτη σιδήρου Elbogen που έπεσε το 1751. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα της εργασίας τους παρουσιάζεται στην Σχήμα 1.2[4].



Σχήμα 1.2: Μακρογραφία του μετεωρίτη σιδήρου Elbogen που παρασκευάστηκε το 1808 από τον Widmanstätten και τον Schreiberners προσβάλλοντας το χημικά σε νιτρικό οξύ. Αφού ξεπλύθηκε σε νερό και στέγνωσε, μελάνι εκτυπωτή τυλίχθηκε στην επιφάνεια, και το δείγμα πιέστηκε επάνω σε ένα κομμάτι χαρτί. [4].

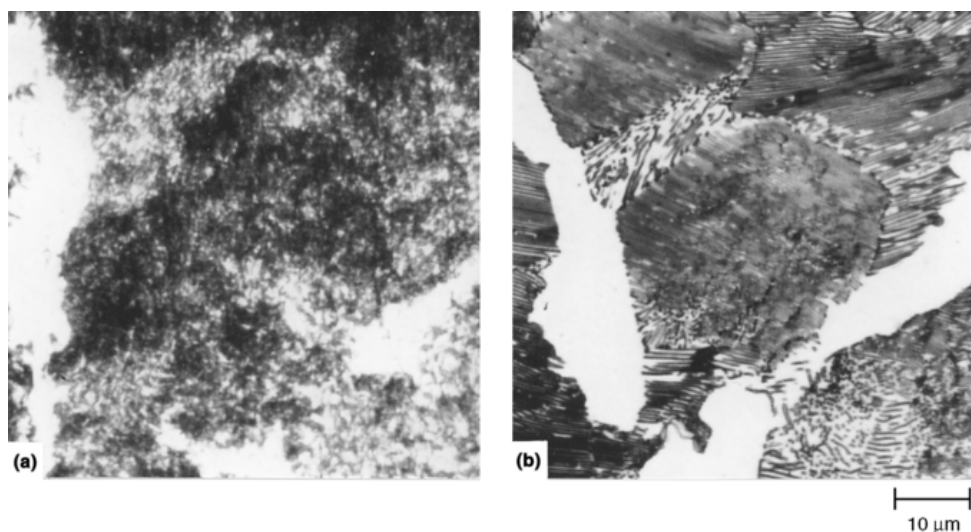
Ο Widmanstätten και ο Schreiberners χάρασαν χημικά δοκίμια που φαινόταν με γυμνό μάτι, αλλά ο Sorby ήταν ο πρώτος που μελέτησε τη μικροδομή τους σε μικροσκόπιο. Ο Sorby πρώτα έκοψε και γυάλισε τα δοκίμια του για να αφαιρέσει όλα τα 'ίχνη τραχύτητας'. Μετά το γυάλισμα χρησιμοποιούσε διάλυμα νιτρικού οξέως για να χαράσσει χημικά τα δοκίμια του. Ουσιαστικά ακολουθούσε την τεχνική της χημικής προσβολής για να μην διαβρώσει πολύ το δείγμα. Ο σημαντικός παράγοντας σε αυτή τη διαδικασία ήταν η κουραστική προετοιμασία των δειγμάτων από τον Sorby στο χέρι. Οι γυαλισμένες επιφάνειες χαράσσονταν χημικά σε διάλυμα νιτρικού οξέως και ήταν αναμφίβολα πολύ καλύτερες σε σχέση με αυτές των συγχρόνων του, όπως του Wedding και του Martins στη Γερμανία που προσπαθούσαν να ανακαλύψουν τις μικροδομές του χάλυβα.

Ο Sorby μπορεί να μην είχε συνειδητοποιήσει τους ακριβείς λόγους της επιτυχίας των μεθόδων παρασκευής του, αλλά το σημαντικό είναι ότι όλες οι δομές που αναφέρθηκαν από τον Sorby είναι ακόμα αποδεκτές σαν σωστές. Στις 28 Ιουλίου του 1823, ο Sorby κατέγραψε στο ημερολόγιο του ότι είχε ανακαλύψει τη δομή ενός σιδήρου. Παρ' όλα αυτά δεν ήταν παρά μέχρι το 1886 και το 1887 που τα αποτελέσματα του καταγράφηκαν σε ένα περιοδικό με ευρύ αναγνωστικό κοινό. Με προσεκτική παρατήρηση αναγνώρισε σημαντικά συστατικά μικροδομής από σιδηρούχα υλικά (αυτά που τώρα είναι γνωστά σαν γραφίτης, σεμεντίτης, περλίτης, ωστενίτης και φωσφορικό ευτηκτικό. Αναγνώρισε ότι ο σίδηρος αποτελείται από έναν αριθμό από κρυσταλλικούς κόκκους, και ο ίδιος κατάλαβε ότι ο σίδηρος υφίσταται αλλοτροπική αλλαγή όταν θερμαίνεται. Όπως σημείωσε ο Samuels[6], αυτά είναι τρομερά επιτεύγματα θεωρώντας ότι ξεκίνησε από το μηδέν και ότι επιτεύχθηκαν μετά από μια τόσο σύντομη περίοδο έρευνας.

Από τότε έως σήμερα, η σημασία της προετοιμασίας του δοκιμίου παραμένει καίριας σημασίας . Πολλές ελλείψεις προκύπτουν όταν παραμελούνται οι μέθοδοι παρασκευής. Λανθασμένες δομές μπορούν να προκύψουν από την προπαρασκευή. Ειδικότερα, ο Jose Ramon Vilella (Σχ. 1.3) ήταν ο πρώτος που συνειδητοποίησε ότι σφάλματα παρατηρούνταν μερικές φορές λόγω της παρουσίας ενός στρώματος "ακανόνιστου ή θολού" μετάλλου που σχηματίζεται κατά τα πρώτα στάδια της προετοιμασίας της επιφάνειας και όχι κατά τη διάρκεια της ίδιας της στίλβωσης [7]. Έδειξε ότι η πραγματική μικροδομή ήταν ορατή μόνο όταν το θολό αυτό στρώμα απομακρυνόταν και επινόησε μία μέθοδο (εναλλακτική χημική χάραξη και λείανση) για να γίνει αυτό (Σχ. 1.4)



Σχήμα 1.3: Jose Ramon Vilella (1897-1971), διακεκριμένος μεταλλογράφος ο οποίος κατανόησε την ανάγκη για την προετοιμασία των επιφανειών στις μεταλλογραφικές εξετάσεις. [6]



Σχήμα 1.4: Ένα παράδειγμα που χρησιμοποιείται από τον Vilella για να απεικονίσει την επίδραση του θολού μετάλλου στην εμφάνιση του περλίτη. (α) γυαλισμένη επιφάνεια που καλύπτεται από ένα στρώμα θολού μετάλλου: δομές όπως αυτή ονομάστηκαν σορβίτης ή troostite-σορβίτης από κάποιους ερευνητές. (β) το ίδιο μετά την αφαίρεση του στρώματος του μετάλλου με την εναλλακτική χημική χαρακτηριστική και λείανση: η αληθινή δομή του βελονοειδούς περλίτη. Χημικά χαραγμένο σε picral αντιδραστήριο. 1000 ×.[7]

Το θεμελιώδες έργο τον Vilella θέσπισε την ανάγκη για διαδικασίες παρασκευής πέρα από το να φτιάχνει απλά αντανάκλαστικές επιφάνειες. Η επιτυχής μεταλλογραφία επιβάλλει τις ακόλουθες προϋποθέσεις για την τελική προετοιμασία της επιφάνειας του δείγματος:

- Επιφανειακά στρώματα που θα μπορούσαν να συγκαλύψουν δομικά χαρακτηριστικά δεν πρέπει να υπάρχουν.
- Λανθασμένες δομές που θα μπορούσαν να ανιχνευθούν κατά τη διάρκεια μιας περαιτέρω εξέτασης δεν πρέπει να εισαχθούν.
- Όλα τα πεδία που πρέπει να εξεταστούν πρέπει να είναι συνεπίπεδα μέσα στα όρια του συστήματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για εξέταση.
- Η επιφάνεια πρέπει να είναι επαρκώς απαλλαγμένη από λεκέδες και άλλες τυχαίες κηλίδες.

Με αυτούς τους βασικούς στόχους στο μυαλό, τότε το επόμενο πρόβλημα είναι να προσδιοριστεί η πιο αποτελεσματική μηχανική, χημική, και / ή φυσική μέθοδος προετοιμασίας του δείγματος για το κατάλληλο μικροσκοπικό εργαλείο. Αυτές οι μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικότερα στην ενότητα «Τεχνικές μεταλλογραφίας» αυτού του τεύχους.

Αφού μια μικρογραφία από ένα κατάλληλα προετοιμασμένο δοκίμιο ληφθεί και καταγραφεί, η επόμενη πρόκληση είναι να ερμηνεύσουμε, να κατανοήσουμε και να χρησιμοποιήσουμε τις πληροφορίες που περιέχονται στην καταγεγραμμένη εικόνα. Η ερμηνεία των μικροδομικών χαρακτηριστικών απαιτεί την κατανόηση της κρυσταλλικής δομής, τους κινητικούς και τους μεταλλουργικούς μηχανισμούς της στερεοποίησης, της παραμόρφωσης, και της μεταβολής των φάσεων. Αυτά τα θέματα, που σχετίζονται με τη δομή, εισάγονται με περισσότερες λεπτομέρειες στη σειρά των άρθρων στην επόμενη ενότητα "Μεταλλουργία και μικροδομή."

Η ερμηνεία των μικρογραφιών απαιτεί επίσης την κατανόηση του πώς η προετοιμασία του δοκιμίου και οι μικροσκοπικές τεχνικές επηρεάζουν την εμφάνιση συγκεκριμένων φάσεων σε ένα δεδομένο υλικό. Έτσι, η καταγραφή των μικρογραφιών (σε έντυπη και / ή σε ηλεκτρονική μορφή) μπορεί να είναι χρήσιμη κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεταβολών του υλικού και των αλλαγών στην προετοιμασία του δοκιμίου.

Υποσημείωση

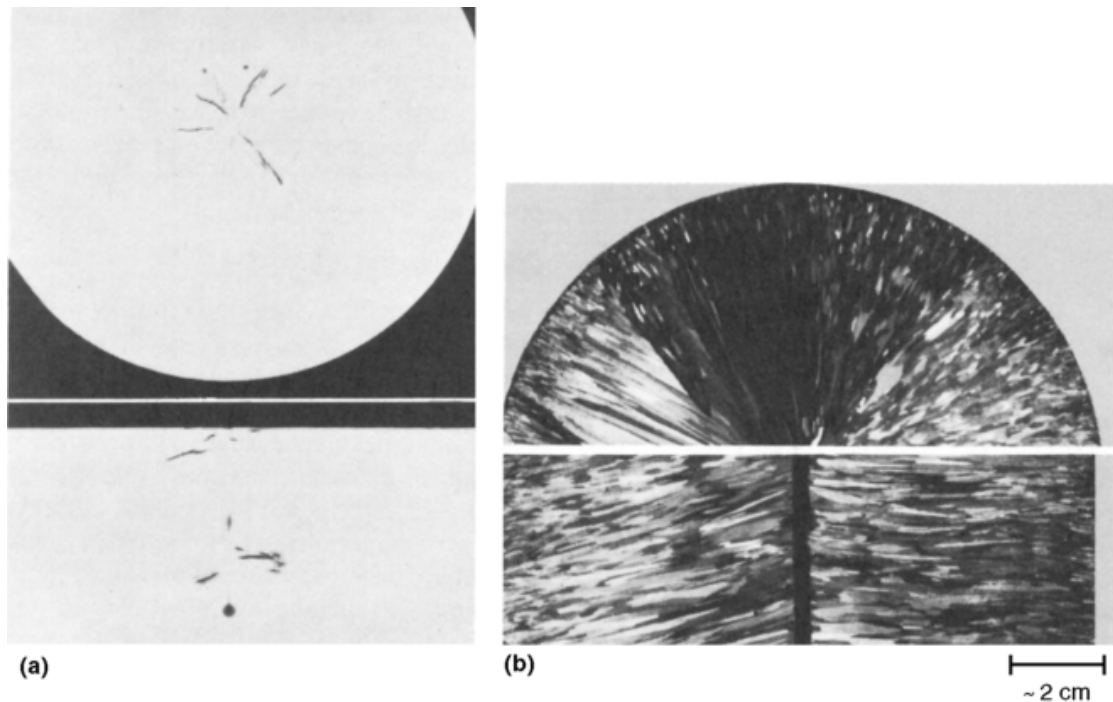
* Στο τέλος του 19ου αιώνα, ένα είδος περλίτη που δεν μπορούσε να αναλυθεί στο οπτικό

μικροσκόπιο αναφερόταν ως "Σορβίτης" προς τιμήν του Sorby. Ωστόσο, επειδή δεν είναι ένα νέο συστατικό, ο όρος "σορβίτης" δεν επιβίωσε. Ο όρος "περλίτης" σώζεται μέχρι σήμερα και στην πραγματικότητα συνδέεται με τον Sorby, ο οποίος το περιέγραψε ως "περλέ συστατικό, "δηλαδή, περλίτη, επειδή είχε μια μαργαριταρένια εμφάνιση.

1.3 ΜΑΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ

Μακροδομικός χαρακτηρισμός των μετάλλων και των κραμάτων είναι η λεπτομερής αξιολόγηση των μεγάλης κλίμακας ανομοιογενειών στη σύνθεση, τη μορφολογία, και τη πυκνότητα. Αυτές οι ανομοιογένειες μπορούν να αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια διαδικασιών, όπως η χύτευση, η έλαση, η σφυρηλάτηση, και η συγκόλληση ή κατά τη διάρκεια της εξέτασης. Η μακροσκοπική εξέταση των επιφανειών είναι, επίσης, ουσιαστικής σημασίας κατά την ανάλυση αστοχίας των σπασμένων, διαβρωμένων και / ή φθαρμένων εξαρτημάτων. Η μικροσκοπική αξιολόγηση είναι σαφώς ένα σημαντικό βήμα, σε κάθε εξέταση αστοχίας, αλλά δεν πρέπει να αντικαταστήσει τη μακροσκοπική εξέταση. Αυτοί οι δύο τύποι μεταλλογραφίας είναι συμπληρωματικοί, αλλά κατά τη διάρκεια της εξέτασης της ανάλυσης αστοχίας πρέπει πάντα να ξεκινά με χαμηλή μεγέθυνση και να ανεβαίνει προς τα πάνω. Ένα συχνό λάθος στην ανάλυση αστοχίας είναι να παραμελούν την εξέταση των σπασμένων κομματιών σε χαμηλές μεγεθύνσεις. Πάρα πολύ συχνά, το συστατικό κατηγοριοποιείται αμέσως.

Τεχνικές έρευνας, εκτός της μεταλλογραφίας μπορεί επίσης να είναι πιο αποτελεσματικές κατά τη διάρκεια της μακροσκοπικής εξέτασης. Για παράδειγμα, το Σχήμα 1.5 δείχνει ρωγμές αράχνης στο κέντρο ενός δείγματος χαλκού. Αυτό το δοκίμιο κατηγοριοποιήθηκε, έγινε επίπεδο, και γυαλίστηκε, αλλά δεν χημάχτηκε χημικά. Η χημική προσβολή και η επακόλουθη αξιολόγηση της μακροδομής μπορεί να αποτύχουν να αποκαλύψουν αυτό το είδος των δομικών ατελειών (Σχ. 1.5β). Οι ρωγμές που φαίνεται στο (Σχ. 1.5α) αποκαλύφθηκαν εφαρμόζοντας μια χρωστική διεισδυτικού στο γυαλισμένο δείγμα. Η βαφή συντάχθηκε στις ρωγμές δια τριχοειδούς φαινομένου, και η επιφάνεια κατόπιν καθαρίστηκε. Το δοκίμιο στη συνέχεια τοποθετήθηκε κάτω από ένα φως που προκάλεσε τη χρωστική να φθορίζει, και οι ρωγμές έγιναν άμεσα αντιληπτές. Χρωμο-διεισδυτικές τεχνικές είναι εξαιρετικές για την εξέταση των μακροδομικών ατελειών τύπου ρωγμών στα μέταλλα. Ωστόσο, κόκκοι και άλλα χαρακτηριστικά μικροδομής εμφανίζονται μόνο μετά την χάραξη, η οποία συχνά κρύβει την παρουσία των ρωγμών. Ως εκ τούτου, διαφορετικές τεχνικές μεταλλογραφικής είναι απαραίτητες για να αποκαλύψουν διάφορα στοιχεία μακροδομής.



Σχήμα 1.5: Μακροδομή μιας ράβδου χαλκού. (α) Ρωγμές αράχνης αποκαλύφθηκαν με χρωστική ουσία. Εγκάρσια διατομή στην κορυφή. Διαμήκη τομή στο κάτω μέρος. (β) Η ίδια ράβδος, χαραγμένη με Waterbury αντισταθμιστή. Οι ρωγμές δεν εμφανίζονται. Και οι δύο είναι περίπου 0,5×. [8]

1.3.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΟΜΕΩΝ

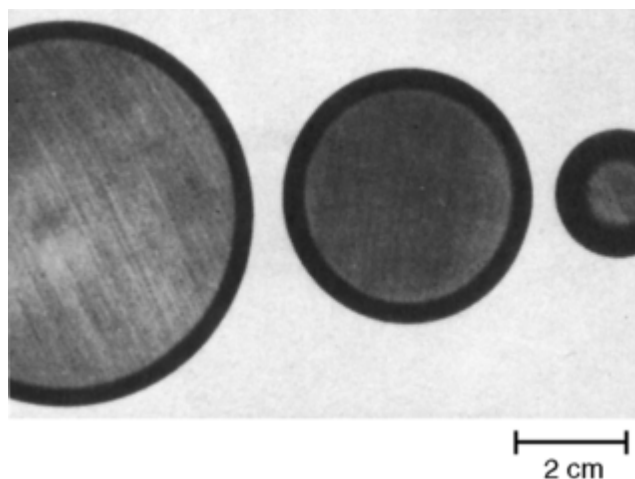
Η παρασκευή ενός μεταλλογραφικού τμήματος προς εξέταση απαιτεί την προσεκτική επιλογή της περιοχής που θα χαρακτηριστεί. Αυτή η περιοχή πρέπει να επιλεγεί να εκπροσωπεί τα μοναδικά χαρακτηριστικά της ζώνης ενδιαφέροντος ή τα γενικά χαρακτηριστικά ενός μέρους ή ενός συστατικού που επιλέγεται για τον χαρακτηρισμό της διαδικασίας και τη διασφάλιση της ποιότητας. Η επιλεγμένη περιοχή του δοκιμίου πρέπει στη συνέχεια να απομακρυνθεί από το στοιχείο με τη χρήση τεχνικών που δεν βλάπτουν ή νοθεύουν τα χαρακτηριστικά του που μας ενδιαφέρουν. Το τμήμα του ενδιαφέροντος στη συνέχεια προετοιμάζεται, και το προετοιμασμένο τμήμα χαρακτηρίζεται χρησιμοποιώντας τη μακροσκοπική εξέταση.

Η μακροσκοπική εξέταση γενικά δεν απαιτεί την απόλυτα λεία επιφάνεια που απαιτείται για τις μικροσκοπικές εξετάσεις. Τεχνικές προετοιμασίας της επιφάνειας, όπως η χημική προσβολή συχνά παρατείνονται τόσο ώστε τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ενισχύονται σε μεγάλο βαθμό. Επομένως, οι ποσοτικές μετρήσεις δεν θα πρέπει να διενεργούνται σε δοκίμια βαθιάς χάραξης. Η βαθιά χάραξη τονίζει οποιαδήποτε ανομοιογένεια μικροδομής (Σχ. 1.6). Οι

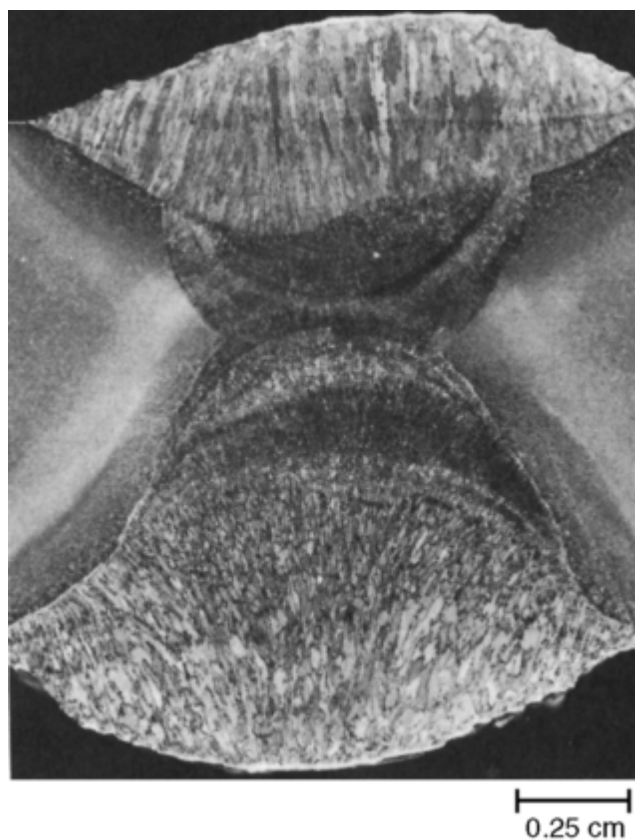
γραμμές ροής δείχνουν τη κατεύθυνση της ροής του μετάλλου κατά την επεξεργασία και συχνά αντιπροσωπεύουν διαδρομές για εύκολη ρήξη. Το Σχήμα 1.7 δείχνει τη χρήση παρόμοιων μακροσκοπικών τεχνικών για να απεικονίζουν το βάθος της σκλήρυνσης σε ένα εργαλείο από χάλυβα. Το Σχήμα 1.8 είναι μία μακρογραφία συγκόλλησης που δείχνει τα διάφορα χαρακτηριστικά που δημιουργεί η χημική προσβολή στη ζώνη σύντηξης και τη ζώνη θερμικής επιρροής (HAZ) της συγκόλλησης. Το 2% NITAL χαρακτικό που χρησιμοποιήθηκε για να αποκαλύψει την μακροδομή συγκόλλησης είναι πολύ λιγότερο επιθετικό από το 50% χαρακτικό υδροχλωρικού οξέως που χρησιμοποιήθηκε στα δείγματα που φαίνονται στα σχήματα 1.6 και 1.7 και αποκαλύπτει λεπτότερες δομικές λεπτομέρειες, αλλά απαιτεί γυαλισμένο δοκίμιο.



Σχήμα 1.6: Γραμμές ροής σε σφυρήλατο 4140 γάντζο από χάλυβα. Το δείγμα χαραχθηκε χημικά χρησιμοποιώντας 50% HCl. 0.5x. [8]

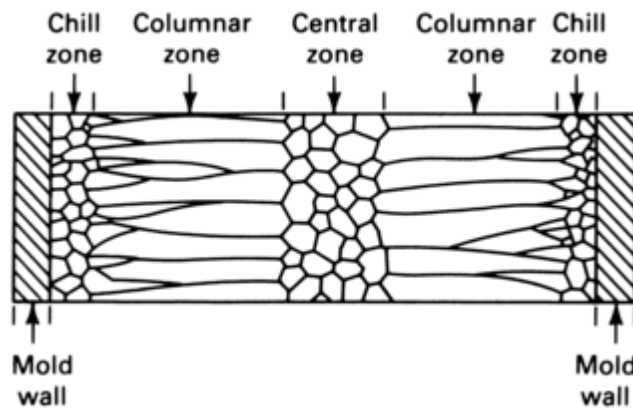


Σχήμα 1.7: Στρώμα επιφανειακής σκλήρυνσης σε εργαλείο από χάλυβα W1. Στα δοκίμια έγινε ωστενιτοποίηση στους 800 ° C (1475 ° F), βαφή σε διαλυτικό και θερμική κατεργασία επαναφοράς για 2 ώρες στους 150 ° C (300 ° F). Τα μαύρα δαχτυλίδια είναι οι ανθεκτικές ζώνες. Χαραγμένο με 50% θερμό HCl. Περίπου 0,5x. [8]

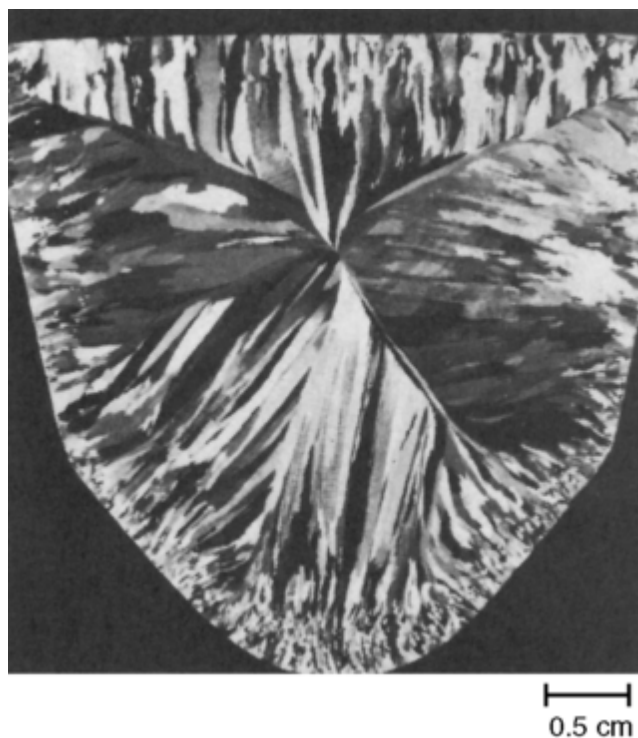


Σχήμα 1.8: Τομή τόξου συγκόλλησης ένωσης δύο πλακών χάλυβα ASTM A517, grade J με πάχος 13 mm. Χαραγμένο χημικά με 2% νιτάλ. 4x. [8]

Στις χυτεύσεις, η μακροσκοπία χρησιμοποιείται για να καθορίσει το βάθος της εξωτερικής ζώνης ψύξης, το σχήμα και το μέγεθος των στύλων ή των δενδρικών κόκκων που είναι κάθετα στο τοίχωμα του καλουπιού, καθώς και το μέγεθος της κεντρικής ισοαξονικής ζώνης (Σχ.1.9). Για παράδειγμα, το Σχήμα 1.10 δείχνει την μακροδομή ενός μικρού, σχετικά καθαρού πλινθώματος αλουμινίου που εμφανίζει χαρακτηριστική χυτή δομή κόκκων. Για την μακρογραφία, η αλουμινένια ράβδος κατηγοριοποιήθηκε, στη συνέχεια, συγκρατήθηκε και γυαλίστηκε για να δημιουργηθεί μια επίπεδη ανακλαστική επιφάνεια. Το γυαλισμένο τμήμα στη συνέχεια χαράχθηκε χημικά με εμβάπτιση σε διάλυμα που επιτέθηκε στους διάφορους κόκκους με διαφορετικούς ρυθμούς. Τα δομικά στοιχεία ορατά σε αυτό το μακρογράφο είναι οι κόκκοι. Οι μικροί κόκκοι κοντά στον πυθμένα της ράβδου είναι σχετικά ισοαξονικοί. Αυτή η περιοχή των μικρών ισοαξονικών κόκκων είναι η ψύχρη ζώνη. Η μακροσκοπία χυτών δομών χρησιμοποιείται επίσης για να αποκαλύψει ατέλειες, όπως η συρρίκνωση, αέρια, πορώδες, και ρωγμές.



Σχήμα 1.9: Σκίτσων κόκκων σε ένα χαρακτηριστικό πλινθώμα χύτευσης.



Σχήμα 1.10:μακροδομή σε πλίνθωμα αλουμινίου. Η εγκάρσια τομή παρουσιάζει την εξωτερική ζώνη ψύξης και τους κιονοειδείς κόκκους που έχουν αναπτυχθεί κάθετα προς τις επιφάνειες της μήτρας. Χαραγμένο χημικά χρησιμοποιώντας το αντιδραστήριο Tucker's. 1.5 ×. [8]

1.3.2 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

Τόσο τα μακρο και τα μικροχαρακτηριστικά της επιφάνειας θραύσης μπορούν να μας πουν πώς και ενίοτε γιατί συνέβη η θραύση. Χαρακτηριστικά που συχνά συνδέονται με την επιφάνεια θραύσης σε μακροκλίμακα και μικροκλίμακα δείχνονται στους πίνακες 1.2 και 1.3. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρέχουν πληροφορίες σχετικά με [9]:

- Το τόπο έναρξης της ρωγμής - και την κατεύθυνση μετάδοσης της ρωγμής.
- Το μηχανισμό της ρωγμής και τη πορεία του κατάγματος.
- Τις συνθήκες φορτίου (μονότονη ή κυκλική).
- Το περιβάλλον.
- Γεωμετρικούς περιορισμούς που επηρέασαν την αρχική ρωγμή και / ή το κρακ πολλαπλασιασμού.
- Ατέλειες κατασκευής που επηρέασαν την έναρξη της ρωγμής και /ή τη μετάδοσή της.

Πίνακας 1.2:Κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά μακροκλίμακας

| Ένδειξη | Επίπτωση |
|--|---|
| Οπτική παραμόρφωση | Η πλαστική παραμόρφωση ξεπέρασε το κρίσιμο στοιχείο ελαστικότητας και μπορεί να υποδεικνύει αστάθεια (λαιμού, κάμψης) η post-failure φθορά |
| Ορατές εγκοπές και σχισμές | Πιθανή θέση έναρξης της ρωγμής |
| Προσανατολισμός της επιφάνειας θραύσης με την γεωμετρία του στοιχείου και τις συνθήκες φόρτισης. | <ul style="list-style-type: none"> • Βοηθά διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης I, II, III • Προσδιορίζει ελαστική και ψαθυρή θραύση μακροκλίμακας. |
| Η επίπεδη θραύση και το χείλος διάτμησης εμφανίζονται στην επιφάνεια θραύσης | <ul style="list-style-type: none"> • Η διεύθυνση μετάδοσης της ρωγμής είναι παράλληλη στο χείλος διάτμησης. • Ρωγμή μικτής μεθόδου(ατελής περιορισμός). |
| Πολύ κλειστή ρωγμή στην επιφάνεια | <ul style="list-style-type: none"> • Πιθανή κυκλική φόρτιση • Πιθανή ατέλεια επεξεργασίας, π.χ., από την σφυρηλάτηση, η από σβήσιμο. |
| Ακτινωτά σημάδια και σημάδια σχήματος V | <ul style="list-style-type: none"> • Δείχνουν προς την κατεύθυνση έναρξης της ρωγμής • Δείχνουν τη διεύθυνση μετάδοσης της ρωγμής |
| Γραμμές εγκλείσματος (μονοτονική φόρτιση) (σχήματος u) | <ul style="list-style-type: none"> • Οι γραμμές δείχνουν τη κατεύθυνση μετάδοσης της ρωγμής. • Υποδηλώνουν ατελή περιορισμό. |
| Γραμμές εγκλείσματος (έκκεντρη φόρτιση) (ομοκεντρικές ρωγμές «beach marks», clamshell marks) | <ul style="list-style-type: none"> • Υποδηλώνει κυκλική φόρτιση. • Μετάδοση από το κέντρο προς την καμπύλη • Η καμπυλότητα μπορεί να αντιστραφεί σε κυλινδρικά τμήματα κατά την μετάδοση της ρωγμής. |
| Οδοντωτά σημάδια | <ul style="list-style-type: none"> • Πιο πιθανό σε κυκλική φόρτιση • Υποδεικνύει τη θέση έναρξης. |
| Παρακείμενη επιφάνεια και/ή αποχρωματισμός της επιφάνειας θραύσης. | <ul style="list-style-type: none"> • Μπορεί να υποδηλώνει διαβρωτικό περιβάλλον. • Μπορεί να υποδηλώνει αυξημένη |

| | |
|--|---|
| | θερμοκρασία. |
| Οξειδωμένοι δάκτυλοι ροής στην επιφάνεια θραύσης | Πιθανή θέση έναρξης της ρωγμής |
| Ανακλαστικότητα της επιφάνειας θραύσης | <ul style="list-style-type: none"> • Ματ: ελαστική θραύση ή κυκλική φόρτιση. • Λαμπερό: πιθανότατα σχισμή • Λαμπερόενδοκοκκώδες κάταγμα σε μεγάλο μέγεθος κόκκου. |
| Τραχύτητα της επιφάνειας θραύσης | <ul style="list-style-type: none"> • Άυξηση της τραχύτητας της επιφάνειας προς τη κατεύθυνση ανάπτυξης της ρωγμής (may μπορεί να επηρεάζεται από την τάση συμπίεσης μιας περιοχής όταν η ρωγμή μετακινείται σε αυτήν την περιοχή. • Λεία συν τραχιά περιοχή κατά την κατεύθυνση της αύξησης. • Ματ θραύσματα είναι όλκιμα. • Μπορεί να υποδηλώνει μετάβαση από την ανάπτυξη της ρωγμής λόγω κόπωσης σε υπερφόρτωση. |
| Η τριβή (γενικά) | <ul style="list-style-type: none"> • Μπορεί να υποδηλώνει ταλάντωση. • Μπορεί να δείχνει τη τελική κατεύθυνση του διαχωρισμού. • Στροβιλικό μοτίβο υποδηλώνει στρέψη. |
| Η τριβή (τοπικά) | <ul style="list-style-type: none"> • Μπορεί να υποδηλώνει το κλείσιμο της ρωγμής στην κυκλική φόρτιση. • Μπορεί να εξαλείψει τα ελλειπτικά σημάδια. |
| Παραμορφωμένα σημάδια, γρατζουνιές | Αν είναι στρεβλωμένα υποδηλώνουν φόρτιση στρέψης. |
| Σημάδια κατεργασίας κανονικά ως προς τον άξονα. | Μη παραμορφωμένα από φόρτιση στρέψης. |
| Μεταβλητή τραχύτητα στην ακμή της θραύσης | Στην ψαθυρή κάμψη, η τραχιά πλευρά είναι η πλευρά της έντασης |

Πίνακας 1.3:Κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά μικροκλίμακας

| Σημάδια/ενδείξεις | Επιπτώσεις |
|---|---|
| Επιφάνεια θραύσης με πτυχές | Ελαστική θραύση υπερφόρτωσης σε αυτήν την θέση |
| Πολύπλευρη επιφάνεια θραύσης | <ul style="list-style-type: none"> Ψαθυρή σχισμή θραύση Πιθανή SCC θραύση Μπορεί να είναι χαμηλή ΔΚ κόπωση |
| Ενδοκοκκική με λεία όρια κόκκων | <ul style="list-style-type: none"> Πιθανότατα είτε ακατάλληλη θερμική επεξεργασία ή υποβοηθούμενης από το περιβάλλον θραύσης (υψηλή θερμοκρασία, διαβρωτικό περιβάλλον) Λιγότερο συχνή είναι χαμηλή ΔΚ κόπωση |
| ενδοκοκκική με πτυχωμένα όρια κόκκων | <ul style="list-style-type: none"> ρήξη-θραύση σε μεγάλο ποσοστό του σημείου τήξης Πιθανή ακατάλληλη επεξεργασία που δημιούργησε μια διαβρωμένη ζώνη δίπλα στα όρια των κόκκων |
| River μοτίβο fan Μοτίβο | Θραύση σχισήματος,η σχοσμή κυλάει σαν ποτάμι,οι ακτίνες της βεντάλιας δείχνουν την θέση έναρξης της ρωγμής. |
| tongues | Δίδυμη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της ταχείας διάδοσης ρωγμών |
| Αυλακώσεις σε ενδοκοκκική επιφάνεια θραύσης | <ul style="list-style-type: none"> Υποδεικνύει διαβρωτικό περιβάλλον και ελαστική θραύση Η ρωγμή διαδίδεται παράλληλα με τις ραβδώσεις. |
| Ραβδωτή ή αυλακωτή θραύση | <ul style="list-style-type: none"> Έκκεντρη φόρτιση ραβδώσεων κόπωσης, συνεχής απομάκρυνση, συνεχές εύρος τάσης. μεταβλητή απομάκρυνση, μεταβλητό εύρος τάσης. Ραβδωτή επιφάνεια που προκλήθηκε από δεύτερες φάσεις στη μικροδομή. |

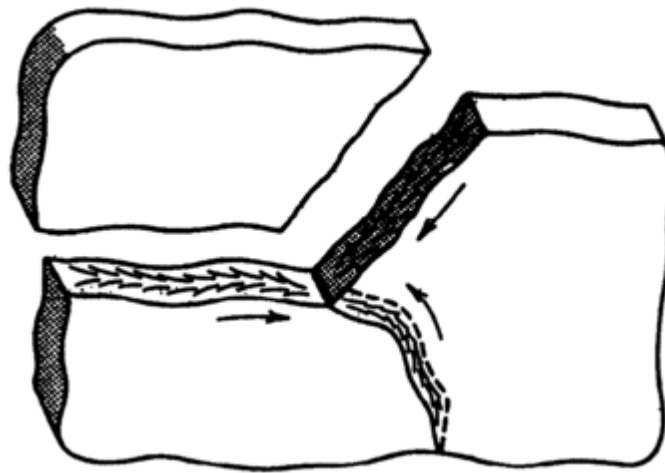
| | |
|---------------------------------|---|
| Εγκοπές ή αυλακώσεις | <ul style="list-style-type: none"> • SCC • ενδοκοκκική θραύση |
| Αυλακώσεις | Στεγνωμένο υγρό στην επιφάνεια. Μπορεί να υποδηλώνει ατελή καθαρισμό της επιφάνειας. Μπορεί να υποδηλώνουν υγρά κατά την διαδικασία προετοιμασίας. Το υλικό πρέπει να αναλυθεί. |
| Ρωγμές(σαν χαρακιές σε λάστιχα) | Συνιθισμένοστηκυκλικήφόρτιση. Εξ αιτίας παγιδευμένων σωματιδίων. |

Θα πρέπει επίσης να καταστεί σαφές ότι δεν είναι απαραίτητο να παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά που δημιουργούν ένα ελάττωμα σε μια επιφάνεια. Για παράδειγμα, τα Beach marks (σε χαμηλή μεγέθυνση) και ραβδώσεις (σε μεγαλύτερη μεγέθυνση) είναι γνωστά χαρακτηριστικά των ρωγμών καταπόνησης, αλλά δεν είναι πάντα παρόντα ή ορατά. Επιπλέον, δεν έχουν όλοι οι μηχανισμοί των θραύσεων μοναδικές εμφανίσεις. Για παράδειγμα, η ενδοκρυσταλλική ρωγμή μπορεί να προκληθεί από διάφορους μηχανισμούς.

Είναι επίσης σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η επιφάνεια της τομής παρέχει στοιχεία μόνο για την διαδικασία μετάδοσης της ρωγμής. Δεν αποκαλύπτει ενδείξεις των γεγονότων πριν από την πυρηνοποίηση και την ανάπτυξη. Εξέταση πέραν της επιφάνειας παρέχει επίσης πληροφορίες. Για παράδειγμα, η οπτική επιθεώρηση ενός σπασμένου στοιχείου μπορεί να δείχνει γεγονότα πριν από την έναρξη της ρωγμής, έτσι όπως μια αλλαγή του σχήματος μπορεί να δείχνει μια προηγούμενη παραμόρφωση. Ο μεταλλογραφικός έλεγχος υλικού που αφαιρείται από ένα τμήμα που βρίσκεται μακριά από τη θραυσμένη επιφάνεια, μπορεί επίσης να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την προτελευταία μικροδομή, συμπεριλαμβανομένης της παρουσίας εργασίας εν ψυχρώ (ολίσθησης, λυγισμένες διδυμίες ανόπτησης, ζώνες παραμόρφωσης, και / ή αλλαγή σε σχήμα των κόκκων), στοιχεία ταχείας φόρτωσης και / ή χαμηλής θερμοκρασίας υπηρεσίας (δίδυμες παραμόρφωσης), και ούτω καθεξής. Αυτό είναι επίσης απαραίτητο κατά την έρευνα αστοχίας.

Τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά κατά κανόνα συμβάλουν στον εντοπισμό της θέσης έναρξης της ρωγμής και την κατεύθυνση μετάδοσης της . Ο προσανατολισμός της επιφάνειας θραυσης , η θέση των αρχικών ρωγμών , και η κατεύθυνση της ρωγμής θα πρέπει να συσχετίζονται με την ένταση στο εσωτερικό που δημιουργείται από τα εξωτερικά φορτία και τη γεωμετρία των συστατικών . Όταν το προβληματικό στοιχείο είναι σε πολλά κομμάτια, και σημάδια σχήματος V είναι ορατά στην επιφάνεια του , η ανάλυση των διακλαδώσεων των

ρωγμών (διακλάδωση ρωγμών) (Σχ.1.11) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπίσει την τοποθεσία έναρξης των ρωγμών. Η ρωγή ξεκινά στην περιοχή όπου η τοπική ένταση (όπως καθορίζεται από τις εξωτερικές συνθήκες φορτώσεως, τη γεωμετρία του τμήματος, ή / και τις μακροσκοπικές και μικροσκοπικές περιοχές συγκέντρωσης έντασης) υπερβαίνει την τοπική αντοχή του υλικού. Έτσι, παραλλαγές στην αντοχή του υλικού και μικροσκοπικές ασυνέχειες (όπως ένα έγκλεισμα ή σφυρήλατη ραφή) πρέπει να εξετάζονται σε συνδυασμό με τις διακυμάνσεις στη τοπική πίεση που καθορίζεται από ασκούμενα φορτία και μακροσκοπικές συγκεντρώσεις έντασης (όπως μια γεωμετρική εγκοπή ή άλλη μεταβολή στην εγκάρσια τομή).

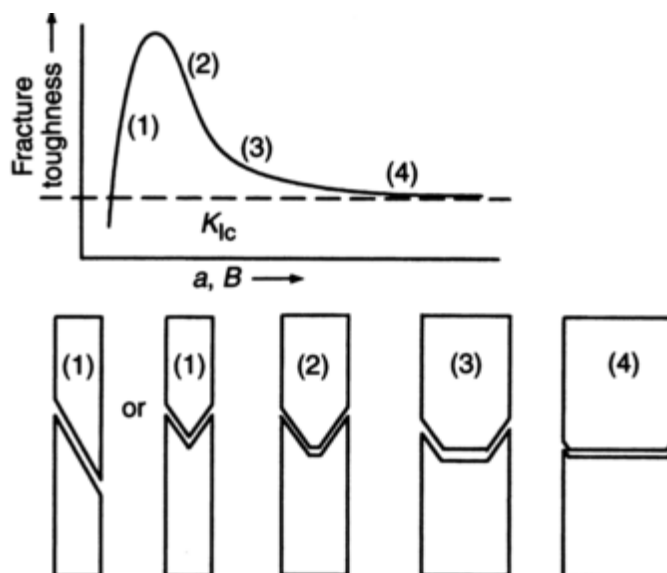


Σχήμα 1.11: Συστατικό που έχει σπάσει σε πολλά κομμάτια. Εάν σημάδια σχήματος V είναι ορατά στην επιφάνεια θραύσης ακολουθία του σχηματισμού των ρωγμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ληφθεί αλληλουχία σχηματισμού ρωγμών και η τοποθεσία της θέσης έναρξης [10]

Ο προσανατολισμός της επιφάνειας θραύσης σε σχέση με τη γεωμετρία του στοιχείου μπορεί να αποκλείσει επίσης κάποιες συνθήκες φόρτωσης (αξονική, κάμψη, στρέψη, μονοτονική έναντι κυκλικής) ως αιτιολογικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, η έναρξη της ρωγμής δεν αναμένεται κατά μήκος της κεντρικής γραμμής ενός στοιχείου σε κάμψη ή στρέψη, ακόμη και αν μια σημαντική ατέλεια του υλικού υπάρχει σε αυτή τη θέση επειδή δεν ασκείται φυσιολογική πίεση στον άξονα. (Υπάρχει μια τάση διαμήσεως σε αυτή τη θέση όταν βρίσκεται σε κάμψη, αλλά σε ένα ομοιογενές υλικό, είναι πολύ μικρή για να ξεκινήσει ρωγή. Αυτό δεν ισχύει για μια ελασματοποιημένη δομή σε κάμψη).

Ομοίως, η κατατομή της επιφάνειας θραύσης που είναι σχετική με την κατεύθυνση φόρτωσης μπορεί να υποδεικνύει τον τρόπο της τομής με ελαστικές συνθήκες (επίπεδης παραμόρφωσης) ή με ελαστικοπλαστικές συνθήκες (επίπεδης έντασης). Η ρωγή επίπεδης παραμόρφωσης (ή λειτουργία I) χαρακτηρίζεται από μία επίπεδη επιφάνεια κάθετη προς το

εφαρμοζόμενο φορτίο. Η επίπεδη ένταση (λειτουργία II) ρωγμή εμφανίζεται όταν η ένταση διαμήσεως γίνεται τρόπος λειτουργίας της παραμόρφωσης και της τομής (καθώς μέγιστες καταπονήσεις εμφανίζονται κατά μήκος της επίπεδης διάτμησης από τις βασικές αρχές της μηχανικής του συνεχούς). Στην ομαλής έντασης πυρόλυση, η κατατομή της τομής χαρακτηρίζεται από διάτμητά χείλη, τα οποία σχηματίζουν λοξή γωνία περίπου 45° με τη φορά της μέγιστης πίεσης που ασκείται (μολονότι η γωνία αυτή μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες του υλικού και την κατάσταση φόρτωσης). Σε γενικές γραμμές, αυτές οι διακυμάνσεις στις κατατομές των τομών σχετίζονται με τη σκληρότητα της τομής, η οποία εξαρτάται από το πάχος του τμήματος (B) και το μέγεθος (a) μιας προϋπάρχουσας ασυνέχειας, όπως μια εγκοπή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.12. Crack tip ακτίνα επηρεάζει επίσης τη συμπεριφορά της τομής.

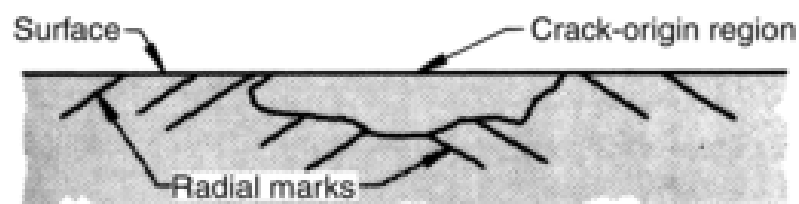


Σχήμα 1.12: Διακύμανση της σκληρότητας της τομής και των χαρακτηριστικών μακροκλίμακας των επιφανειών θραύσης για ένα εγγενώς ελατό υλικό. Καθώς το τμήμα πλαταίνει (B) ή το προϋπάρχων μήκος ρωγμής (a) αυξάνεται, συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης αναπτύσσονται πρώτα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής και οδηγούν σε μια επίπεδη επιφάνεια θραύσης. Με περαιτέρω αύξηση στο πάχος του τμήματος ή το μέγεθος της ρωγμής, η επίπεδη περιοχή απλώνεται προς το εξωτερικό μέρος του δοκιμίου, μειώνοντας το πλάτος των χειλών διάτμησης. Όταν η ελάχιστη τιμή της ανθεκτικότητας της επίπεδης παραμόρφωσης (K_{Ic}) έχει επιτευχθεί, τα χείλη διάτμησης έχουν πολύ μικρό πλάτος. [9]

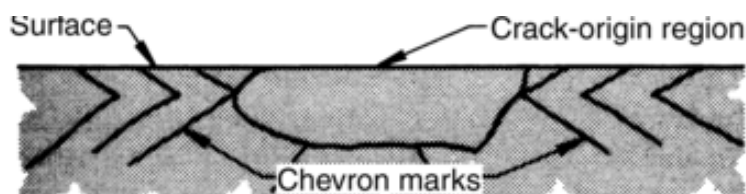
Η τραχύτητα της επιφάνειας και η οπτική ανακλαστικότητα παρέχουν επίσης ποιοτικές ενδείξεις για γεγονότα που συνδέονται με το μετάδοση της ρωγμής. Για παράδειγμα, μια θαμπή επιφάνεια υποδεικνύει όγκιμο ρήγμα μικροκλίμακας, ενώ μια λαμπερή, ιδιαίτερα ανακλαστική επιφάνεια δείχνει εύθραυστη ρωγμή με διάσπαση ή ενδοκοκκικής θραύσης. Επιπλέον, όταν η ενδοκοκκική ρωγμή εμφανίζεται σε χονδρόκοκκα υλικά, οι ατομικοί

ισομεγέθεις κόκκοι έχουν σχήμα καραμέλας που μπορεί να είναι ορατό με ένα μεγεθυντικό φακό. Από πλευράς καταγραφής των συνθηκών της επιφάνειας, ένα σημαντικό πρόβλημα με την οπτική μακροσκοπική ή μικροσκοπική εξέταση των τομών στη επιφάνεια είναι η ανικανότητά της σωστής εστίασης σε όλη την επιφάνεια, εάν η μεγέθυνση υπερβαίνει τα 5 έως 10 ×. Ως εκ τούτου, το SEM έχει γίνει ένα απαραίτητο μεταλλογραφικό εργαλείο της ανάλυσης αστοχίας.

Ψαθυρές αποτυχιές συχνά περιέχουν πολλαπλές ρωγμές και διαχωρισμένα κομμάτια, ενώ οι όλκιμες αποτυχιές υπερφόρτωσης συχνά προχωρούν ως ενιαίες ρωγμές, χωρίς πολλαχωρισμένα κομμάτια ή σημαντικές ρωγμές διακλάδωσης στη θέση κατάγματος. Υπό τις κατάλληλες συνθήκες, οι επιφάνειες θραύσης μπορεί επίσης να έχουν ακτινικά σημάδια και σημάδια σχήματος V, τα οποία είναι μακροσκοπικά επιφανειακά χαρακτηριστικά που δείχνουν την περιοχίτη θέση έναρξης των ρωγμών και την κατεύθυνση διάδοσης τους. Αυτά ενώ είναι κοινά και δεσπόζοντα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά ρωγμών σε σφυρήλατά μεταλλικά υλικά, συχνά απουσιάζουν ή είναι ανεπαρκώς εμφανή στα προϊόντα χύτευσης. Το "V" ενός σημαδιού οδηγεί πίσω στην θέση έναρξης, και μία αλληλουχία των "V" σε όλη την επιφάνεια της τομής δείχνει τη διεύθυνση-μετάδοσης της ρωγμής. Η εμφάνιση των σημαδιών σχήματος V ή των ακτινικών σημαδιών κοντά στη αρχική ρωγή εξαρτάται εν μέρει από το αν η ταχύτητα ανάπτυξης της ρωγμής στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από εκείνη κάτω από την επιφάνεια. Εάν η ταχύτητα ανάπτυξης της ρωγμής είναι μέγιστη στην επιφάνεια, ακτινικά σχήματα έχουν σχήμα βεντάλιας (Σχ. 1.13). Αν ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής είναι μεγαλύτερος κάτω από την επιφάνεια, το αποτέλεσμα είναι μοτίβα σχήματος V (Σχ. 1.14).

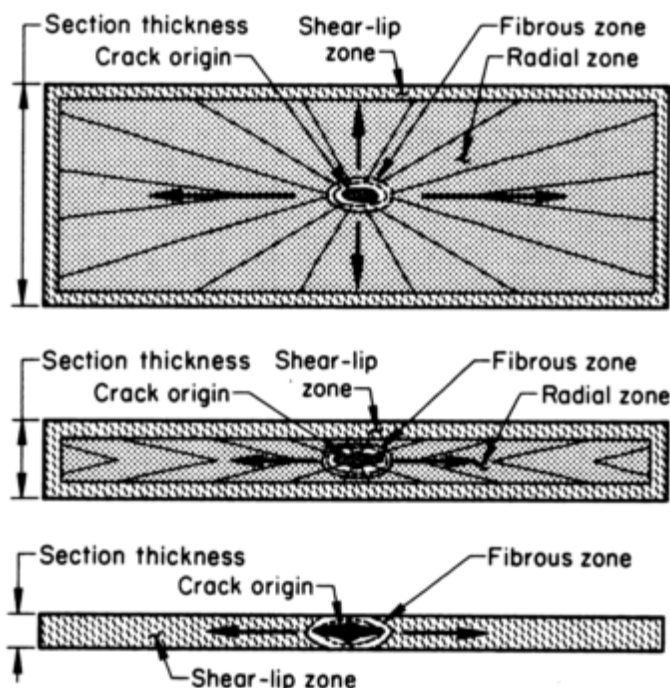


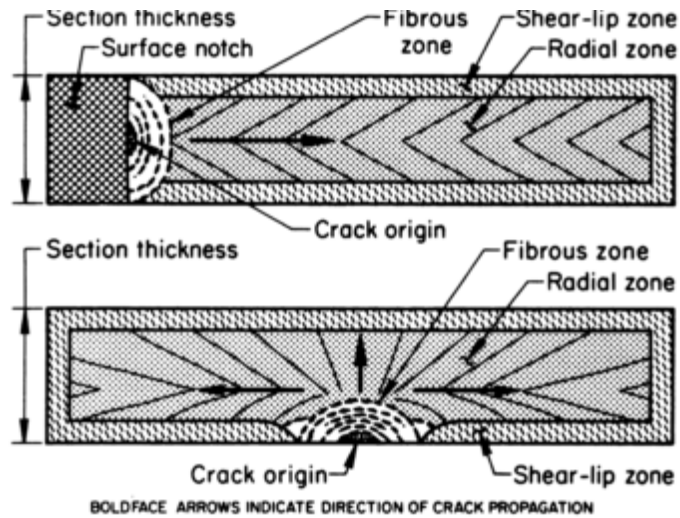
Σχήμα 1.13: Ακτινωτά σημάδια τυπικά της διάδοσης ρωγμών η οποία είναι η ταχύτερη στην επιφάνεια (αν η διάδοση είναι ανεπηρέαστη από τη διαμόρφωση μέρους ή όλου του δοκιμίου)



Σχήμα 1.14:Μοτίβα V σχήματος τυπικά όταν η μετάδοση της ρωγμής είναι ταχύτερη κάτω από την επιφάνεια. Έχει, επίσης, παρατηρηθεί σε θραύσματα τμημάτων που έχουν πάχος πολύ μικρότερο από το μήκος ή το πλάτος τους (βλέπε Σχ.1.15).

Σε ορθογώνια τμήματα, οι διαστάσεις του δοκιμίου μπορούν να επηρεάσουν την εμφάνιση των ακτινωτών σημάτων και των μοτίβων σχήματος V. Για παράδειγμα, μακροχαρακτηριστικά τομών αχάρακτων τμημάτων φαίνονται στο σχήμα1.15 για τμήματα με διάφορες αναλογίες πλάτους προς πάχος (W / T). Η w / t αναλογία επηρεάζει την ικανότητα του δοκιμίου να διατηρήσει μια μονόδρομη κατάσταση τάσης κατά τον εφελκυσμό. Σε ένα παχύ τμήμα (κορυφή), η παραμόρφωση στην κατεύθυνση του πλάτους περιορίζεται και έτσι τείνει σε μια κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης (τύπος 1) της τομής. Σε αυτή την περίπτωση, ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας θραύσης αποτελείται από ακτινωτές σημάσεις ή μοτίβα σχήματος V που είναι ενδεικτικά ταχείων, ασταθών ρωγμών. Σε υψηλότερες w / t αναλογίες, η ακτινωτή ζώνη καταστέλλεται υπέρ μιας μεγαλύτερης ζώνης χείλους διάτμησης. Σε πολύ λεπτά τμήματα (κάτω), προϋποθέσεις επίπεδης έντασης ισχύουν, και η επιφάνεια θραύσης αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ένα χείλος διάτμησης εκτός της ινώδους ζώνης τηςθέσης έναρξης της ρωγμής. Το Σχήμα1.16 δείχνει ακτινωτά και σχήματος V σημάδια όταν η τομή ξεκινάει από εγκοπές στην επιφάνεια.



Σχήμα 1.15:Τυπική εμφάνιση ρωγμών για λεία τμήματα κατά τον έλεγχο για αντοχή στον εφελκυσμό**Σχήμα 1.16:**Τυπική εμφάνιση ρωγμών για τετράγωνα τμήματα με πλαινές και γωνιακές εγκοπές κατά τον έλεγχο για αντοχή σε εφελκυσμό.

Αν οι συνθήκες είναι κατάλληλες, τα ακτινωτά μοτίβα που σχετίζονται με την ταχεία ή ασταθή διάδοση ρωγμών μπορεί να εμφανιστούν και σε ένα κυλινδρικό τμήμα. Αυτό το ακτινικό μοτίβο, που ονομάζεται ορισμένες φορές ακτινική διάτμηση, αστέρι, ή ροζέτα, είναι κάθετο προς τη ρωγή και, ως τέτοια, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το στρογγυλό δείγμα ισοδύναμο των ακτινικών σημάνσεων ή των chevron μοτίβων που εμφανίζονται στο σε δείγματα φύλλου ή πινάκων, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Τα ακτινικά σημάδια ή ακτινωτά σημάδια διάτμησης, είναι οπτικά διακριτά από την ινώδη περιοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.17 για ένα λείο δοκίμιο χάλυβα SAE4150 με διαφορετικές αντοχές. Το Σχήμα 1.17(α) δείχνει ένα σαφές όριο μεταξύ της ινώδους κεντρικής περιοχής και του μεγάλου μοτίβου κορυφογραμμίστων ακτινικών σημάτων. Το σχήμα 1.17(β) εμφανίζει ακτινικά, πιο ρηχά σημάδια και μια ελαφρώς μεγαλύτερη ινώδη ζώνη που προκλήθηκε από θερμική επεξεργασία και που οδηγεί σε μεγαλύτερη ολκιμότητα. Το σχήμα 1.17(γ) δείχνει πολύ αδύναμη ρηχά ακτινικά σημάδια που αναπτύσσονται πιο μακριά από το κέντρο.

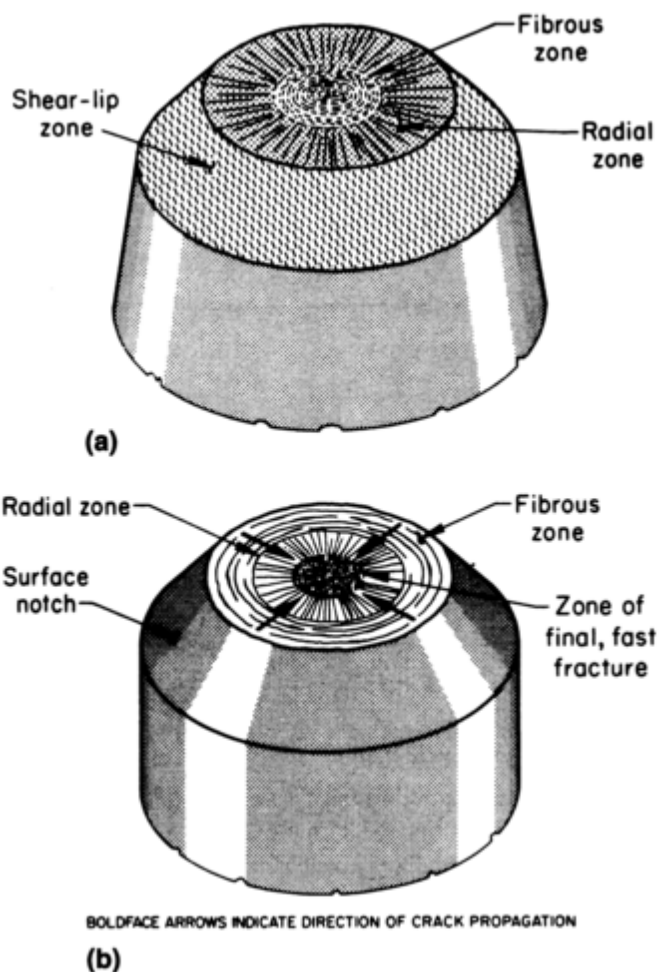


| Δοκίμιο | Σκληρότητα | Κρίσιμο στοιχείο ελαστικότητας | | Δύναμη εφελκυσμού | | Μείωση της περιοχής % | Charpy V-notch Impact energy | | Ινώδης ζώνη ως ποσοστό της συνολικής περιοχής |
|---------|------------|--------------------------------|-------|-------------------|-------|-----------------------|------------------------------|--------|---|
| | | MPa | ksi | MPa | ksi | | J | ft lbf | |
| (a) | 285 | 0.73 | 0.106 | 0.83 | 0.120 | 66 | 163 | 120 | 25 |
| (b) | 258 | 0.65 | 0.094 | 0.79 | 0.115 | 67 | 174 | 128 | 31 |
| (c) | 301 | 0.81 | 0.117 | 0.97 | 0.141 | 49 | 27 | 20 | 44 |

Σχήμα 1.17: Ακτινωτά σημάδια κατά τη διάρκεια δοκιμής εφελκυσμού από την Society of Automotive Engineers (SAE) σε δοκίμιο χάλυβα 4150 που μετασχηματίστηκε ισόθερμα σε μπαινίτη, ψύχτηκε σε θερμοκρασία δωματίου και μετακατεργάστηκε θερμικά. (α) Κατω μπαινίτης, ισόθερμα μετασχηματίζεται στους 300 °C (570 °F) για 1 h, επεξεργάζεται θερμικά στους 600 °C (1110 °F) για 48 ώρες.

(β) Κατώτερο μπαινίτη, ισόθερμα μετασχηματίζονται στους 375 °C (705 °F) για 1 h, μετριάζεται στους 600 °C (1110 °F) για 48h. (γ) Άνω μπαινίτη, μετασχηματίζεται ισόθερμα στους 450 °C (840 °F) για 24 ώρες, όπως έσβησε. Πηγή: David Johnson, διατριβή, Πανεπιστήμιου Τενεσί.

Ακτινωτά σημάδια στην επιφάνεια θραύσης ξενόζλειου κυλινδρικού δοκιμίου κατά την δοκιμή εφελκυσμού (Σχ. 1.18) δείχνουν προς το κέντρο, το οποίο έχει μαινώδη εμφάνιση που σχετίζεται με όλκιμη έναρξη ρωγμής και την ανάπτυξη από συνένωση μικροκενών. Ωστόσο, εάν το δείγμα έχει εγκοπές (Σχ. 1.18b), τότε έναρξη της ρωγμής μπορεί να αρχίσει σε διάφορες περιοχές κατά μήκος της περιφέρειας κοντά στη ρίζα της εγκοπής, όπου η συγκέντρωση τάσης συντελείται. Η περιοχή έναρξης της ρωγμής μπορεί να έχει ακόμη μαινώδη εμφάνιση ενδεικτική της συνένωσης μικροκενών (MVC) κοντά στη ρίζα της εγκοπής, αλλά η περιοχή τελικής, γρήγορης είναι στο κέντρο και περίπου κάθετα προς το εφαρμοζόμενο φορτίο. Έτσι, ακόμη και αν οιακτινικές σημάνσεις φαίνεται να δείχνουν προς το κέντρο, οι συνθήκες στην επιφάνεια υποδεικνύουν ότι η κεντρική περιοχή είναι η περιοχή τελικής θραύσης κι όχι της ρωγμής έναρξης. Στην πραγματικότητα, το μέγεθος της εγκοπής είναι επαρκές για να προκαλέσει θραύση επίπεδης παραμόρφωσης όπως αποδεικνύεται από την έλλειψη του χείλους διάτμησης.



Σχήμα 1.18: Περιοχές της επιφάνειας θραύσης σε κυλινδρικά δοκίμια κατά τη δοκιμή εφελκυσμού. (α) Η επιφάνεια τομής κωνικού τμήματος από μια λεία ράβδο εφελκυσμού. (β) Επιφάνεια τομής δοκιμίου με εγκοπές. Σε αντίθεση με την επιφάνεια θραύσης για ένα λείο δοκίμιο, η επιφάνεια θραύσης για ένα δοκίμιο με εγκοπές (β) δεν έχει χείλη διάτμησης επειδή η ρωγμή ξεκινά κοντά στη ρίζα της εγκοπής (και εντελώς γύρω από τα δοκίμια σε αυτή την εξιδανικευμένη περίπτωση χωρίς επιπλέον αυξανόμενη ένταση).

[9]

Μακροσκοπική εικόνα των ολκίμων θραύσεων. Όπως σημειώθηκε στον Πίνακα 1.2, τα ολκίμα θραύσματα χαρακτηρίζονται τυπικά από την ένδειξη πλαστικής παραμόρφωσης, όπως η δημιουργία λαιμού ενός δοκιμίου κατά τη δοκιμή εφελκυσμού. Ελατές θραύσεις συχνά προχωρούν ως ενιαίες ρωγμές, χωρίς πολλά χωρισμένα κομμάτια ή σημαντικές διακλαδώσεις της ρωγμής. Η περιοχή έναρξης μιας ρωγμής έχει συνήθως μια θαμπή ή νώδη εμφάνιση που είναι ενδεικτική της πυρόλυσης από MVC. Η κατατομή της ρωγμής δίπλα στο θραύσμα συνάδει με σχίσμο. Η επιφάνεια θραύσης μπορεί να έχει ακτινικές σημάνσεις, σημάνσεις σχήματος V, και χείλη διάτμησης, ανάλογα με την γεωμετρία του δοκιμίου και την κατάσταση του υλικού, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

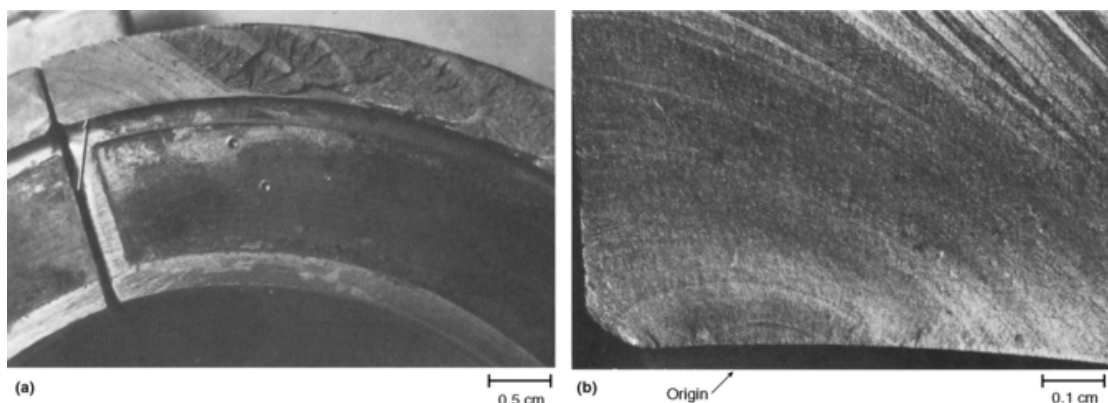
Ένα παράδειγμαμικτής θραύσης (Iκαι II)είναι η κλασικήcup and coneεμφάνιση απόόλκιμεςθραύσειςγλείουκυλινδρικούδοκιμίουκατά τη δοκιμή εφελκυσμού(Σχήμα 1.18α). Στην περίπτωση αυτή, η ρωγήπροέρχεται κοντά στοκέντροτου δοκιμίου, όπουαναπτύσσονται υδροστατικέςτάσεις κατά την έναρξητουλαιμούκαι όπουαναπτύσσονταικαι μεγαλώνουν μικροκενά. Πολλαπλέςρωγμέςενώνονταικαι εξαπλώνονταιπρος τα έξωκατά μήκος του επιπέδουπρος στον άξοναφόρτισης, που εκπροσωπούν το τύποI(επίπεδη-παραμόρφωση) διάδοσης ρωγμών. Όταν οιρωγμέςφτάσουν μιαπεριοχήκοντά στηνεξωτερική επιφάνεια, ο τρόπος θραύσηςαλλάζειστον τύποII(κατάσταση επίπεδης-τάσης),όπουη διατμητική παραμόρφωσηγίνεται τρόπος λειτουργίαςτης παραμόρφωσης. Έτσι, ακόμηκαι αν η συνολικήεφαρμοζόμενη καταπόνησηεξακολουθεί να είναι έναφορτίο εφελκυσμού, η παραμόρφωσηκάνειμια μετάβασηπρος τηδιατμητική επιφάνειαστις εξωτερικές περιοχέςτου δείγματος καισυνεπώςέχει ως αποτέλεσμαμαχίλη διάτμησης45°πουείναι ενδεικτικάτης θραύσης τύπουII. Εναλλακτικά, ο τρόπος θραύσηςμπορεί να είναι εντελώςεπίπεδηςπαραμόρφωσηςόταν εισάγεται μια αρκετάμεγάλη ρωγήή εγκοπή(Σχ.1.18β).

Μακροσκοπικά φαινόμενα ψαθυρών θραύσεων. Οι ψαθυρές αποτυχίες υπερφόρτωσης, σε αντίθεση με τις όλκιμες αποτυχίες υπερφόρτωσης,χαρακτηρίζονται από ελάχιστη ή καμία μακροσκοπική πλαστική παραμόρφωση. Η ψαθυρή θραύση αρχίζει και διαδίδεται πιο εύκολα από τις όλκιμες ρωγμές ή τις λεγόμενες «υποκρίσιμες" διεργασίες διάδοσης της ρωγμής όπως η κόπωση ή οι ρωγμές διάβρωσης τάσεως.Επειδή τα ψαθυρά θραύσματα χαρακτηρίζονται από σχετικά ταχεία αύξηση της ρωγμής, η διαδικασία σχηματισμού της ρωγμής αναφέρεται ορισμένες φορές ως "ασταθής" ή "κρίσιμη", επειδή η διάδοση της ρωγμής οδηγεί γρήγορα στητελική θραύση.

Η μακροσκοπική συμπεριφορά είναι κατ' ουσίαν ελαστική μέχρι το σημείο της αστοχίας. Η ενέργεια της αστοχίας απορροφάται κυρίως από τη δημιουργία νέων επιφανειών, δηλαδή, ρωγμών. Για το λόγο αυτό, ψαθυρές αστοχίες συχνά περιέχουν πολλαπλές ρωγμές και διαχωρισμένα κομμάτια, οι οποίες είναι λιγότερο συχνές σε όλκιμες αστοχίες υπερφόρτωσης. Οι μηχανισμοί ψαθυρής θραύσηςμπορεί να εμφανίζουν μοτίβα σχήματος V ή τύπου φαροκόκαλου που δείχνουν την προέλευση της τομής και την κατεύθυνση της ταχείας θραύσης.Μοτίβα σχήματος V εμφανίζονται κυρίως σε δομικούς χάλυβες και σιδηροτροχιών (web), χάλυβα ή όλκιμα κράματα χαμηλής αντοχής. Τα μοτίβα σχήματος V εξαρτώνται από την αντοχή, την ολκιμότητα, και το πάχος του τμήματος και, κανονικά δεν εμφανίζονται σε κράματα υψηλής αντοχής.

Μοτίβα τύπου ψαροκόκαλου είναι μοναδικά μικροσκοπικά χαρακτηριστικά των ψαθυρών θραύσεων. Όλκιμη πυρόλυση, η οποία συμβαίνει μέσω της συνένωσης μικροκενών, δεν οδηγεί σε ένα μοτίβο τύπου ψαροκόκαλου. Σε μια μικροσκοπική κλίμακα, τα χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί θραύσης μπορεί να έχουν στοιχεία όλκιμης ή ψαθυρής διάδοσης ρωγμών, αλλά η μακροσκοπική διαδικασία θραύσης χαρακτηρίζεται από ελάχιστη ή καμία εργασία που καταβλήθηκε από την παραμόρφωση.

Μακροσκοπική εμφάνιση της θραύσης κόπωσης. Η εξέταση μιας θραύσης λόγω κόπωσης συνήθως αρχίζει με οπτική παρατήρηση, που συχνά ακολουθείται από την προβολή με ένα μεγεθυντικό φακό ή στερεοσκοπικό μικροσκόπιο. Η μακροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης μπορεί να γίνει επί τόπου (όταν το σπασμένο μέρος είναι προσιτό), απαιτεί ελάχιστη ή καθόλου προετοιμασία του δοκιμίου, και χρησιμοποιεί ελάχιστό και σχετικά απλό εξοπλισμό. Δεν καταστρέφει το δοκίμιο και δεν τροποποιεί τις επιφάνειες θραύσης. Η μακροσκοπική εξέταση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο συσχέτισμό των χαρακτηριστικών της επιφάνειας θραύσης με το μέγεθος και το σχήμα του τμήματος και με τις συνθήκες φόρτωσης. Οι ρίζες της κόπωσης συχνά βρίσκονται πιο εύκολα προβάλλοντας την επιφάνεια θραύσης σε χαμηλές μεγεθύνσεις (από 30 έως 50 ×). Για παράδειγμα, το Σχήμα 1.19 δείχνει μια τομή ενός σωλήνα χάλυβα. Η περιοχή έναρξης είναι διακριτή με ταχογράφο, όπως φαίνεται από το βέλος. Η θέση του μετώπου της ρωγμής σε διάφορους χρόνους κατά τη διάρκεια της διεργασίας της αστοχίας είναι επίσης ορατή όπως και τα λεγόμενα beach marks που είναι αρχικά αρκετά ομόκεντρα με την θέση έναρξης.

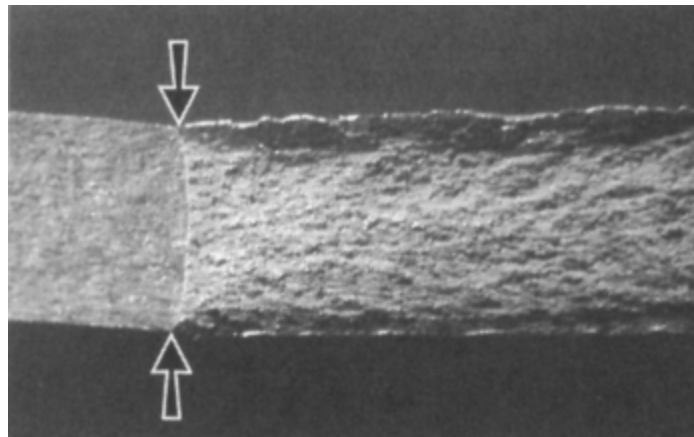


Σχήμα 1.19:Κρυσταλλογραφία μιας τυπικής ρωγμής κόπωσης σε ένα σφικτήριο. (α) Η προέλευση της ρωγμής κόπωσης σημειώνεται με βέλος. Η ρωγμή διαδίδεται προς τα δεξιά με συνεχή ρωγμάτωση κόπωσης (φωτεινή περιοχή), στη συνέχεια συνέχισε εκ περιτροπής από το ταχύ σχίσσιμο σε αργή ρωγμάτωση λόγω κόπωσης. 2 ×. (β) Μεγεθυμένη άποψη της περιοχής κοντά στο βέλος σε 10 ×. [8]

Μακροσκοπικά, η θραύση κόπωσης έχει συνήθως μια ψαθυρή εμφάνιση και στερείται την πλαστική παραμόρφωση (π.χ. στένωση) που είναι χαρακτηριστικό της όλκιμης θραύσης

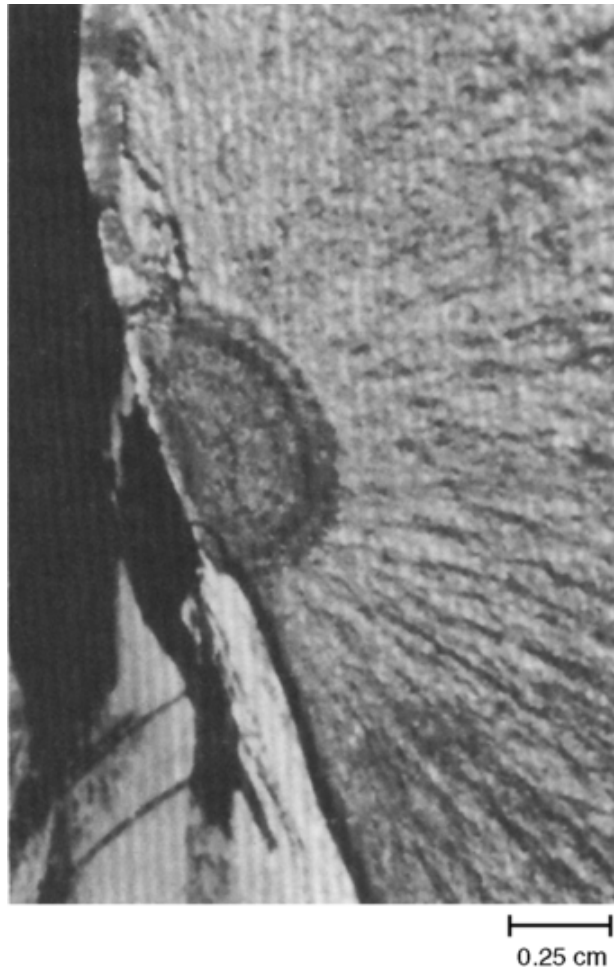
υπερφόρτωσης λόγω εφελκυσμού. Σε αντίθεση με την όλκιμη θραύση υπερφόρτωσης, η οποία έχει γενικά χείλος διάτμησης περίπου (κλίση τομής 45°) κατά μήκος των ελεύθερων επιφανειών, η διάδοση της θραύσης κόπωσης τυπικά τέμνει τις ελεύθερες επιφάνειες σε ορθή γωνία (Σχ. 1.20). Αυτό παρέχει ένα εργαλείο που βοηθάει στο προσδιορισμό της τοποθεσίας της κόπωσης.

Από κοινού με άλλων τρόπων θραύσης, όπως η διάβρωση υπό τάση, ή η κόπωση πεδίου, οι θραύσεις είναι συχνά διακοσμημένες με περισσότερο ή λιγότερο καμπύλα σημάδια που οριοθετούν τη θέση του μετώπου της ρωγμής σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτά τα σημάδια συνήθως αποκαλούνται beach marks και είναι επίσης γνωστά ως clamshell marks ή arrest marks.



Σχήμα 1.20: Δείγμα τομής δοκιμίου από κράμα αλουμινίου, πάχους 6,3 mm (0,25 ίντσες). Η ρωγμή κόπωσης στο αριστερό των βελών είναι επίπεδη και κάθετη προς τις πλευρικές επιφάνειες (απουσία των beach marks σε αυτή τη τομή). Η θραύση υπερφόρτωσης προς τα δεξιά των βελών έχει χείλος διάτμησης 45° και εκτείνεται προς τα πάνω στη πάνω πλευρά του δείγματος και προς τα κάτω στην πλευρά του πυθμένα. [11]

Τα beach marks παράγονται από μια αλλαγή στις συνθήκες ανάπτυξης των ρωγμών, όπως μια αλλαγή στο περιβάλλον ή στο επίπεδο τάσης ή μια παύση στην κυκλική τάση (διακοπή της υπηρεσίας). Έτσι, beach marks δεν υπάρχουν πάντα στην επιφάνεια μιας θραύσης κόπωσης. Για παράδειγμα, beach marks δεν βρίσκονται σε εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιούνται κάτω από ομοιόμορφες περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες φόρτωσης (Σχήμα 1.20). Επιπλέον, η παρουσία των beach marks, δεν αποδεικνύει θραύση λόγω κόπωσης. Beach marks μπορούν επίσης να εμφανιστούν όταν η θραύση είναι αποτέλεσμα διάβρωσης υπό τάση (Σχήμα 1.21).



Σχήμα 1.21: Beach marks σε ένα τμήμα χάλυβα 4340 που προκλήθηκαν από διάβρωση υπό τάση. Η αντοχή εφελκυσμού του χάλυβα ήταν περίπου 1780 με 1900 MPa (260 έως 280 ksi). Τα beach marks είναι αποτέλεσμα του διαφορετικού ρυθμού διεύθυνσης της διάβρωσης στην επιφάνεια. Σε καμία περίπτωση δεν σχετίζονται με σημάδια κόπωσης. 4 ×

1.4 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ

Η σημασία της μικροδομής προς τις ιδιότητες των μετάλλων και των κραμάτων έχει αναγνωριστεί από καιρό. Το μέγεθος του κόκκου, οι διδυμίες, καθώς και το μέγεθος, το σχήμα και η κατανομή της δεύτερης φάσης σωματιδίων είναι σημαντικά στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των περισσότερων δομικών μετάλλων. Ως εκ τούτου, ο χαρακτηρισμός των μικροδομών με οπτική μικροσκοπία είναι απαραίτητη. Έχουν καθιερωθεί παράμετροι στη διαδικασία ελέγχου για να παρέχουν συγκεκριμένα μεγέθη κόκκων. Ο αριθμός, το μέγεθος και η κατανομή της δεύτερης φάσης σωματιδίων, όπως εγκλείσματα, συχνά καθορίζονται και ποσοτικές μεταλλογραφικές διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν τη μικροδομή.

Το παρόν κεφάλαιο σχετικά με τη μικροανάλυση επικεντρώνεται κυρίως στη μέθοδο της οπτικής μικροσκοπίας με λίγο με τη SEM στη κρυσταλλογραφία. Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, το ανώτατο όριο των χρήσιμων μεγεθύνσεων σε ένα οπτικό μικροσκόπιο είναι περίπου $1500\times$, και οι περιορισμοί των οπτικών συστημάτων περιορίζουν την ανάλυση σε χαρακτηριστικά που είναι από $\sim 0,2\ \mu\text{m}$ ή μεγαλύτερα. Επομένως, η οπτική μικροσκοπία χρησιμοποιείται κυρίως για να εξετάσει τις δομές των κόκκων και τη μορφολογία των μεγάλων σωματιδίων δεύτερης φάσης. Ωστόσο, πολλά άλλα χαρακτηριστικά μικροδομής που είναι πολύ μικρά για να παρατηρηθούν χρησιμοποιώντας οπτικό μικροσκόπιο μπορούν επίσης να επηρεάσουν τις ιδιότητες των μετάλλων και των κραμάτων. Μετατοπίσεις, πολλά είδη των σωματιδίων δεύτερης φάσης, ελικοειδείς και διατεταγμένες δομές και πολλές πτυχές των μαρτενσιτικών δομών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως πολύ μικρές για το οπτικό μικροσκόπιο. Αυτά τα χαρακτηριστικά απαιτούν εξέταση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, που αναλύεται αλλού (βλέπε τα άρθρα «ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης» σε αυτό τον τόμο)

Η μικροσκοπία είναι επίσης απαραίτητη για την ανάλυση αστοχιών που οφείλονται σε θραύση, φθορά, ή / και διάβρωση. Το τμήμα "Μικροκρυσταλλογραφίας" σε αυτό το κεφάλαιο εν συντομία συγκρίνει την εφαρμογή του οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου στη κρυσταλλογραφική ανάλυση. Μια άλλη σημαντική τεχνική στη μικροανάλυση είναι η μεταλλογραφία αποτύπωσης όπου τα δείγματα είναι αντίγραφα που λαμβάνονται επί τόπου από τα συστατικά στο πεδίο. Υπάρχουν δύο τύποι αποτυπώσεων: τα αντίγραφα επιφάνειας και τα αντίγραφα εξαγωγής. Τα αντίγραφα επιφάνειας παρέχουν μια εικόνα της τοπογραφίας της επιφάνειας του δοκιμίου, ενώ τα αντίγραφα εξαγωγής παίρνουν σωματίδια από το δοκίμιο.

1.4.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

Ο οπτικός χαρακτηρισμός των μικροδομών των μετάλλων και των κραμάτων περιλαμβάνει την ταυτοποίηση και τη μέτρηση των φάσεων, των ιζημάτων, και των συστατικών, και τον προσδιορισμό του μεγέθους και του σχήματος των κόκκων, το βαθμό της διδυμίας, και μερικά από τα χαρακτηριστικά των ορίων των κόκκων και άλλων παρατηρήσιμων ελαττωμάτων. Μικροδομές στερεοποίησης, μετασχηματισμού στερεάς κατάστασης, παραμόρφωσης, και ανόπτωσης είναι οι τέσσερις βασικοί τύποι στα μέταλλα και κράματα. Καθένα από αυτά έχει διακριτά χαρακτηριστικά, όπως περιγράφονται παρακάτω. Η ανισοτροπία του προσανατολισμού των κόκκων είναι επίσης σημαντική, όταν χαρακτηρίζεται η μικροδομή του υλικού.

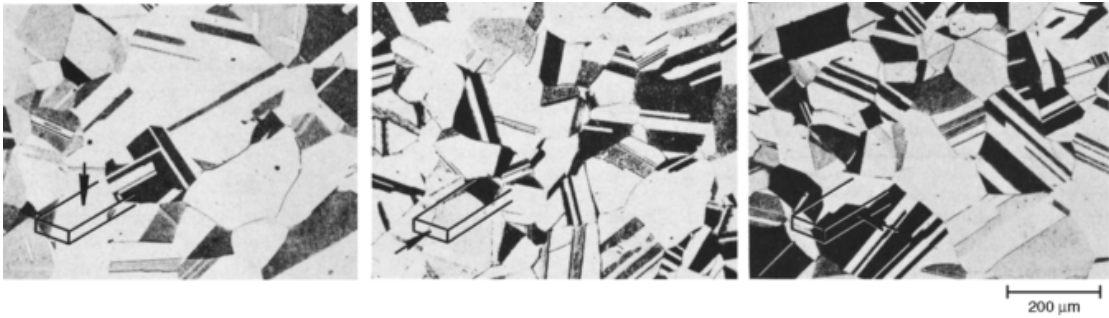
Ανισοτροπία

Τα χαρακτηριστικά μικροδομής υπάρχουν σε τρεις διαστάσεις, ενώ η μεταλλογραφική παρατήρηση τυπικά αντιπροσωπεύει μόνο δύο διαστάσεις. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματική μικροσκοπία συχνά απαιτεί παρατηρήσεις μικροδομής σε δύο ή περισσότερες κατευθύνσεις. Για παράδειγμα, τα Σχήματα 1.22 και 1.23 απεικονίζουν την αξία της προβολής της μικροδομής σε διάφορες κατευθύνσεις. Το Σχήμα 1.22 δείχνει μία ανοπτημένη μικροδομή που παρουσιάζει παρόμοια σχήματα κόκκων και στις τρεις απόψεις. Το μέγεθος των κόκκων χαρακτηρίζεται από την τοποθέτηση μιας γραμμής γνωστού μήκους (ή κατά προτίμηση ενός κύκλου γνωστής περιφέρειας), στη μεγεθυμένη εικόνα της μικροδομής και μετρώντας τον αριθμό των διασταυρώσεων μεταξύ της γραμμής και των ορίων των κόκκων στη μικροδομή. Ο αριθμός των διασταυρώσεων των ορίων των κόκκων, P , μπορεί να μετατραπεί σε ένα μέτρο του μεγέθους κόκκων, l , χρησιμοποιώντας:

$$l = \frac{L}{P \cdot M} \quad (1.1)$$

όπου M είναι η μεγέθυνση της παρατηρούμενης εικόνας, L είναι το μήκος της γραμμής στη εικόνα, και το μέγεθος των κόκκων (l) είναι το μέσο γραμμικό μήκος της τομής. Η μικροδομή του ανοπτημένου κράματος (Σχ. 1.22) είναι ιστροπική, ενώ οι κόκκοι επιμηκύνονται προς την κατεύθυνση έλασης και πλαταίνουν στις εγκάρσιες κατευθύνσεις όταν το κράμα είναι σε κατάσταση κρίας έλασης. Αυτή η ανισότροπη δομή του κόκκου δημιουργεί επίσης ανισότροπες μηχανικές ιδιότητες. Φυσικές ιδιότητες μπορεί επίσης να είναι ανισότροπες, ειδικά σε μονοφασικά κράματα λόγω υφής. Έτσι, τα ανισότροπα υλικά μπορεί να χρειάζονται την επιλογή, την προετοιμασία, και την προβολή των δοκιμών από διαφορετικές κατευθύνσεις.

Αυτό εξετάζεται περαιτέρω στο άρθρο «Μεταλλογραφικές καταχωρήσεις και εξαγωγή δειγμάτων» σε αυτό το κεφάλαιο. Σύγχρονες τεχνικές περιλαμβάνουν επίσης μεθόδους τρισδιάστατης αναπαράστασης.



Σχήμα 1.22: Φύλλα κράματος χαλκού 26000 (φυσίγγιο ορειχάλκου, 70%) ελασματοποιημένα εν θερμώ σε πάχος 10 mm (0,4 ίντσες), ανοπτημένα, έπειτα ελασματοποιημένα εν ψυχρώ σε πάχος 6 mm (0,230 ίντσες), και ανοπτημένα σε ένα μέγεθος κόκκου από 0,120 χιλιοστά (0,005 ίντσες). Κατά τη μείωση αυτή, οι κόκκοι είναι ουσιαστικά ισοαξονικοί. Συγκρίνετε με το σχήμα. 23. Το διάγραμμα στο κάτω αριστερό μέρος του κάθε μικρογράφηματος δείχνει τον προσανατολισμό της προβολής σε σχέση με την επίπεδη έλαση του φύλλου. Χαραγμένο χρησιμοποιώντας NH_4OH και H_2O_2 . 75 x. [8]

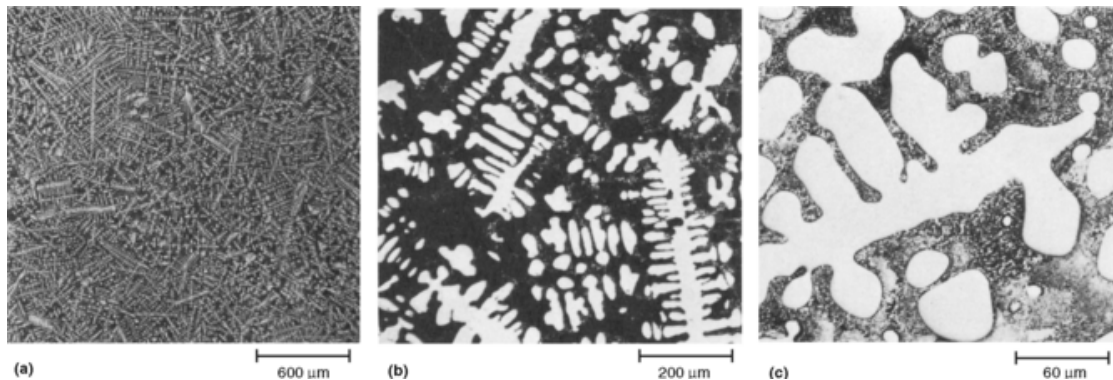


Σχήμα 1.23: Ίδιο κράμα και επεξεργασία όπως στο σχήμα 1.22, αλλά μειωμένο κατά 50% με ψυχρή έλαση από τις 6 mm (0,239 ίντσες) στις 3 mm (0,120 in). Οι κόκκοι επιμηκύνονται στην κατεύθυνση έλασης. Διαγράμματα δείχνουν ίδιο προσανατολισμό της αποψησότητας στο σχήμα 1.22. Χαραγμένο με NH_4OH και H_2O_2 . 75 x. [8]

Δομές στερεοποίησης

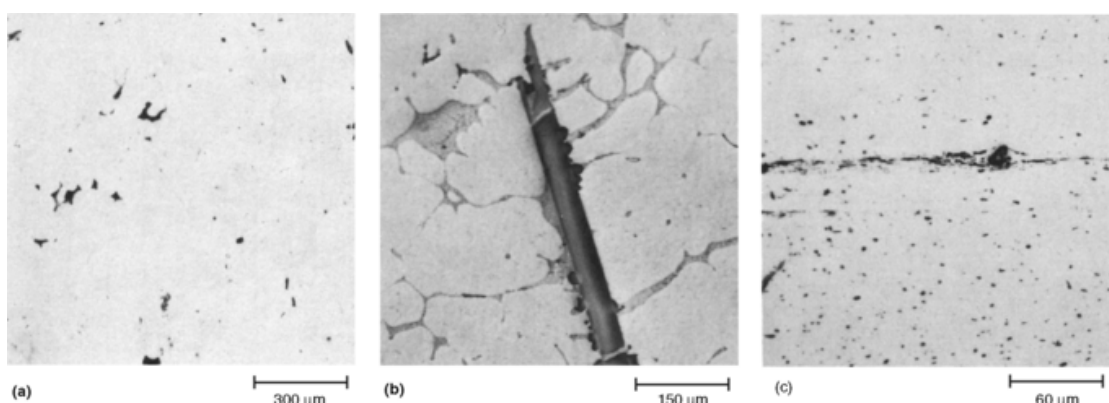
Οι πιο συχνά παρατηρούμενες δομές στερεοποίησης είναι οι δενδρικές (Σχ. 1.24). Μια δενδρική κατασκευή επιδεικνύει συνήθως συνθετικές παραλλαγές, με την κύρια, τη δευτερογενή και τη τριτογενή δενδρική διακλάδωση να περιέχουν λιγότερα στοιχεία κράματος ή προσμίξεων από τις ενδοδενδρικές περιοχές. Εξαιτίας αυτών των αλλαγών της σύνθεσης (που ονομάζεται "πυρήνωση"), το ποσοστό της χημικής προσβολής σε ενδοδενδρικές περιοχές διαφέρει από εκείνης στις δενδρικές διακλαδώσεις. Εάν το στοιχείο του κράματος ή το περιεχόμενο των προσμίξεων είναι υψηλό, οι ενδοδενδρικές περιοχές μπορεί να αναπτύξουν μία δομή δύο φάσεων. Επειδή η απόσταση μεταξύ των δενδρικών

διακλαδώσεων τείνει να μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού ψύξης, οι ιδιότητες των μετάλλων με χυτή δομή εξαρτώνται από το ρυθμό στερεοποίησης.



Σχήμα 1.24: Δενδρικές δομές στερεοποίησης σε ένα κράμα Ni-5CE (σε. %). Δενδρίτες νικελίου (τα φωτεινά σχήματα στο b και c) που περιβάλλονται από μία μήτρα ευτηκτικού νικελίου-δημητρίου. (α) 25 ×. (β) 75 ×. (γ) 250 ×. [8]

Τα περισσότερα μέταλλα συρρικνώνονται κατά τη στερεοποίηση. Ως εκ τούτου, το υγρό που παγιδεύεται μεταξύ των δενδρικών διακλαδώσεων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης είναι συχνά ανεπαρκές για να γεμίσει το χώρο μεταξύ των διακλαδώσεων, όταν η στερεοποίηση είναι πλήρης. Αυτή η αδυναμία να γεμίσει το υπόλοιπο χώρο οδηγεί σε κενά συρρίκνωσης, τα οποία μπορεί να παρατηρηθούν μικροσκοπικά. Τα κενά είναι γενικά πιο εύκολο να παρατηρηθούν σε as-polished δοκίμια από ό, τι σε δοκίμια που έχουν γυαλιστεί και υποστεί χημική προσβολή. Το Σχήμα 1.25 δείχνει ένα τυπικό παράδειγμα των κενών συρρίκνωσης.



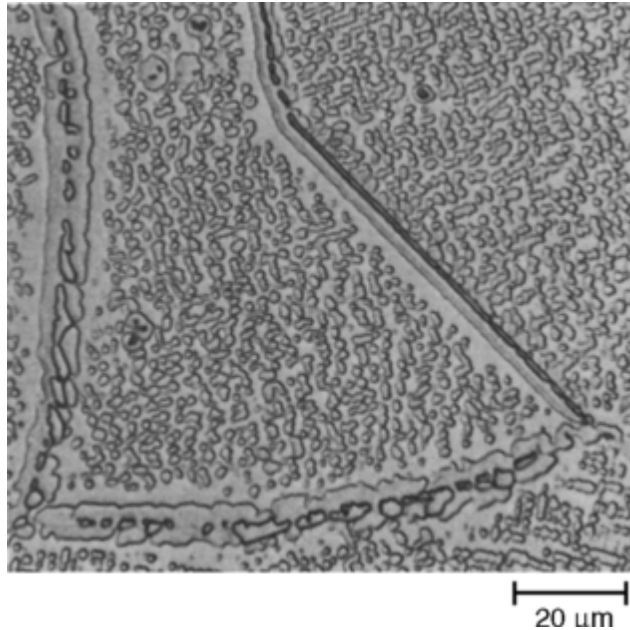
Σχήμα 1.25: Τυπικές ατέλειες που μπορούν να παρατηρηθούν με οπτικό μικροσκόπιο. (α) Συρρίκνωση του πορώδες σε μια ράβδο κράματος αλουμινίου 5052. Σημειώστε τη γωνιακότητα. 50 ×. (β) Χοντρός πρωτογενής κρύσταλλος CrAl₇ σε πλίνθωμα από κράμα αλουμινίου 7075. 100 ×. (γ) Έγκλεισμα σε μορφή γραμμής οξειδίου σε ένα έλασμα τοποποιημένο κράμα αλουμινίου 1100 φύλλο. 250 ×. [8]

Ασυνέχειες

Διάφορες ασυνέχειες υλικών όπως εγκλείσματα και νευρώσεις (Σχ. 1.25b και c) μπορούν επίσης να παρατηρηθούν μικροσκοπικά σε όπως-γυαλίζονται δοκίμια. Τέτοιες ατέλειες, όπως αυτές που φαίνονται στο σχήμα 1.25 μπορεί να αποτελέσουν τοποθεσίες έναρξης-αστοχίας σε μέταλλα και κράματα, συνεπώς, ο χαρακτηρισμός του μεγέθους τους, του σχήματος τους, και της κατανομής τους είναι αναγκαίος για να καθοριστούν οι ιδιότητες των υλικών και η αξιοπιστία της μηχανικής. Προγράμματα διασφάλισης της ποιότητας συχνά απαιτούν τον έλεγχο των ατελειών και να ρυθμίζουν τον τύπο τους, τον αριθμό, το μέγεθος και το σχήμα τους με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Για παράδειγμα, συστατικά που έχουν μια κατανομή σε γραμμικό σχήμα όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1.25 (γ) θα έχουν καλύτερη ολκιμότητα εάν τα δείγματα ή τα στοιχεία ελέγχθούν με τις μεγάλες πιέσεις παράλληλα με τη γραμμική κατανομή απ ό, τι αν δοκίμια ήταν προσανατολισμένα με τις μεγάλες πιέσεις κάθετα προς τον λώρο.

Οι δομές μετασχηματισμού συχνά αποτελούνται από δύο φάσεις. Σε τέτοιες δομές, η κύρια φάση αποκαλείται μήτρα, ή βασική δομή, και η δευτερεύουσα φάση ονομάζεται δεύτερη φάση. Το μέγεθος, το σχήμα και η κατανομή των σωματιδίων της δεύτερης φάσης είναι σημαντικά για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των μετάλλων και των κραμάτων. Ο χαρακτηρισμός της μορφολογίας της δεύτερης φάσης μπορεί μερικές φορές να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας την οπτική μεταλλογραφία. Παρόλα αυτά, η δεύτερη φάση είναι μερικές φορές τόσο μικρή ώστε η ανάλυση που απαιτείται για το χαρακτηρισμό της μορφολογίας της φάσης ξεπερνάει τις δυνατότητες του οπτικού μικροσκοπίου. Σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να χρειαστεί η SEM ή η TEM. Μέταλλα και κράματα με σκληρότητα λόγω γήρανσης ή καθίζησης πρέπει γενικά να χαρακτηρίζονται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική μικροσκοπία.

Μετασχηματισμοί φάσης που πραγματοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες συχνά πυρηνοποιούνται στα όρια των κόκκων. Οι δομές των ορίων των κόκκων μπορεί να είναι διακριτές ή συνεχείς. Τα συστατικά των ορίων των κόκκων που είναι συνεχή (Εικ. 26) παρέχουν εύκολα μονοπάτια θραύσης όταν η φάση των ορίων των κόκκων είναι λιγότερο όλκιμη από τη φάση μήτρας. Για το υλικό που φαίνεται στο σχήμα. 26, η αναμενόμενη αστοχία θα ήταν μια θραύση κατά μήκος των ορίων των κόκκων των καρβιδίων. Η ετερογενής καθίζηση στις περιοχές των ορίων των κόκκων συνήθως βασίζεται στο κλασικό μηχανισμό ιζηματώδους πυρηνοποίησης και ανάπτυξης, όπου ο αρχικός πυρήνας ξεκινά από ένα κρίσιμο μέγεθος για να επιτρέψει μείωση της διεπιφανειακής ενέργειας της επιφανείας μεταξύ της ιζηματώδης φάσης και των αρχικών φάσεων. Οι διαδικασίες μετασχηματισμού μπορεί επίσης να είναι συνεχείς.



Σχήμα 1.26: Συνεχές ίζημα των ορίων των κόκκων σε κράμα U-700 με βάση το νικέλιο ανθεκτικό στη θερμότητα. Χημική προσβολή με HCl, αιθανόλη και H₂O₂. 500 ×. [8]

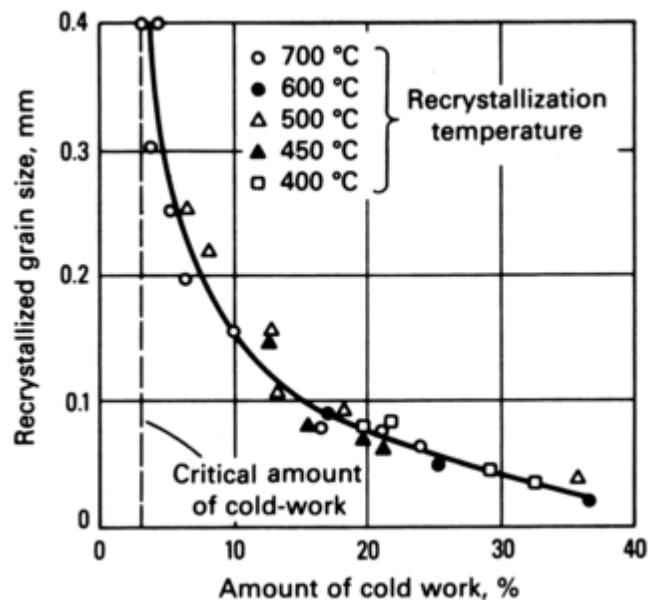
Δομές παραμόρφωσης

Οι μικροσκοπικές λεπτομέρειες των δομών παραμόρφωσης συνήθως δεν μπορούν να καθοριστούν πλήρως χρησιμοποιώντας την οπτική μεταλλογραφία. Η παραμόρφωση αλλάζει τον αριθμό και τη διάταξη των dislocations (ελαττώματα κρυστάλλων) στο μέταλλο σε ατομική κλίμακα. Αυτή η υποδομή dislocations χαρακτηρίζεται καλύτερα χρησιμοποιώντας τη TEM. Το οπτικό μικροσκόπιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συμπληρώσει τη TEM μέσω του χαρακτηρισμού του μεγέθους των κόκκων και την ανισοτροπία στο σχήμα των κόκκων και της κανανομής τους. Αλλαγές μικροδομής λόγω ανόπτησης μπορεί να μελετηθούν με τη TEM ή την οπτική μικροσκοπία. Οι πιο σημαντικές διαρθρωτικές αλλαγές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ανόπτησης είναι η ανάκτηση, η επανακρυστάλλωση, και η ανάπτυξη των κόκκων.

Ανάκτηση είναι η αναδιάταξη και η εξαφάνιση των ατελειών (κυρίως οπές και interstitials) εντός κάθε κόκκου ενός εν ψυχρώ πολυκρυσταλλικού στοιχείου. Επειδή η ανάκτηση ασχολείται κυρίως με ελαττώματα ενός σημείου, κάθε παρατήρηση της μικροδομής είναι δύσκολη, και η οπτική μικροσκοπία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω της περιορισμένης της ανάλυσης.

Επανακρυστάλλωση είναι ο σχηματισμός νέων μη παραμορφωμένων κόκκων εντός των προηγούμενων εν ψυχρώ (παραμορφωμένων) κόκκων. Τα αρχικά στάδια της

ανακρυστάλλωσης συμβαίνουν σε τέτοια κλίμακα που η TEM είναι απαραίτητη: Ωστόσο, η οπτική μικροσκοπία μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του μεγαλύτερου μέρους της επανακρυστάλλωσης. Το μέγεθος των κόκκων που ανακρυσταλλώθηκαν εξαρτάται από την ποσότητα της εν ψυχρώ κατεργασίας του δοκιμίου πριν από την ανόπτηση επανακρυστάλλωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της εν ψυχρώ εργασίας, τόσο πιο μικρό το ανακρυσταλλωμένο μέγεθος του κόκκου (Σχ. 1.27). Επειδή όρια των κόκκων είναι μια κρυσταλλική ατέλεια, η συνεχιζόμενη ανόπτηση θα προκαλέσει αυτή τη σειρά των κόκκων να είναι ασταθής, και η ανάπτυξη των κόκκων θα λάβει χώρα. Η ανάπτυξη των κόκκων σε ένα κρυσταλοποιημένο δοκίμιο μειώνει την επιφάνεια των ορίων των κόκκων σε αναλογία του όγκου του δοκιμίου επειδή το μέσο μέγεθος των κόκκων αυξάνει καθώς ανάπτυξη κόκκων λαμβάνει χώρα. Ο ρυθμός αύξησης των κόκκων εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο.

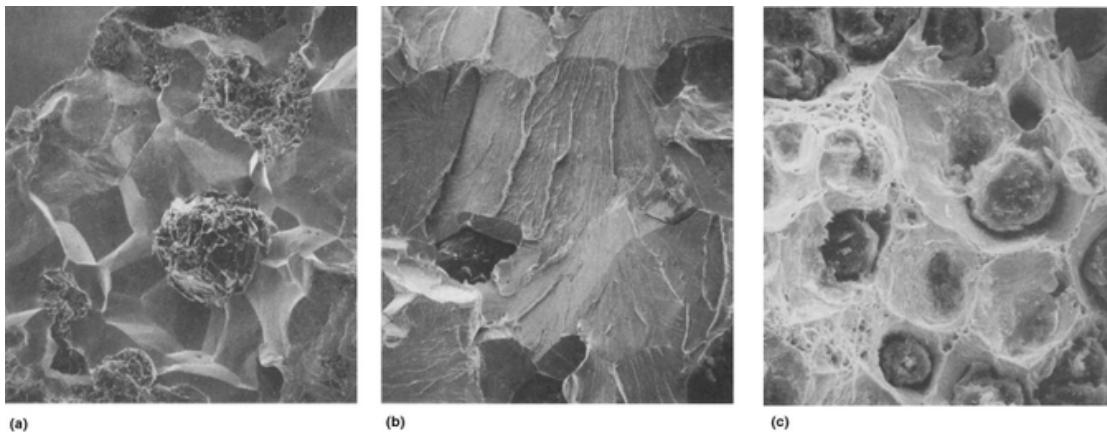


Σχήμα 1.27: The effect of prior cold work on recrystallized grain size

1.4.2 ΜΙΚΡΟΚΡΥΣΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ

Η μικροσκοπική εξέταση της επιφάνειας θραύσης επιτυγχάνεται καλύτερα με τη χρήση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM) και σε ορισμένες περιπτώσεις με την εξέταση των αποτυπώσεων με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (TEM). Οι εικόνες SEM στο Σχήμα 1.28 δείχνουν τα ιδιαίτερα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά των τριών βασικών τύπων της θραύσης υπερφόρτωσης: ψαθυρή θραύση μεταξύ των κόκκων (σχίσσιμο), όλκιμη θραύση

μεταξύ των κόκκων (συνένωση μικροκενών), και ψαθυρή θραύση από ενδοκοκκώδη διαχωρισμό. Το SEM παρέχει καλό βάθος εστίασης για την παρατήρηση τοπολογικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας θραύσης. Τα σύγχρονα εργαλεία SEM συνήθως έχουν πάνω τους και φασματοσκοπικές ακτίνες-x που επιτρέπουν τη στοιχειακή ανάλυση των συστατικών στην (ή κοντά) επιφάνεια του δοκιμίου. Αυτό μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο στην ανάλυση αστοχίας.



Σχήμα 1.28:Εικόνες από μικρογράφο σάρωσης ηλεκτρονίου από τους βασικούς τύπους θραύσης υπερφόρτωσης. (α) ενδοκοκκική θραύση σε στρώμα ιόντων-νιτριδωμένο όλκιμο χυτοσίδηρου (ASTM 80-55-06). (β) θραύση με σχίσμο μεταξύ των κόκκων σε όλκιμο σίδηρο (ASTM 80-55-06). (γ) Όλκιμη θραύση με ισομεγέθη λακκάκια από συνένωση μικροκενών γύρω από κόνδυλους γραφίτη σε ένα όλκιμο σίδηρο (ASTM 65-40-10). Το πλάτος της εικόνας είναι περίπου 0,2 χιλιοστά (0,008 ίντσες) με αρχικές μεγεθύνσεις 500 ×. Ευγενική προσφορά του Mohan Chaudhari, Columbus Υπηρεσίες Μεταλλουργών

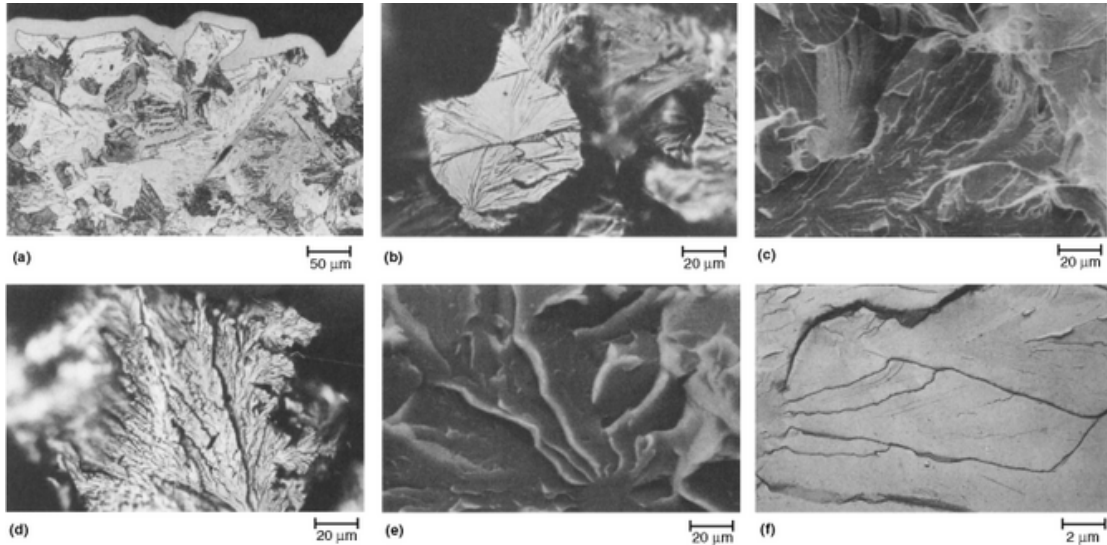
Ωστόσο, η έλλειψη πρόσβασης σε SEM ή TEM δεν πρέπει να θεωρείται ως ένα μεγάλο εμπόδιο για την ανάλυση αστοχίας, διότι το εν λόγω έργο έγινε με επιτυχία πριν από την ανάπτυξη αυτών των μέσων. Σε πολλές μελέτες, ο εξοπλισμός αυτός δεν είναι απαραίτητος, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, είναι πολύ σημαντικά εργαλεία. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ηλεκτρονική μικροσκοπία και η οπτική μικροσκοπία θα πρέπει να θεωρούνται συμπληρωματικά εργαλεία. Εξέταση μικροδομής μπορεί να διεξαχθεί με την SEM κατά το ίδιο εύρος μεγέθυνσης όπως με το οπτικό μικροσκόπιο αλλά η εξέταση με το τελευταίο είναι πιο αποτελεσματική. Μηχανισμοί αντίθεσης για την προβολή μικροδομών είναι διαφορετικοί για την LM και τη SEM. Πολλές μικροδομές, για παράδειγμα ο θερμικά κατεργασμένος μαρτενσίτης, επιδεικνύουν φτωχή αντίθεση στο SEM και αντιμετωπίζονται καλύτερα με οπτικό μικροσκόπιο.

Όταν η αντίθεση του ατομικού αριθμού ή η τοπογραφική αντίθεση είναι ισχυρή, η SEM παρέχει καλές εικόνες της δομής, ιδιαίτερα πάνω από 500 \times . Και πάλι, λόγω των περιορισμών και των πλεονεκτημάτων κάθε μέσου, είναι συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά εργαλεία. Όλες οι μελέτες των μικροδομών και των τομών πρέπει να αρχίζουν από το χαμηλότερο επίπεδο μεγέθυνσης, το γυμνό ανθρώπινο μάτι, και να αυξάνουν σταδιακά προς τα πάνω, με πρώτο το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο για τις τομές και μετά το οπτικό μικροσκόπιο για την πορεία της τομής και τις μελέτες μικροδομής πριν από τη χρήση του ηλεκτρονικού μεταλλογραφικού εξοπλισμού.

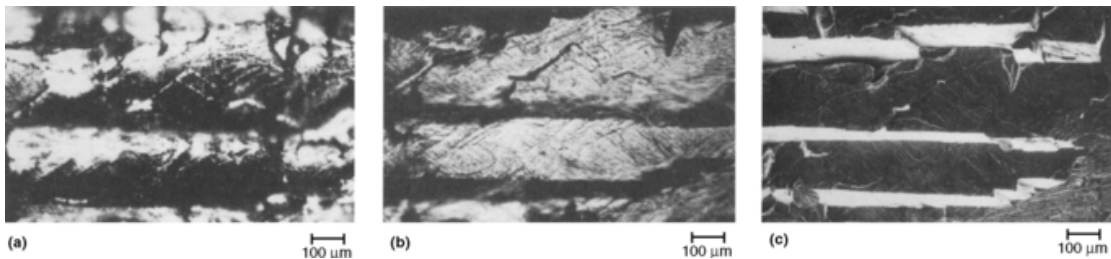
Η μικροκρυσταλλογραφία είναι ένα σχετικά νέο πεδίο που οι ρίζες της μπορούν να ανιχνευθούν στους οπτικές κρυσταλλογραφίες που δημοσιεύτηκαν από τον Zaprffe και τους συνεργάτες του στις αρχές της δεκαετίας του 1940, αν και μερικές μελέτες ιστορικής αξίας προηγήθηκαν των προσπαθειών τους. Το έργο του Zaprffe, ωστόσο, αφορούσε σχεδόν αποκλειστικά στην παρατήρηση των όψεων σχισμής σε μάλλον ψαθυρά, χονδρόκοκκα δοκίμια. Η τεχνική, ουσιαστικά μια ενδιαφέρουσα ακαδημαϊκή άσκηση, προκάλεσε το ενδιαφέρον για την εξέταση της τομής στο πλαίσιο της ανάλυσης αστοχίας. Ωστόσο, ο περιορισμός του βάθους πεδίου του οπτικού μικροσκοπίου έχει περιορίσει τη χρήση της για την εν λόγω εργασία. Εκτός από τις δημοσιευμένες οπτικές κρυσταλλογραφίες που έγιναν από τον Zaprffe, πολύ λίγες οπτικές κρυσταλλογραφίες μεταλλικών υλικών έχουν δημοσιευθεί από άλλους. Η μικροκρυσταλλογραφία κέρδισε έδαφος με την ανάπτυξη της μεθόδου αντιγράφων TEM και έγινε κοινός τόπος μετά την εμπορική εισαγωγή του SEM περίπου το 1965.

Μια επίπεδη, ψαθυρή θραύση μπορεί να εξεταστεί με το οπτικό μικροσκόπιο, προσανατολίζοντας τη τομή κάθετα προς τον οπτικό άξονα. Είναι καλύτερα να ξεκινήσετε με ένα μικροσκόπιο χαμηλής ισχύος - Προτιμώνται τύποι μεγάλης εργατικής απόστασης. Η εστίαση αποκαλύπτει τους περιορισμούς της μεθόδου, επειδή μόνο ένα μέρος της τομής είναι στο επίκεντρο σε οποιαδήποτε ρύθμιση. Έτσι, οι φωτογραφίες αποκαλύπτουν μόνο ένα τμήμα της τομής στην κάθε εστίαση, ανάλογα με την τραχύτητα και τον προσανατολισμό των όψεων της τομής. Το σχήμα 1.29 δείχνει ένα παράδειγμα μιας ψαθυρής θραύσης σε ένα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χάλυβα, που εξετάστηκε με αυτό τον τρόπο. Το σχήμα 1.29 δείχνει επίσης μια εικόνα του προφίλ της τομής από οπτικό μικροσκόπιο, μια εικόνα οπτικού μικροσκοπίου από ένα αντίγραφο της τομής, από SEM εικόνες της τομής και ένα αντίγραφο της τομής, καθώς και ένα αντίγραφο TEM της τομής. Παρά το γεγονός ότι ο Zaprffe χρησιμοποίησε φωτισμό φωτεινού πεδίου για το έργο αυτό, ο φωτισμός σκοτεινού πεδίου συχνά παράγει καλύτερα αποτελέσματα. Το Σχήμα 1.30 απεικονίζει την χρήση φωτισμού φωτεινού πεδίου και σκοτεινού πεδίου για την προβολή μιας ψαθυρής θραύσης Fe-Cr-Al

αλουμινίου, συν μια κρυσταλλογραφία SEM της ίδιας περιοχής. Ο φωτισμός σκοτεινού πεδίου είναι καλύτερος στο συλλέγει το φως που διαχέεται από τα χαρακτηριστικά της τομής-η αντανάκλαση μειώνεται, και η αντίθεση της εικόνας βελτιώνεται. Η εξέταση αντιγράφων της τομής με οπτικό μικροσκόπιο (Αναφ. 16, 17, 18) μπορεί να επεκτείνει τη χρήση της μεθόδου μόνο σε περιορισμένο βαθμό, επειδή το αντίγραφο καταρρέει σαγά σιγά, παράγοντας λιγότερο βάθος πεδίου. Επίσης, με ένα αντίγραφο, ο κίνδυνος να καταστραφεί το στόχος εξαλείφεται.

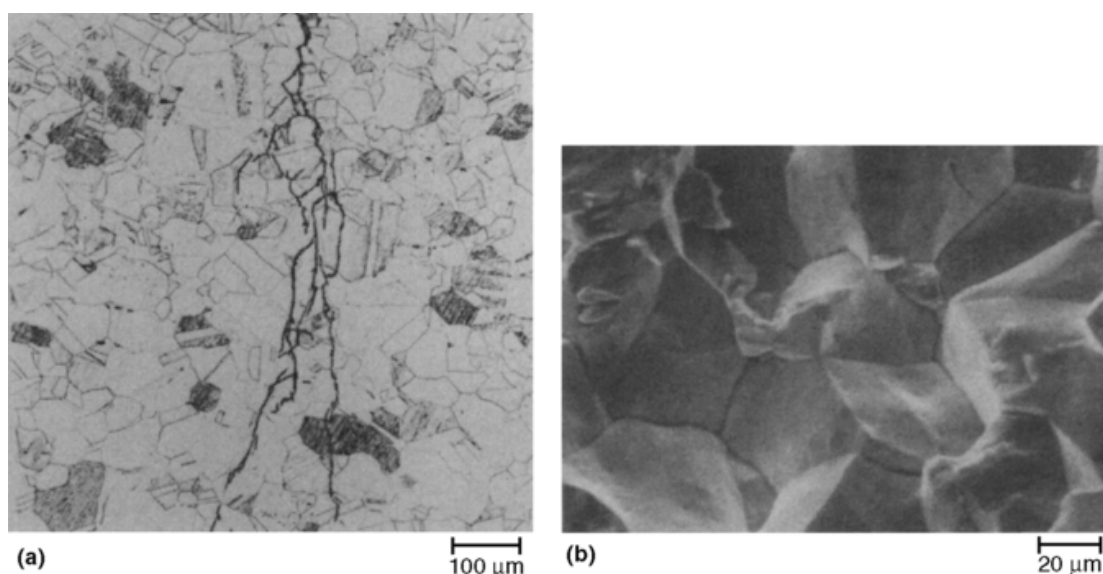


Σχήμα 1.29: Σχισμή τομής σε χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα που έχει υποστεί βαφή και θερμική κατεργασία, και που εξετάστηκε με τρεις άμεσες μεθόδους και τρεις μεθόδους αντιγραφής. (α) Οπτική μικροσκοπία εγκάρσιας διατομής (επινικελωμένη). Χημικά προσβεβλημένο με αντιδραστήριο Vilella. (β) LM κρυσταλλογραφία (άμεση). (γ) ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) κρυσταλλογραφία (άμεση). (δ) αντίγραφο LM. (ε) αντίγραφο SEM. (στ) αντίγραφο με TEM μικροσκόπιο. [13]



Σχήμα 1.30: Κρυσταλλογραφία οπτικού μικροσκοπίου που λήφθηκε με (α) φωτισμό φωτεινού πεδίου και (β) σκοτεινού πεδίου σε σύγκριση με (γ) μία εικόνα κρυσταλλογραφίας σάρωσης ηλεκτρονίων δευτεροβάθμια ηλεκτρονίων της ίδιας περιοχής. Το δείγμα είναι κράμα Fe-Al-Cr. [13]

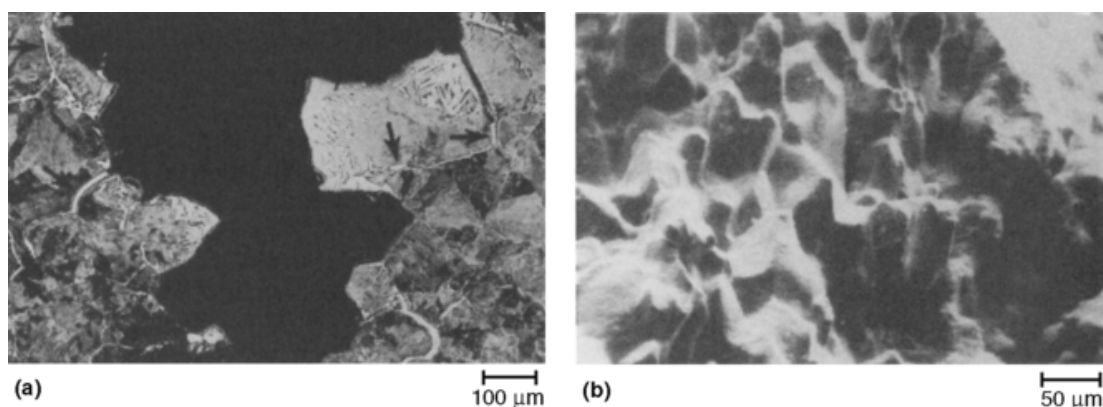
Σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τον τύπο της θραύσης και τη σχέση της μικροδομής στη διαδρομή της τομής μπορούν να ληφθούν με εξέταση LM του προφίλ ενός μερικώς θραυσμένων ή πλήρως θραυσμένων γυαλισμένων μεταλλογραφικών δοκιμίων. Τέτοιες εξετάσεις διεξάγονταν για πολλά χρόνια, πολύ πριν από την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μεταλλογραφικών τεχνικών και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται εως σήμερα. Αν η τομή έχει προχωρήσει σε πλήρη ρήξη, έτσι ώστε μόνο η μία πλευρά της τομής να μπορεί να εξεταστεί, ίσως είναι καλύτερο να βάλουμε τη θραύση σε πλάκα νικελίου έτσι ώστε να διατηρηθούν καλύτερα οι ακρές. Αυτό δεν απαιτείται αν η ρωγμή δεν έχει διαχωρίσει το στοιχείο σε δύο κομμάτια, ή εάν μια δευτερεύουσα ρωγμή πρόκειται να εξεταστεί. Η εξέταση της διαδρομής της ρωγμής χρησιμοποιώντας εγκάρσιες τομές είναι επίσης πολύ χρήσιμη για τη μελέτη των τομών που προκλήθηκαν λόγω περιβαλλοντικών προβλημάτων. Το σχήμα 1.31 δείχνει μια ρωγμή από διάβρωση υπό συνθήκες έντασης σε ένα μερικώς σπασμένο δοκίμιο AISI 304 ανοξείδωτου ατσάλιου ανοπτημένου σε διάλυμα που εξετάστηκε σε βρασμό (151 °C, ή 304 °F) σε χλωριούχο μαγνήσιο. Η διαδρομή της ρωγμής είναι κυρίως ενδοκοκκική, αλλά είναι επίσης παρούσα μια σημαντική τομή μεταξύ των κόκκων. Η κρυσταλλογραφία SEM του δοκιμίου καταδεικνύει σαφώς τη ενδοκοκκική φύση της ρωγμής.



Σχήμα 1.31: Οπτική μικρογραφία μιας εγκάρσιας τομής ενός (α) μερικώς σπασμένου δοκιμίου και (β) μία κρυσταλλογραφία σάρωσης ηλεκτρονίων ενός εντελώς σπασμένου δοκιμίου ενός AISI 304 από ανοξείδωτο χάλυβα ανοπτημένο σε διάλυμα μετά από ρωγμή από διάβρωση υπό συνθήκες έντασης δοκιμής σε βρασμό (151 °C ή 304 °F) χλωριούχο μαγνήσιο. [13]

Η εξέταση του προφίλ της τομής είναι επίσης πολύ χρήσιμη για τη μελέτη των αστοχιών που οφείλονται σε αύξηση της ευθραυστότητας υγρού μετάλλου (LME). Το Σχήμα 1.32

δείχνει τη μικροδομή δίπλα σε μια LME ρωγμή σε ένα ευτηκτοειδή χάλυβα όπου ο υγρός χαλκός έχει διεισδύσει στα όρια των κόκκων στους 1100 ° C (2012 ° F), ενώ το δείγμα ήταν ωστενιτικό και υπό εφαρμοζόμενο φορτίο εφελκυσμού. Η οπτική μικροσκοπική εξέταση αποκαλύπτει ένα ασυνεχές φιλμ του χαλκού στα προηγούμενα-ωστενιτικά όρια των κόκκων και μία ενδοκοκκική πορεία της τομής. Η μικροσκοπική εξέταση σάρωσης ηλεκτρονίων της τομής αποκαλύπτει επίσης την ενδοκοκκική φύση της διαδρομής της ρωγμής.



Σχήμα 1.32: Οπτική μικρογραφία ενός (α) μερικώς σπασμένου ευτηκτοειδή δοκιμίου χάλυβα embrittled με υγρό χαλκό στους 1100 °C (2012 °F) (τα βέλη δείχνουν τη διείσδυση του χαλκού στα όρια των κόκκων) και (β) κρυσταλλογραφία ηλεκτρονικής σάρωσης ενός τελείως σπασμένου δοκιμίου. [13]

Λεπτομέρειες της επιφάνειας μπορούν επίσης να μελετηθούν από LM χρησιμοποιώντας κωνικά τμήματα [27], [28], [29]. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την μελέτη των φαινομένων φθοράς, τις επικαλύψεις επιφανειών, ζημιές κόπωσης, και άλλες λεπτομέρειες της επιφάνειας. Στη μέθοδο αυτή, η επιφάνεια τοποθετείται με μια μικρή γωνία προς την επιφάνεια. Το γυάλισμα σε αυτό το επίπεδο προκαλεί μια μεγεθυμένη άποψη της δομής στην κατακόρυφη διεύθυνση. Ο βαθμός μεγέθυνσης ορίζεται από τη συντέμνουσα της γωνίας τομής- γωνία $5^\circ 43'$ παράγει μία δεκαπλάσια μεγέθυνση. Τέλος, σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην εφαρμογή των αρχών της ποσοτικής μεταλλογραφίας στην μελέτη των θραύσεων [25], [26], [30], [31], [32], [33], [34]. Μεγάλο μέρος του έργου αυτού έχει χρησιμοποιήσει μετρήσεις που έγιναν σε γυαλισμένα τμήματα και έχουν ληφθεί παράλληλα προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης ρωγμών ("κάθετα τμήματα"). Το έργο αυτό παρέχει νέες σημαντικές πληροφορίες για τις διεργασίες θραύσης και θα πρέπει να είναι χρήσιμο στην ανάλυση αστοχίας, αν και η εφαρμογή του μέχρι σήμερα έχει περιορισθεί κυρίως σε μελέτες ερευνών.

***Υποσημείωση:** με την ψηφιακή απεικόνιση τμήματα της επιφάνειας της τομής εστιάζονται και στη συνέχεια ενώνονται όλα μαζί για να σχηματίσουν μια μεγάλη εστιασμένη εικόνα.

1.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ

Η μεταλλογραφία περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους για να συγκρίνει και να ποσοτικοποιεί πρότυπα μικροδομής, χωρικές σχέσεις και σχήματα και να αντλεί αριθμητικά δεδομένα από μικρογραφήματα. Μερικά παραδείγματα της ανάλυσης εικόνας περιλαμβάνουν:

- Ποσοτικό προσδιορισμό του μεγέθους των κόκκων, του σχήματος τους, των ορίων της έκτασης τους ανά μονάδα όγκου, και ούτω καθεξής, σε μονοφασικά μέταλλα και κεραμικά.
- Ποσοτικό προσδιορισμό της δεύτερης φάσης κλασμάτων όγκου, μεγέθη, διεπιφανειακές περιοχές ανά μονάδα όγκου, αποστάσεις, και ούτω καθεξής, σε πολυφασικά μέταλλα και κεραμικά
- Ποσοτικό προσδιορισμό των κατανομών μεγέθους σωματιδίων στις σκόνες.

Ιστορικά, οι περισσότερες αξιολογήσεις μικροδομής ιδιαίτερα σε μελέτες ποιότητας ελέγχου και προδιαγραφών συμμόρφωσης έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας απλά διαγράμματα σύγκρισης για τα χαρακτηριστικά όπως μετρήσεις για το μέγεθος των κόκκων και αξιολογήσεις των εγκλεισμάτων. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, έχει γίνει αυξημένη χρήση χειροκίνητων και αυτόματων στερεολογικών σχέσεων για να περιγράψουν χαρακτηριστικά μικροδομής.

Η βαρετή φύση των χειροκίνητων μεθόδων μετρήσεων έχει κεντρίσει την ανάπτυξη των αυτοματοποιημένων διαδικασιών. Αν και τα πρότυπα μικροδομής, οι χωρικές σχέσεις, και τα σχήματα είναι σχετικά εύκολο να τα αναγνωρίσουμε σε μια εικόνα, αξιόπιστα αριθμητικά δεδομένα είναι πολύ πιο δύσκολο να ληφθούν με μη αυτόματο τρόπο. Ως εκ τούτου ο αυτοματισμός απευθύνεται στην ανάγκη της ανάλυσης μικροδομής για ακριβέστερα στοιχεία κατά τον έλεγχο ποιότητας και τις μελέτες δομής. Η πρώτη προσέγγιση ήταν απλώς να αναπτυχθούν συσκευές για τη διευκόλυνση της χειροκίνητης συλλογής δεδομένων. Αυτές οι μέθοδοι μειώνουν τη κόπωση του χρήστη που πλήττει την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων χρήσης.

Πιο πρόσφατα, διάφορες ημιαυτόματες και πλήρως αυτόματες συσκευές αναπτύχθηκαν που επιτρέπουν την ταχύτερη συλλογή δεδομένων, ανάλυση, και μορφοποίηση. Οι συνεχείς βελτιώσεις στην ταχύτητα και τη μνήμη των προσιτών υπολογιστών έχουν επίσης βοηθήσει σημαντικά την ανάπτυξη αυτών των εργαλείων. Η αρχική ανάπτυξη αυτών των συσκευών συγκεντρώνονταν σε συστήματα on hardware-centered systems, αλλά έκτοτε έχει εξελιχθεί σε software-centered systems χρησιμοποιώντας πιο γρήγορους, φθηνούς υπολογιστές με περισσότερη μνήμη. Έτσι, καλύτερης ποιότητας δεδομένα μπορούν να ληφθούν από την ανάλυση είτε μιας μεγαλύτερης περιοχής του δοκιμίου και / ή περισσότερα δοκίμια. Αυτό επιτρέπει την μεγαλύτερη στατιστική ακρίβεια και πιο ουσιαστικά αποτελέσματα από την ανάλυση εικόνας. Επιπλέον, οι αναλυτές εικόνας μπορούν να εκτελέσουν αρκετές μετρήσεις σε ένα πεδίο σε χιλιοστά του δευτερολέπτου, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη περιγραφή της μικροδομής. Τέλος, η αυτοματοποίηση μπορεί να εισαχθεί στο στάδιο κίνησης, την εστίαση, την ανάλυση των δεδομένων και τη μορφοποίηση. Αναλυτές εικόνας είναι διαθέσιμοι σε διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας και κόστους, αλλά και όλοι χρησιμοποιούν επεξεργαστή ηλεκτρονικών δεδομένων για την ανίχνευση της εικόνας και τη μέτρηση στερεολογικών και μη στερεολογικών παραμέτρων.

Ωστόσο, δεν προσφέρονται όλες οι δομές για ακριβή αυτόματη ανίχνευση. Η δομή πρέπει να παρουσιάζει επαρκή αντίθεση για να μπορέσει ο αναλυτής να διακρίνει τα διάφορα συστατικά της. Για δοκίμια χαμηλής αντίθεσης, ημιαυτόματοι αναλυτές μπορούν να παρέχουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα στη διάκριση χαρακτηριστικών εις βάρος όμως της ταχύτητας της μέτρησης. Κάποιες διαδικασίες προετοιμασίας του δοκιμίου που χρησιμοποιούνται για την ποιοτική αξιολόγηση ή την χειροκίνητη μέτρηση μπορεί να είναι επίσης ακατάλληλες για τον αναλυτή εικόνας. Επομένως η προετοιμασία του δοκιμίου πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Η ικανότητα να προετοιμαστεί το δοκίμιο κατάλληλα είναι συχνά ο πιο κρίσιμος και δύσκολος παράγοντας στην ανάλυση εικόνας.

Προκειμένου να πάρουμε όσο πιο πολλές πληροφορίες μπορούμε από τον αναλυτή εικόνας απαιτείται η γνώση της προετοιμασίας του δοκιμίου, της στερεοσκοπίας, του χειρισμού της μηχανής, της στατιστικής και του προγραμματισμού. Η ανάλυση εικόνας αποτελείται από την επιλογή και προετοιμασία του δοκιμίου, την επεξεργασία εικόνας, τη μέτρηση και ανάλυση των δεδομένων και την καταγραφή τους. Κάθε βήμα πρέπει να έχει ελεγχθεί σωστά για να αποκτηθούν ακριβή, αναπαραγώγιμα αποτελέσματα. Η επιλογή του δοκιμίου πρέπει να είναι συστηματική και καλά προγραμματισμένη για να εξασφαλιστεί ότι τα δείγματα που αναλύονται είναι αντιπροσωπευτικά. Ο προεπεξεργαστής εικόνας αφορά στον χειρισμό της διαπιστωθείσας εικόνας για να βελτιωθεί η ακρίβεια των μετρήσεων, για παράδειγμα, το διαχωρισμό παρακείμενων σωματιδίων πριν από τη μέτρηση, ή για να

διευκολυνθούν οι επιθυμητές διαστάσεις, όπως στην σύντηξη ευθυγραμμισμένων εγκλεισμάτων σε μορφή συνεχούς γραμμής για ένα μήκοςμέτρησης.

Λάθη ενδέχεται να προκύψουν στις μετρήσεις ανάλυσης εικόνας ανάλογα με το πόσο αντιπροσωπευτικό θα είναι το δείγμα, τη ποιότητα της προετοιμασίας του δοκιμίου, τη προκατάληψη του χειριστή καθώς και σφάλματα του ίδιου του οργάνου. Λάθη μπορούν επίσης να προκύψουν όταν οι υποθέσεις που γίνονται και πάνω στις οποίες βασίζονται οι στερεοσκοπικές φόρμουλες είναι άκυρες. Τυπικό παράδειγμα ενός τέτοιου προβλήματος είναι η μαθηματική διαδικασία για τον προσδιορισμό του αριθμού των κόκκων ανά μονάδα όγκου, NV, που βασίζεται σε επίπεδες μετρήσεις μεγέθους κόκκων και υποθέσεις για το σχήμα τους. Όσο πιο πολύ οι κόκκοι διαφέρουν από το σχήμα της υπόθεσης τόσο πιο μεγάλο θα είναι το σφάλμα στην εκτίμηση NV.

Όταν μια σχετικά μικρή γυαλισμένη έκταση ενός ή περισσότερων δοκιμίων χρησιμοποιείται για να καθορίσει κάποια ποσότητα για μια σχετικά μεγάλη μάζα του υλικού, τα λάθη μπορεί να προκύψουν εάν η δειγματοληψία είναι ανεπαρκής ή δεν αντιπροσωπεύει τη μάζα. Αυτό το πρόβλημα είναι συνηθισμένο στην ανάλυση εγκλεισμάτων σε θερμικά επεξεργασμένο χάλυβα. Επειδή η ποσότητα των εγκλεισμάτων είναι αρκετά ή πολύ χαμηλή, και η κατανομή των εγκλεισμάτων δεν είναι ομοιογενής, αυτές οι μετρήσεις έχουν πάντα ένα βαθμό αβεβαιότητας. Αυτό το σφάλμα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση ενός συστηματικού σχεδίου δειγματοληψίας και αυξάνοντας τον αριθμό και την περιοχή των μετρούμενων δειγμάτων. Στην πράξη, ο συμβιβασμός είναι απαραίτητος μεταξύ του διαθέσιμου χρόνου για τέτοιες μετρήσεις και της επιθυμητής ακρίβειας.

Επίδραση της μεγέθυνσης

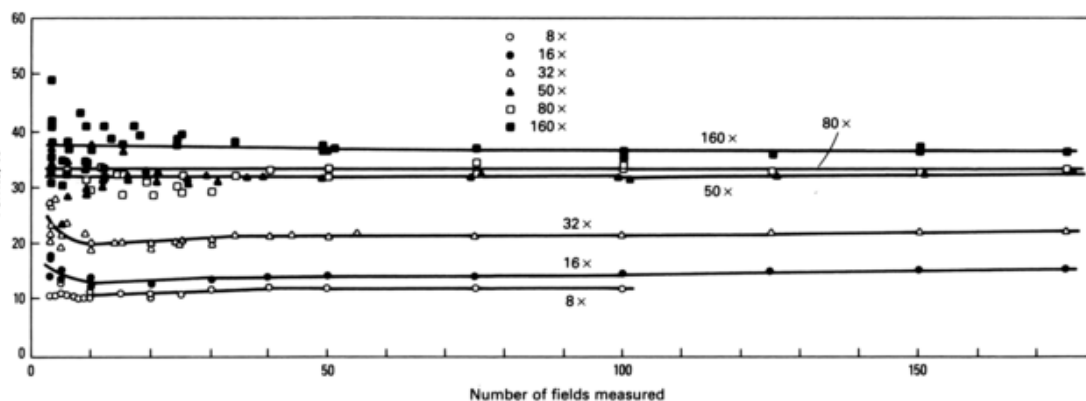
Η επιλεγμένη μεγέθυνση επηρεάζει την τιμή μέτρησης και τα στατιστικά στοιχεία της μέτρησης. Πολλές περιπτώσεις έχουν καταγραφεί στις οποίες οι μετρούμενες τιμές έχουν αλλάξει σημαντικά καθώς η μεγέθυνση άλλαξε.

Η επιλογή της μεγέθυνσης είναι ουσιαστικά ένας συμβιβασμός. Μικρά χαρακτηριστικά απαιτούν μια σχετικά υψηλή μεγέθυνση για ακριβείς μετρήσεις, ιδιαίτερα για το μέγεθος, το σχήμα, ή τις μετρήσεις περιμέτρου. Ωστόσο, η περιοχή πεδίου μειώνεται με την αύξηση της μεγέθυνσης. Η αύξηση της μεγέθυνσης βελτιώνει την ανάλυση, αλλά η περιοχή που μετράται, ιδίως εάν ο αριθμός των πεδίων είναι περιορισμένος, μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει ένα τμήμα εγκλεισμάτων χαμηλού όγκου που δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα, μια σημαντική περιοχή θα πρέπει να εξετάζεται για να ληφθεί ένα

σωστή εκτίμηση του λόγου του όγκου. Για ένα τέτοιο δείγμα, ή διακύμανση του όγκου αυξάνει από πεδίο σε πεδίο καθώς αυξάνει η μεγέθυνση και οδηγεί σε μια μεγαλύτερη τυπική απόκλιση. Μια μέθοδος για μια σωστή εκτίμηση σε μια τέτοια περίπτωση είναι να εξεταστεί το εύρος της μέτρησης του κλάσματος όγκου ως συνάρτηση του αριθμού των πεδίων για την εκάστοτε μεγέθυνση.

Η επίδραση της μεγέθυνσης έχει παρατηρηθεί σε πολλές μελέτες που περιλαμβάνουν διάφορα υλικά, μετρήσεις, και συσκευές μέτρησης. Το πρόβλημα δεν είναι απλά από κακή τεχνική. Δύο βασικοί τύποι δεδομένων επηρεασμένων από τη μεγέθυνση μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία. Το πρώτο αφορά στη καταμέτρηση τύπου δεδομένων στην οποία ο αριθμός αυξάνεται γρήγορα με τις αρχικές αυξήσεις της μεγέθυνσης, και μετά σταθεροποιείται στις υψηλές μεγεθύνσεις. Η δεύτερη αφορά στις μετρήσεις απόστασης στις οποίες υπάρχει μια αρχική ταχεία πτώση με την αύξηση της μεγέθυνσης, που ακολουθείται από μια σταθεροποίηση με περαιτέρω αυξήσεις στη μεγέθυνση. Και οι δύο καταστάσεις προκύπτουν από την ανάγκη για περαιτέρω μεγέθυνση.

Ένα κάπως διαφορετικό πρόβλημα της μεγέθυνσης μπορεί επίσης να προκύψει κατά την εκτέλεση πλήρως αυτοματοποιημένων μετρήσεων. Για να φανεί αυτό το πρόβλημα, ένας χάλυβας θερμής έλασης με μέτρια περιεκτικότητα σε άνθρακα που περιέχει φερρίτη και περλίτη αναλύθηκε για το ποσοστό του όγκου του φερρίτη χρησιμοποιώντας 8, 16, 32, 50, 80, και 160 × μεγεθύνσεις. Το δοκίμιο χημικά χρησιμοποιώντας picral. Σε χαμηλές μεγεθύνσεις, το κλάσμα όγκου του προτεκτοιδή φερρίτη μπορούσε να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, καθώς η μεγέθυνση αυξανόταν, η δομή του περλίτη έγινε αναλύσιμη, και ο φερρίτης που ήταν μέσα στο περλίτη ανιχνεύθηκε επίσης. Έτσι, με την αύξηση της μεγέθυνσης και της ανάλυσης, το κλάσμα όγκου του φερρίτη αυξήθηκε. Το Σχήμα 1.33 δείχνει τα αποτελέσματα της μέτρησης ως συνάρτηση της μεγέθυνσης και του αριθμού των πεδίων που μετρώνται. Ο καλύτερος προσδιορισμός του κλάσματος όγκου του προτεκτοιδή φερρίτη ελήφθη με τη μεγέθυνση στα 16 ×.



Σχήμα 1.33: κλάσμα όγκου του φερίτη ως συνάρτηση της αριθμού των πεδίων που μετρώνται και της μεγέθυνσης. Σε υψηλές μεγεθύνσεις, ο ισοαξονικός φερριτής μέσα στο περλίτη εντοπίστηκε. [37]

Από στατιστική άποψη, οι χαμηλότερες μεγεθύνσεις επιτρέπουν τη μέτρηση μεγάλων περιοχών, μειώνοντας την επιρροή της ετερογένειας του δοκομίου. Καθώς αυξάνεται η μεγέθυνση, οι παραλλαγές μέτρησης που εμφανίζονται από πεδίο σε πεδίο είναι μεγαλύτερες. Η επιλογή της μεγέθυνσης επηρεάζει τον αριθμό των πεδίων που πρέπει να μετρηθεί. Καθώς η μεγέθυνση αυξάνει, είναι περισσότερα τα πεδία που απαιτούνται για να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια. Το αυτόματο στάδιο κίνησης και η αυτόματη εστίαση διευκολύνουν την αύξηση του αριθμού των πεδίων. Το αυτόματο στάδιο κίνησης διασφαλίζει την επιλογή των πεδίων χωρίς να εισάγει τις προσωπικές προκαταλήψεις του χειριστή. Η αυτόματη εστίαση δεν θα πρέπει να θεωρείται δεδομένη. Σε υψηλότερες μεγεθύνσεις, η πιθανότητα για λανθασμένη εστίαση αυξάνει. Για μετρήσεις κλάσματος όγκου, καθώς το κλάσμα όγκου μειώνεται, περισσότερα πεδία πρέπει να μετρηθούν για να ληφθεί η επιθυμητή ακρίβεια. Αυτό το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα έντονο κατά τη μέτρηση κλασμάτων όγκου μικρότερων από 0,01 (1%).

Ένα σοβαρό πρόβλημα υπάρχει όταν το χαρακτηριστικό που θέλουμε να μετρήσουμε παρουσιάζει ένα μάλλον ευρύ φάσμα μεγεθών ή μια δικόρυφη κατανομή μεγέθους. Τα μεγαλύτερα σωματίδια μετρώνται καλύτερα σε σχετικά μικρές μεγεθύνσεις, άλλα τα μικρότερα σωματίδια χρειάζονται μεγαλύτερες μεγεθύνσεις. Σε μια μεγάλη μεγέθυνση πρέπει να χρησιμοποιείται η διαδικασία προφύλαξης πλαισίου αλλιώς όποιο μεγάλο χαρακτηριστικό δεν είναι στη μετρήσιμη περιοχή θα περικοπεί. Δύο μεγεθύνσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για τέτοιες μετρήσεις και οι αναλύσεις τους έχουν συνδυαστεί: Ωστόσο, αυτή είναι μια δύσκολη διαδικασία.

Η προετοιμασία των δοκιμών επηρεάζει επίσης σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων. Τα δοκίμια πρέπει να είναι γυαλισμένα με το ελάχιστο ανάγλυφο, τα επιθυμητά συστατικά πρέπει να διατηρηθούν, και τα χειροποίητα αντικείμενα στίλβωσης πρέπει να ελέγχονται. Επειδή ο όγκος των δοκιμών μπορεί να είναι υψηλός, αυτόματος εξοπλισμός στίλβωσης είναι γενικά απαραίτητος για να παρέχει την απαιτούμενη ποιότητα. Τεχνικές χάραξης που χρησιμοποιούνται για την ποιοτική αξιολόγηση της δομής και τις χειροκίνητες μετρήσεις είναι συχνά ανεπαρκείς για την ανάλυση εικόνας. Αντ' αυτού, η επιλεκτική χάραξη ή οι τεχνικές βαφής συνήθως θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Η χρωστική χαρακτηριστική είναι εξαιρετικά χρήσιμη, λόγω της υψηλής εκλεκτικότητας και της απουσίας σχεδόν etch relief.

Ηλεκτρολυτικές τεχνικές χημικής προσβολής είναι επίσης πολύτιμες. Η βέλτιστη διαδικασία είτε σκουραίνει τη φάση του ενδιαφέροντος ή όλες τις άλλες φάσεις, διακρίνοντας τα χαρακτηριστικά σε αποχρώσεις του γκρι. Σε πολλές, μελέτες η κατάλληλη επιλογή του δοκιμίου και η προσεκτική λείανση και χημική προσβολή είναι οι πιο κρίσιμοι παράγοντες για την επίτευξη ευνοϊκών αποτελεσμάτων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις μετρήσεις μεγέθους των κόκκων, στις οποίες όλα τα όρια των κόκκων πρέπει να αποκαλυφθούν με σαφήνεια.

Γκρι μετασχηματισμός εικόνας

Πολλά πειράματα απέδειξαν ότι η ρύθμιση του ανιχνευτή για τις διακρίσεις χαρακτηριστικών είναι μια σημαντική πηγή σφάλματος οργάνου. Προβλήματα του μηχανήματος μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Θόρυβος ή τυχαίες διακυμάνσεις του ρεύματος ή της τάσης μπορεί επίσης να εισαγάγουν σφάλματα. Προβλήματα θορύβου γίνονται σημαντικά κατά τη μέτρηση χαρακτηριστικών με χαμηλή αντίθεση.

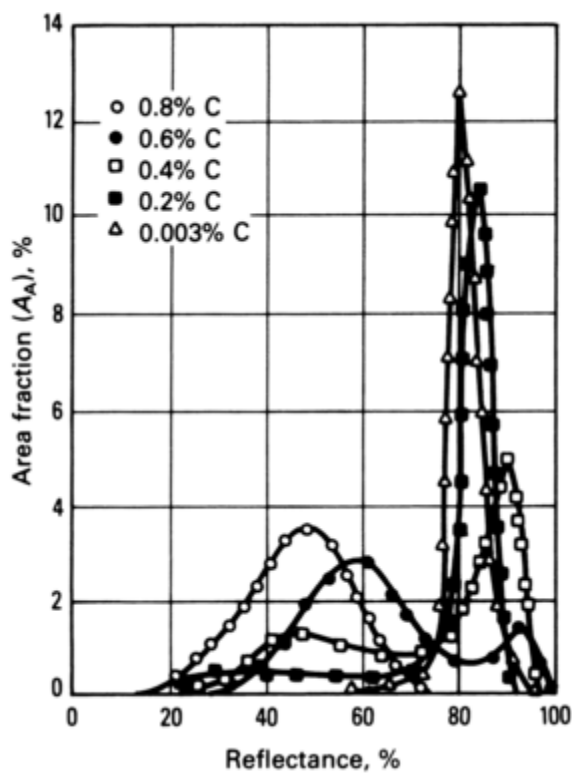
Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, η ποιότητα και η αρτιότητα των δοκιμών που πρόκειται να αξιολογηθούν είναι ίσως οι πιο κρίσιμοι παράγοντες για την ανάλυση της εικόνας. Κανένα σύστημα δεν μπορεί να αντισταθμίσει δοκίμια ανεπαρκούς προετοιμασίας. Ενώ τα τρέχοντα συστήματα μπορούν να εκτελέσουν γκρι μετασχηματισμούς εικόνας σε πολύ γρήγορους ρυθμούς σε σχέση με τα συστήματα που κατασκευάζονταν το 1970 και το 1980, γκρι επεξεργασία εικόνας θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως έσχατη λύση για τα μεταλλογραφικά δοκίμια. Διαφορετικές χημικές χαράξεις και διαφορετικά φίλτρα (εκτός από το συνήθη πράσινο φίλτρο που χρησιμοποιείται στη μεταλλογραφία) θα πρέπει να αξιολογούνται πριν από τη χρήση γκρι μετασχηματισμού εικόνας. Για να επιτευχθούν σημαντικά αποτελέσματα, πρέπει να χρησιμοποιούνται οι καλύτερες δυνατές διαδικασίες για

τη στίλβωση και τη χημική χάραξη των δοκιμίων. Παράγοντες όπως εξαγωγή εγκλεισμάτων, ουρές κομήτη, φτωχή ή μεταβλητή αντίθεση που προκαλείται από ακατάλληλη χημική προσβολή δεν μπορούν να εξαλειφθούν από το σύστημα ανάλυσης εικόνας. Δεν υπάρχει υποκατάστατο για τη σωστή προετοιμασία του μεταλλογραφικού δοκιμίου.

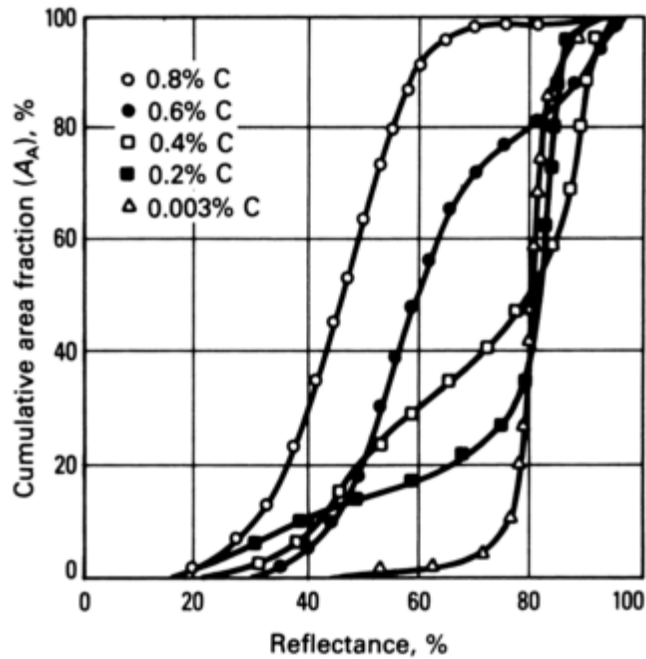
Μία από τις πιο κοινές μεταβλητές του hardware που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος είναι το σύστημα φωτισμού του οπτικού μικροσκοπίου. Η σωστή ευθυγράμμιση της λυχνίας του μικροσκοπίου και η σωστή ρύθμιση της είναι υψίστης σημασίας για την βέλτιστη απόδοση του συστήματος ανάλυσης εικόνας. Η ευθυγράμμιση, η ανάλυση και η αντίδραση της φωτογραφικής μηχανής CCD που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της εικόνας σε ένα ηλεκτρικό σήμα μπορεί να έχει μια μεγάλη επίδραση στην απόδοση. Μετά την σωστή ευθυγράμμιση του μικροσκοπίου, κάποιες μικρές παραλλαγές στη κλίμακα του γκριζου μιας λευκής εικόνας θα μπορούσαν να παρατηρηθούν. Επειδή ούτε η κάμερα CCD, ούτε οι φακοί του μικροσκοπίου είναι τέλειοι, κάποιες μικρές παραλλαγές στην γκριζα εικόνα μπορούν να συμβούν. Ο διορθωτής σκίασης παρατηρεί κάθε pixel σε ένα λευκό οπτικό πεδίο και αλλάζει το επίπεδο του γκριζου για να παραχθεί ένα ομοιόμορφο λευκό φόντο. Αυτός ο συντελεστής διόρθωσης εφαρμόζεται στη συνέχεια σε κάθε εικόνα για να διορθώσει τυχόν μικρά προβλήματα στο σύστημα. Εάν ένας μεγάλος βαθμός διόρθωσης απαιτείται αυτό μπορεί να σημαίνει ότι ή το μικροσκόπιο είναι πολύ λάθος ευθυγραμμισμένο ή ότι η κάμερα CCD έχει επιδεινωθεί από τη χρήση.

Μόλις αυτά τα προβλήματα λυθούν, η αμέσως επόμενη μεταβλητή που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι πώς να επιλεγεί το επίπεδο του γκρι στα αντικείμενα που πρέπει να χαρακτηριστούν. Για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια ανίχνευσης, τα χαρακτηριστικά του δείγματος που μας ενδιαφέρει πρέπει να έχουν όσο το δυνατό πιο στενό φάσμα αντίθεσης γίνεται (γκρι-επίπεδο). Η πηγή φωτός του μικροσκοπίου πρέπει στη συνέχεια να ευθυγραμμίζεται για ομοιόμορφο φωτισμό. Οι περισσότεροι αναλυτές εικόνας παρέχουν διορθώσεις σκίασης για να εξομαλύνουν τις διακυμάνσεις σε ολόκληρη την οθόνη. Το φάσμα της γκρι κλίμακας της εικόνας που κυμαίνεται από το πιο σκοτεινό μαύρο στο πιο λευκό χαρακτηριστικό συνήθως χωρίζεται σε 256 βήματα. Ένα παράδειγμα της ανίχνευσης χαρακτηριστικών σε γκρι κλίμακα, πέντε κράματα άνθρακα σιδήρου με περιεκτικότητα σε άνθρακα περίπου 0,003, 0,2, 0,4, 0,6, και 0,8% παρασκευάστηκαν μεταλλογραφικά και χαράχθηκαν με picral. Οι μικροδομές τους αποτελούνταν από διαφορετικές ποσότητες φερίτη και περλίτη. Τα δοκίμια σαρώθηκαν ξεκινώντας από μαύρο προς το λευκό με προσαυξήσεις του 1%.

Το σχήμα 1.34 δείχνει το ποσοστό της περιοχής οριζόμενου πεδίου σε κάθε τμήμα 1% στην κλίμακα του γκρι για αυτά τα κράματα. Το 0,003% κράμα C, που αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από φερίτη, παρουσιάζει την υψηλότερη κορυφή φερίτη, με τη μέγιστη ανίχνευση στα περίπου 81% στη συσκευή. Καθώς η περιεκτικότητα σε άνθρακα αυξήθηκε σε 0,6%, το μέγεθος της κορυφής του φερίτη μειώθηκε, και η μέγιστη θέση αυξήθηκε ελαφρά. Για το 0,8% κράμα C (όλο περλίτης), δεν υπήρχε ανιχνεύσιμη εικόνα για τιμές πάνω από 76%. Αυτό υποδηλώνει ότι ο περλίτης σαν συστατικό ανιχνεύεται γενικά μεταξύ των τιμών 16 και 76% περίπου, και ο φερίτης σαν συστατικό εντοπίζεται περίπου μεταξύ 76 και 91 έως 99%, ανάλογα με το κράμα. Το Σχήμα 1.35 δείχνει τα ίδια δεδομένα να απεικονίζονται ως αθροιστικό ποσοστό της περιοχής.

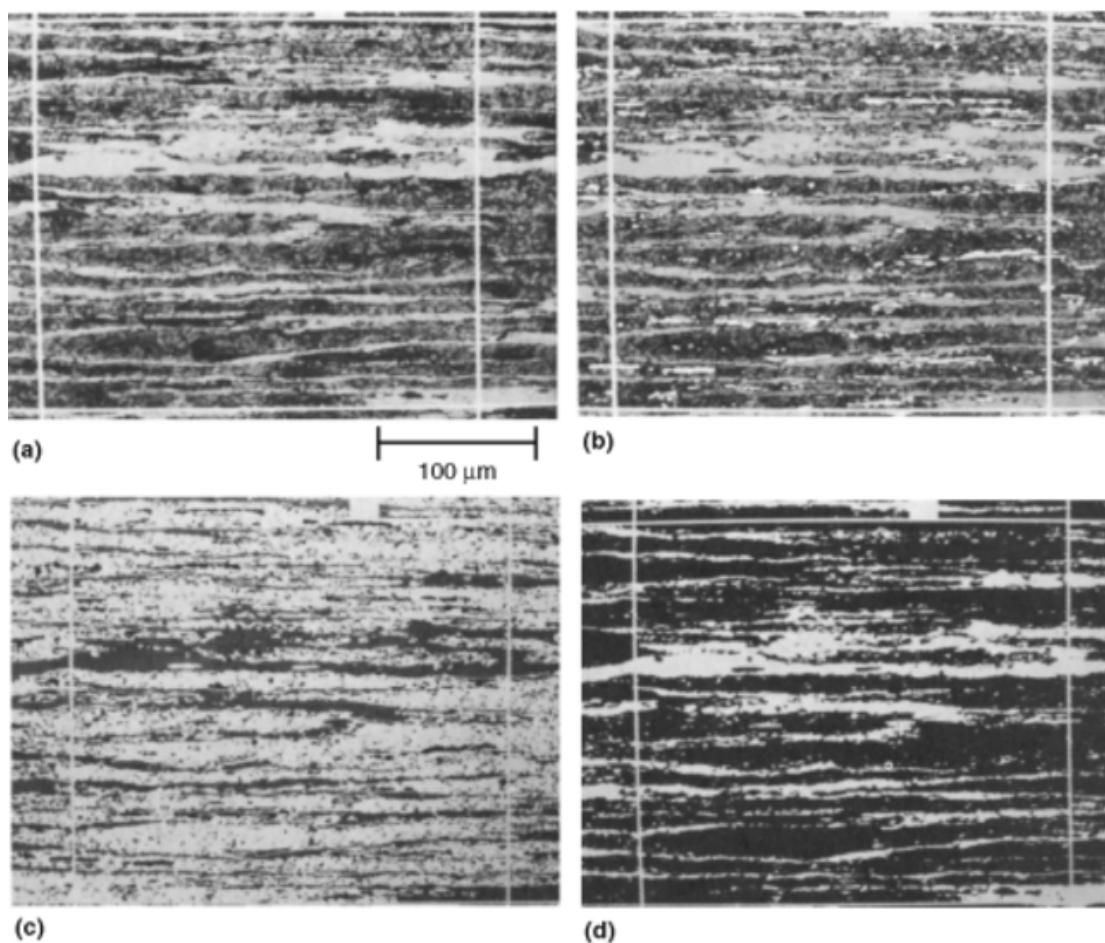


Σχήμα 1.34: Μέρος της ανιχνευμένης περιοχής με 1% προσαυξήσεις από μαύρο σε άσπρο για πέντε κράματα σιδήρου-άνθρακα. Οι μικροδομές τους αποτελούνταν από ποικίλες ποσότητες φερίτη και περλίτη, που κυμαίνονταν από 0,003% C (σχεδόν όλο φερίτης) στο κράμα C 0,8% (όλο περλίτης). [37]



Σχήμα 1.35: Μέρος αθροιστικής ανιχνευμένης περιοχής κλάσματος με προσαιζηήσεις του 1% από μαύρο σε άσπρο για πέντε κράματα σιδήρου-άνθρακα στο σχήμα 1.34. [37]

Ρυθμίζοντας τη συσκευή να ανιχνεύει μόνο κλίμακες του γκρι σε συγκεκριμένες περιοχές επιτρέπει την επιλεκτική ανίχνευση των συστατικών. Για παράδειγμα, το σχήμα 1.36 δείχνει τη μικροδομή ανοξειδωτού χάλυβα τύπου AISI 416 προσβλήθηκε χημικά χρησιμοποιώντας το αντιδραστήριο Vilella. Αυτό είναι ένα μίγμα επαναθειωμένου βαθμού που έχει υποστεί θερμική κατεργασία για να σχηματίσει σκληρυμένο μαρτενσίτη αλλά περιέχει επίσης νευρώσεις δ-φερίτη. Το Σχήμα 1.36(α) δείχνει την ζωντανή εικόνα του μικροσκοπίου πριν από την ανίχνευση φάσης. Στο Σχήμα 1.36(β), το όριο ανίχνευσης έχει οριστεί να ανιχνεύει μόνο τα χλωμά γκρι σουλφίδια που εμφανίζονται λευκά στην οθόνη. Η ρύθμιση της ανίχνευσης μπορεί να βοηθηθεί από την εναλλαγή μεταξύ της ζωντανής εικόνας και της ανιχνευμένης εικόνας (flicker mode), ενώ παρατηρείται η συσχέτιση μεγέθους μεταξύ αυτών των δύο εικόνων. Εάν το εύρος της γκρι κλίμακας δυο συστατικών συμπίπτουν, λευκά σημάδια θα είναι ορατά στην ανεπιθύμητη φάση καθώς οι ρυθμίσεις του ορίου ανίχνευσης αλλάζουν. Εάν ο βαθμός αλληλεπικάλυψης είναι υπερβολικός, μία εναλλακτική προετοιμασία απαιτείται. Σε όλες σχεδόν τις μελέτες εγκλεισμάτων, το δοκίμιο εξετάζεται χωρίς χημική προσβολή επειδή με αυτόν τον τρόπο η ανίχνευση των εγκλεισμάτων είναι πιο αξιόπιστη. Το Σχήμα 1.36(γ) δείχνει την ανίχνευση του μαρτενσίτη: Το Σχήμα 1.36(δ) την ανίχνευση του δ-φερίτη. Η βέλτιστη διαδικασία για την ανίχνευση του δ-φερίτη είναι να χαραχθεί το δοκίμιο ηλεκτρολυτικά χρησιμοποιώντας 20% υδατικό NaOH, το οποίο χρωματίζει μόνο το δ-φερίτη.

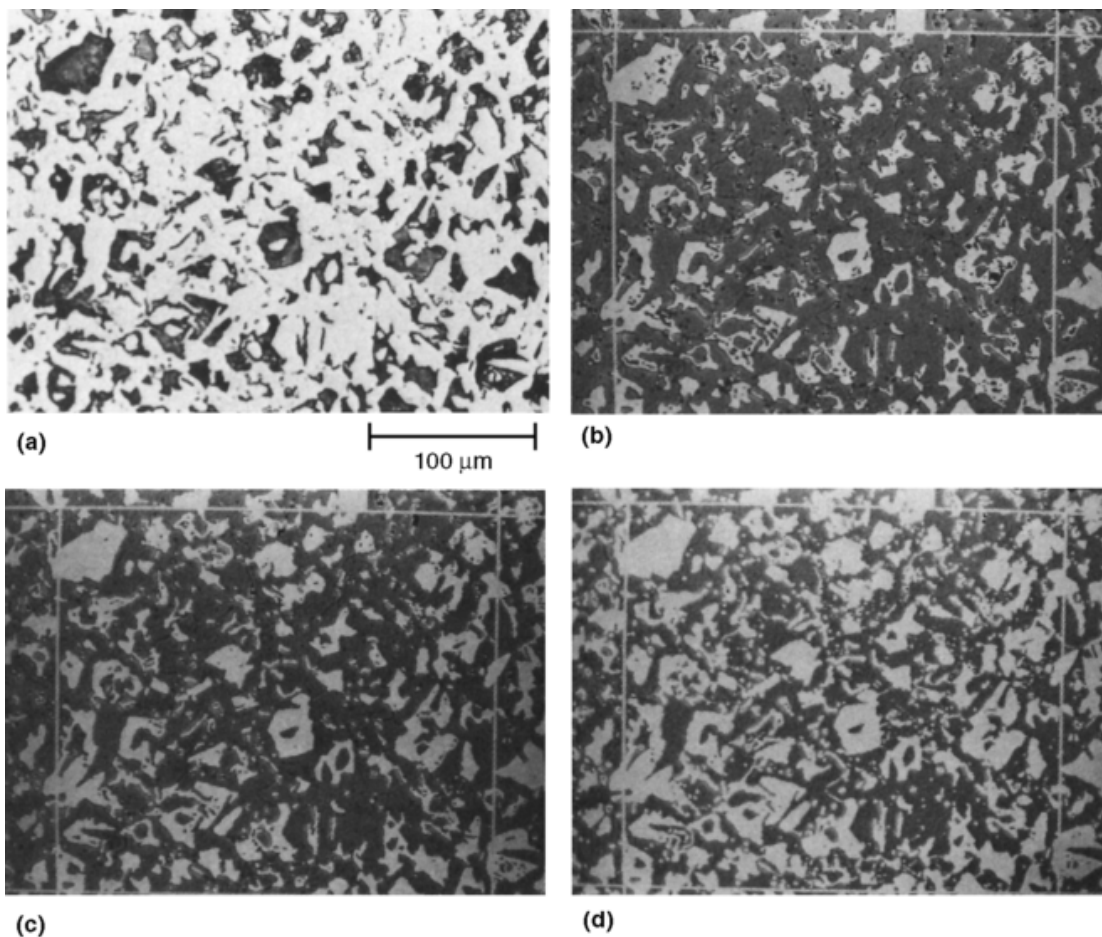


Σχήμα 1.36: Παραδείγματα της προτιμώμενης ανίχνευσης σε AISI 416 δοκίμια από ανοξείδωτο χάλυβα. (α) Ζωντανή εικόνα. (β) Προτιμώμενη ανίχνευση των ενώσεων μαγγανίου (λευκό). (γ) Προτιμώμενη ανίχνευση θερμικά κατεργασμένου μαρτενσίτη (λευκό). (δ) Προτιμώμενη ανίχνευση του δ-φερίτη (λευκό). Τα δοκίμια χαραχτήκαν χρησιμοποιώντας το αντιδραστήριο Vilella του. 175 ×. [37]

Προσπαθώντας να ανιχνευτούν και τα τρία συστατικά με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να είναι και οι τρεις μετρήσεις κλάσματος όγκου στο 100% σε κάθε πεδίο μέτρησης. Αυτό το παράδειγμα απεικονίζει τη δυνατότητα διαχωρισμού μιας σύνθετης εικόνας με το thresholding. Η προτιμώμενη διαδικασία θα είναι να μετρηθούν τα σουφλίδια σε μια as-polished κατάσταση, να χαραχτούν ηλεκτρολυτικά και να μετρηθεί η ποσότητα του δ-φερίτη, και στη συνέχεια να καθοριστεί το ποσό του μαρτενσίτη (κύριο συστατικό) από τη διαφορά.

Το Σχήμα 1.37 απεικονίζει το βαθμό του σφάλματος που μπορεί να προκύψει όταν thresholding είναι εσφαλμένο. Το Σχήμα 1.37(α) δείχνει τη ζωντανή εικόνα ενός δοκιμίου φερίτη-περλίτη που χαραχθηκε με picral. Το Picral είναι πολύ πιο ακριβές για τέτοιες μετρήσεις επειδή δεν διαβρώνει τα όρια των κόκκων του φερίτη, τα οποία θα πρέπει να ανιχνεύονται με το περλίτη, και παράγει ένα πιο ομοιόμορφο σκούρο χρώμα του περλίτη σε

σχέση με το NITAL. Το σχήμα 1.37(β) εμφανίζει μια εικόνα μη ανιχνευμένη που περιέχει 28,1% περλίτη. Μερικές από τις κηλίδες περλίτη περιέχουν απαρατήρητες περιοχές. Το σχήμα 1.37(γ) απεικονίζει ένα σωστά εντοπισμένο πεδίο με περλίτη 34,05%. Η εικόνα 1.37(δ) δείχνει υπερβολική ανίχνευση, στην οποία τα χαρακτηριστικά είναι διευρυμένα και το κλάσμα όγκου του περλίτη είναι 42,3%.



Σχήμα 1.37: Παράδειγμα της επιρροής της ρύθμισης ανίχνευσης επί του κλάσματος περιοχής (AA) του περλίτη που ανιχνεύτηκε σε ένα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χάλυβα. (α) Ζωντανή εικόνα που δείχνει τον φερίτη και τον περλίτη. (β) Περλίτης μη εντοπισμένος (AA = 28,1%). (γ) Περλίτης σωστά εντοπισμένος (AA = 34,05%). (δ) Περλίτης υπερεντοπισμένος (AA = 42,3%). Τα δοκίμια χαράχθηκαν χημικά χρησιμοποιώντας 4% picral. 180 ×. [37]

Τα ανωτέρω παραδείγματα απεικονίζουν μετρήσεις πεδίου: Δηλαδή, όλα τα χαρακτηριστικά μετρούνται ταυτόχρονα. Οι αναλυτές εικόνες μπορούν επίσης να εκτελέσουν ειδικές μετρήσεις χαρακτηριστικών, δηλαδή κάθε ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στο πεδίο να μετρείται μεμονωμένα. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τις μετρήσεις των σωματιδίων για το μέγεθος τους και το σχήμα τους. Όταν η δυνατότητα αυτή είναι διαθέσιμη,

τα χαρακτηριστικά με τη ίδια γκρίζα απόχρωση δέχονται περαιτέρω διάκριση από διαφορές στο μέγεθος ή το σχήμα. Για παράδειγμα, τα διάφορα σχήματα γραφίτη ενός δοκιμίου χυτοσίδηρου μπορεί να ταξινομούνται κατά το μέγεθος ή το σχήμα, και στη συνέχεια να μετρώνται.

Οι περισσότεροι αναλυτές εικόνας μπορεί να εκτελέσουν μετρήσεις πάνω από την πλήρη οθόνη (κενό πλαίσιο) ή μέσα σε ένα μικρότερο πλαίσιο. Στο Σχήμα 1.36 και 1.37, η κεντρική περιοχή της οθόνης εντός των κάθετων και οριζόντιων γραμμών είναι η περιοχή ζωντανού πλαισίου, η οποία χρησιμοποιείται γενικά όταν διεξάγονται ειδικές μετρήσεις χαρακτηριστικών. Σωματίδια που τέμνουν το πλαίσιο αυτό μπορούν να διαγραφούν από την ανιχνευμένη περιοχή για την αποφυγή σφαλμάτων μέτρησης των σωματιδίων. Η περιοχή μεταξύ της άκρης της οθόνης και το ζωντανό πλαίσιο είναι η περιοχή φρουράς.

Οι αναλυτές εικόνας μπορούν να αποθηκεύσουν πολλές εικόνες στη μνήμη και να χρησιμοποιούν αυτές τις εικόνες ποικιλοτρόπως για την ενίσχυση της επιλογής χαρακτηριστικών. Η ικανότητα τους να μειώνουν ή να διαστέλλουν τα χαρακτηριστικά και να συγκρίνουν αυτές τις εικόνες με την αρχική εικόνα μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο στο διαχωρισμό παρακείμενων σωματιδίων ή fusing stringered χαρακτηριστικών. Η ανάλυση εικόνας είναι πολύ πιο ακριβής από τη χειροκίνητες τεχνικές για τη μέτρηση σωματιδίων αλλά τα γειτονικά σωματίδια είναι δύσκολο να παρατηρηθούν χωρίς τις ειδικές διαδικασίες επεξεργασίας εικόνας. Η ακριβής μέτρηση επηρεάζεται επίσης από το σχήμα ενός σωματιδίου και τη διαδικασία μέτρησης που χρησιμοποιείται. Τα σφαιρικά σωματίδια είναι πιο εύκολο να μετρηθούν ενώ για πιο πολύπλοκα σχήματα απαιτείται η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής μέτρησης για να ληφθούν ακριβείς μετρήσεις.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με βάση τον αριθμό και τη κατανομή των ανιχνευμένων σημείων της εικόνας σε σχέση με τη γραμμή σάρωσης και τον συνολικό αριθμό των σημείων. Για παράδειγμα το ποσοστό της περιοχής είναι απλά ο λόγος του αριθμού των εντοπισμένων σημείων εικόνας προς τον συνολικό αριθμό των σημείων εικόνας στο πεδίο μέτρησης: Δηλαδή, η ανιχνευμένη περιοχή χωρίζεται από τη περιοχή της μέτρησης. Επομένως το σωστό μέγεθος του πεδίου μέτρησης πρέπει να προσδιορίζεται με ακρίβεια χρησιμοποιώντας ένα μικρόμετρο για κάθε μεγέθυνση να λειτουργεί στη βαθμονομημένη λειτουργία. Άλλες μετρήσεις είναι πιο περίπλοκες. Για παράδειγμα, για να μετρήσει τον αριθμό των εντοπισμένων σωματιδίων σε ένα πεδίο εικόνας γνωστού μεγέθους, δηλαδή, για να ληφθεί ο N_A , ο αριθμός των σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας, ο αναλυτής εικόνας πρέπει πρώτα να καθορίσει ποιά τμήματα της ανιχνευμένης εικόνας είναι διακριτά σωματίδια. Σωματίδιο είναι κάθε ανιχνευμένο χαρακτηριστικό που περιβάλλεται από παντού από

απαρατήρητα σημεία εικόνας. Μετά από αυτή τη διάκριση, τα σωματίδια μετρούνται, και ο αριθμός τους χωρίζεται από την περιοχή μέτρησης.

Η ταξινόμηση κατά μέγεθος μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Η απλούστερη διαδικασία για τον προσδιορισμό του μέσου όρου περιοχής σωματιδίου, A_{avg} , είναι να διαιρεθεί το κλάσμα περιοχής από τον αριθμό των σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας, δηλαδή, A_A / N_A . Αυτή είναι η πιο άμεση διαδικασία χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου. Ειδικές μετρήσεις χαρακτηριστικών παρέχουν διάφορες πιθανές διαδικασίες. Μια είναι να μετρηθεί η έκταση του κάθε χαρακτηριστικού και να καθοριστεί η μέση έκταση όλων των σωματιδίων που μετρώνται. Μια άλλη περιλαμβάνει τη μέτρηση της περιοχής του κάθε σωματιδίου και τον υπολογισμό της ισοδύναμης διαμέτρου βασισμένη σε κάποια παραδοχή για το σχήμα τους. Το ύψος των σωματιδίων, το μέγιστο και το ελάχιστο μήκος και το πάχος, και ούτω καθεξής, θα μπορούσε επίσης να μετρηθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ, ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

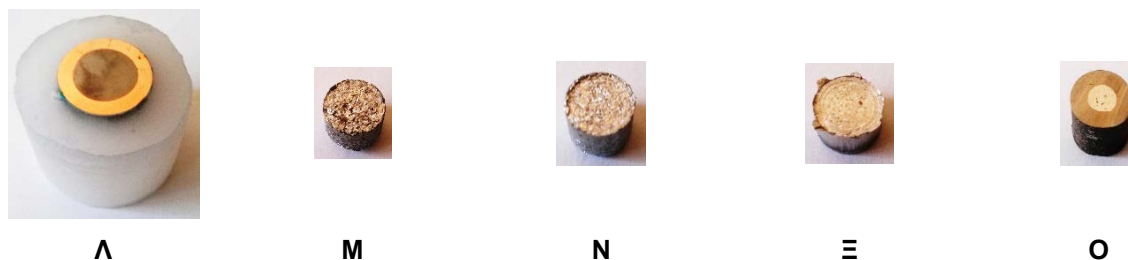
2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε την επιλογή διάφορων μεταλλικών δοκιμίων με ελαττώματα προκειμένου να παρατηρηθεί το είδος του κάθε ελαττώματος, το ποσοστό διάβρωσης τους, πιθανές αιτίες στις οποίες οφείλονται τα συγκεκριμένα ελαττώματα και τέλος τρόποι πρόληψης και αντιμετώπισης τους. Τα υλικά των δοκιμίων τα οποία επιλέχθηκαν είναι χάλυβας, χαλκός και αλουμίνιο και παρουσιάζονται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του εργαστηρίου μεταλλογραφίας του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη προετοιμασία τους για να γίνει η μεταλλογραφική και οπτική παρατήρηση.

2.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται όλα τα δοκίμια που παρατηρήθηκαν συγκεντρωτικά.

**A****B****Γ****Δ****E****Z****H****Θ****I****K**

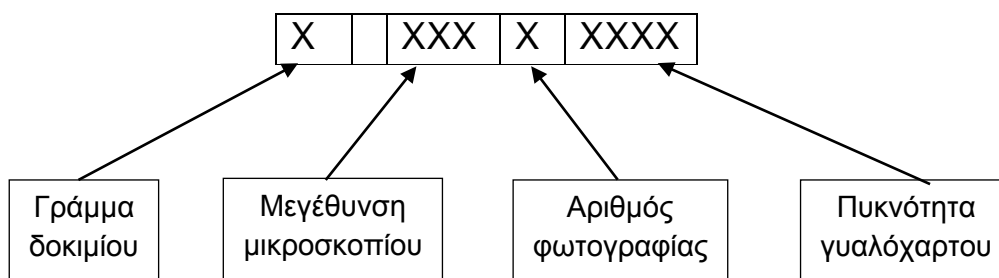


Σχήμα 2.1: Δοκίμια προς παρατήρηση

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το υλικό, τη χρήση και τις ιδιότητες του κάθε δοκιμίου παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο αναλυτικά για το καθένα.

2.3 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Λόγω του πλήθους των φωτογραφιών εξαιτίας των αρκετών παραμέτρων που αλλάζουν στο κάθε δοκίμιο (θέση φωτογραφίας, μεγέθυνση μικροσκοπίου, αριθμός πυκνότητας γυαλόχαρτου) ακολουθήθηκε μια ονοματολογία των δοκιμίων ώστε να πραγματοποιηθεί μετέπειτα η ταξινόμηση τους χωρίς να υπάρχει σύγχυση. Στο παρακάτω παράδειγμα φαίνεται αναλυτικά η λογική που ακολουθήθηκε:



Οι τιμές που παίρνει η καθεμία μεταβλητή φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

| Γράμμα δοκιμίου | Μεγέθυνση μικροσκοπίου | Αριθμός φωτογραφίας | Πυκνότητα γυαλόχαρτου |
|-----------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
| α | 50 | 1 | 120 |
| β | 100 | 2 | 320 |
| γ | 200 | 3 | 500 |

| | | | |
|---|-----|---|------|
| δ | 500 | 4 | 1000 |
| ε | | 5 | 2400 |
| ζ | | 6 | 4000 |
| η | | 7 | |
| θ | | 8 | |
| ι | | | |
| κ | | | |
| λ | | | |
| μ | | | |
| ν | | | |
| ξ | | | |
| ο | | | |

Για παράδειγμα μια φωτογραφία με όνομα α200.1.320 σημαίνει ότι αφορά το δοκίμιο α με μεγέθυνση x200, είναι η πρώτη φωτογραφία και έχει γίνει προετοιμασία με γυαλόχαρτο πυκνότητας 320.

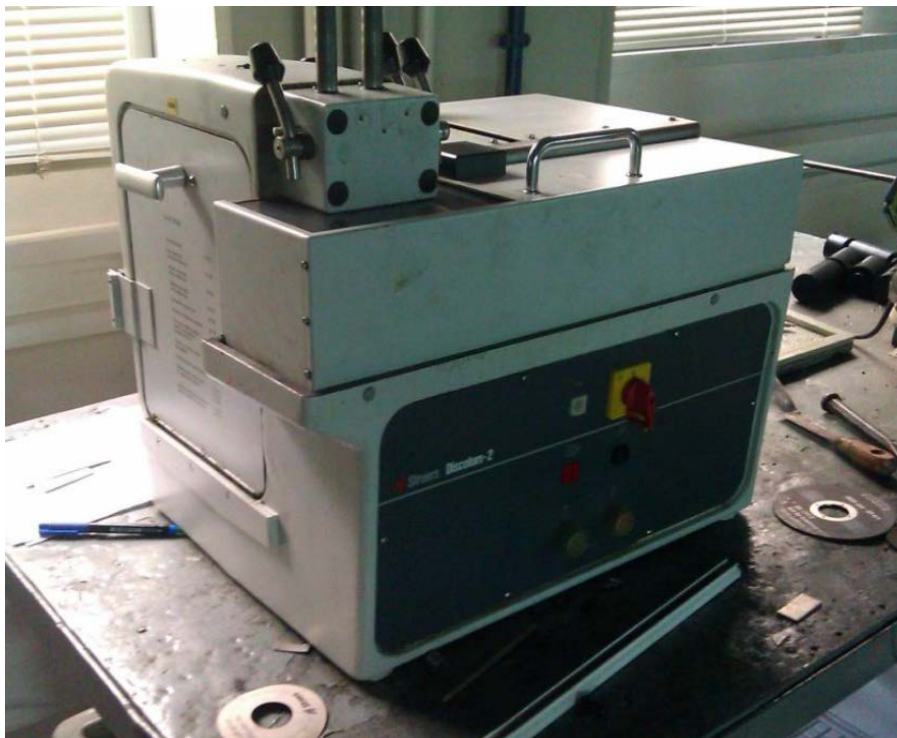
2.4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η μεταλλογραφική παρατήρηση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στην ειδικά διαμορφωμένη αίθουσα στο ισόγειο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε ορισμένα από τα δοκίμια ήταν απαραίτητη η κοπή είτε εγκάρσια, είτε διαμήκη προκειμένου να παρατηρηθεί το εσωτερικό τους. Επίσης, σε ορισμένα από τα δοκίμια πραγματοποιήθηκε εγκιβωτισμός με ρητίνη, καθώς και λείανση της υπό παρατήρηση επιφάνειας. Τέλος, όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου για να χαρακτηριστεί η δομή των επιφανειών και να παρατηρηθούν τυχόν ατέλειες και ελαττώματα. Παρακάτω περιγράφεται όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός για την πραγματοποίηση των παραπάνω βημάτων.

2.4.1 ΚΟΠΤΙΚΟΣ ΤΡΟΧΟΣ

Ο κοπτικός τροχός του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε για την κοπή ορισμένων δοκιμίων. Έχει δυνατότητα ανάπτυξης στροφών έως περίπου 4000 rpm. Τόσο η πρόσδεση των δοκιμίων, όσο και η κάθοδος του κοπτικού τροχού, γίνονται χειροκίνητα. Για το λόγο

αυτό, η επιφάνεια που παράχθηκε από την κοπή δεν ήταν κατάλληλη και χρειάστηκε να ακολουθήσει λείανση των δοκιμίων. Ο κοπτικός τροχός είναι κατασκευασμένος από την εταιρεία Struers. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ο κοπτικός τροχός του εργαστηρίου.



Σχήμα 2.2: Κοπτικό εργαλείο εργαστηρίου Struers Discotom-2

2.4.2 ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σε όσα δοκίμια ήταν δυνατόν, πραγματοποιήθηκε εγκιβωτισμός σε ρητίνη προκειμένου να προσανατολιστούν στο επιθυμητό επίπεδο ώστε να γίνει ενδελεχής παρατήρησης τους στο μικροσκόπιο για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα τεμάχια, με τη βοήθεια ειδικών στατήρων, τοποθετήθηκαν κάθετα σε ειδικά κουτιά εγκιβωτισμού Struers. Κατόπιν, σε αναλογία 3 προς 2 ή 2 προς 1 τοποθετήθηκαν η ρητίνη εγκιβωτισμού και ο διαλύτης σε ειδικά κυπελάκια τηρουμένων όλων των μέτρων ασφαλείας (γάντια πλαστικά, μάσκα προσώπου για τις αναθυμιάσεις, εξαερισμός, γυαλιά προστασίας) και μετά την ανάμιξή τους, του ρευστό εκχύθηκε στα κουτιά εγκιβωτισμού όπου και στερεοποιήθηκε με τα δοκίμια να παραμένουν ακινητοποιημένα στην επιθυμητή θέση. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τόσο η ρητίνη και ο διαλύτης όσο και η διαδικασία εγκιβωτισμού βήμα –βήμα.



Σχήμα 2.3:Ρητίνη και διαλύτης Struers μαζί με δοσομετρητή



Σχήμα 2.4:Ειδικό κουτί εγκιβωτισμού δοκίμιο προς εγκιβωτισμό

2.4.3 ΛΕΙΑΝΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε για την βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας που προέκυψε από την κοπή δοκιμίων, ώστε αυτή να είναι εύκολα παρατηρήσιμη με το μικροσκόπιο.

Το μηχάνημα αποτελείται από έναν αποσπώμενο περιστρεφόμενο δίσκο, οι στροφές του οποίου ρυθμίζονται από τον χρήστη του μηχανήματος μεταξύ 0 – 600 rpm. Η φορά περιστροφής είναι ανθρωπολογιακή. Το ρόλο του ψυκτικού υγρού παίζει το νερό το οποίο εγχέεται στον περιστρεφόμενο δίσκο μέσω ειδικού στομίου. Ο περιστρεφόμενος δίσκος μπορεί να αφαιρεθεί και στη θέση του να μπει άλλος δίσκος επικαλυμμένος με βελούδο, ειδικός για την κατεργασία της στίλβωσης.

Για τη λείανση των δοκιμίων του πειράματος χρησιμοποιήθηκε πληθώρα λειαντικών δίσκων (γυαλόχαρτων), σε διάφορες τιμές τραχύτητας. Για κάθε λειαντικό δίσκο οι τιμές των στροφών του μηχανήματος και της πίεσης των δοκιμίων πάνω στο δίσκο, ήταν διαφορετικές.

Τέλος, το λειαντικό μηχάνημα φέρει και ένα μύλο πρόσδεσης των δοκιμίων. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μύλος πρέπει πρώτα τα δοκίμια να εγκιβωτιστούν. Ο μύλος περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα 100 rpm, ανθρωπολογιακής φοράς. Επίσης, στις θέσεις πρόσδεσης των δοκιμίων υπάρχουν και ελατήρια προέντασης, ώστε να ρυθμίζεται η πίεση των δοκιμίων πάνω στο δίσκο.

Η τριβή των δοκιμίων επιτυγχάνεται με τη σχετική κίνηση των δύο περιστρεφόμενων μερών του μηχανήματος. Οι δύο περιστροφές είναι έκκεντρες, ενώ για τις περισσότερες εφαρμογές, η ταχύτητα περιστροφής του περιστρεφόμενου δίσκου είναι διαφορετική και του μύλου είναι διαφορετικές.

Το λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 2.5: Λειαντικό μηχάνημα εργαστηρίου

2.4.4 ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Το μικροσκόπιο χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση της μεταλλογραφικής δομής των επιφανειών των δοκιμίων. Η ονομαστική τιμή μεγέθυνσης του μικροσκοπίου είναι 10X. Επιπλέον μπορούν να τοποθετηθούν φακοί μεγέθυνσης τιμών: 5X, 10X, 20X, 50X, 100X και 200X, επιπλέον της ονομαστικής τιμής μεγέθυνσης.

Η εικόνα του μικροσκοπίου λαμβάνεται από μια κάμερα στο επάνω μέρος του μικροσκοπίου. Στη συνέχεια τα δεδομένα από την κάμερα περνούν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου μπορούν να μετατραπούν σε επεξεργάσιμη μορφή. Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα προβολής των αποτελεσμάτων σε τηλεόραση για καλύτερη εποπτεία κατά τη διάρκεια της εργασίας στο μικροσκόπιο.

Το μικροσκόπιο καθώς και οι υπόλοιπες συσκευές παρατήρησης φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.6: Διάταξη οπτικού μικροσκοπίου του εργαστηρίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αναλυτικά με φωτογραφίες όλων των δοκιμών, τα βήματα προετοιμασίας για την οπτική παρατήρηση και φωτογραφίες οπτικής παρατήρησης των ατελειών των δοκιμών, καθώς και παρατηρήσεις σχετικά με τις ατέλειες τους.

3.2 ΔΟΚΙΜΙΟ Α

3.2.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Α προέρχεται από εκρηκτική συμπίεση σκόνηςκυβικού βοριδίου σε χαλύβδινη θήκη και παρουσιάζεται σε κάθετη τομή.



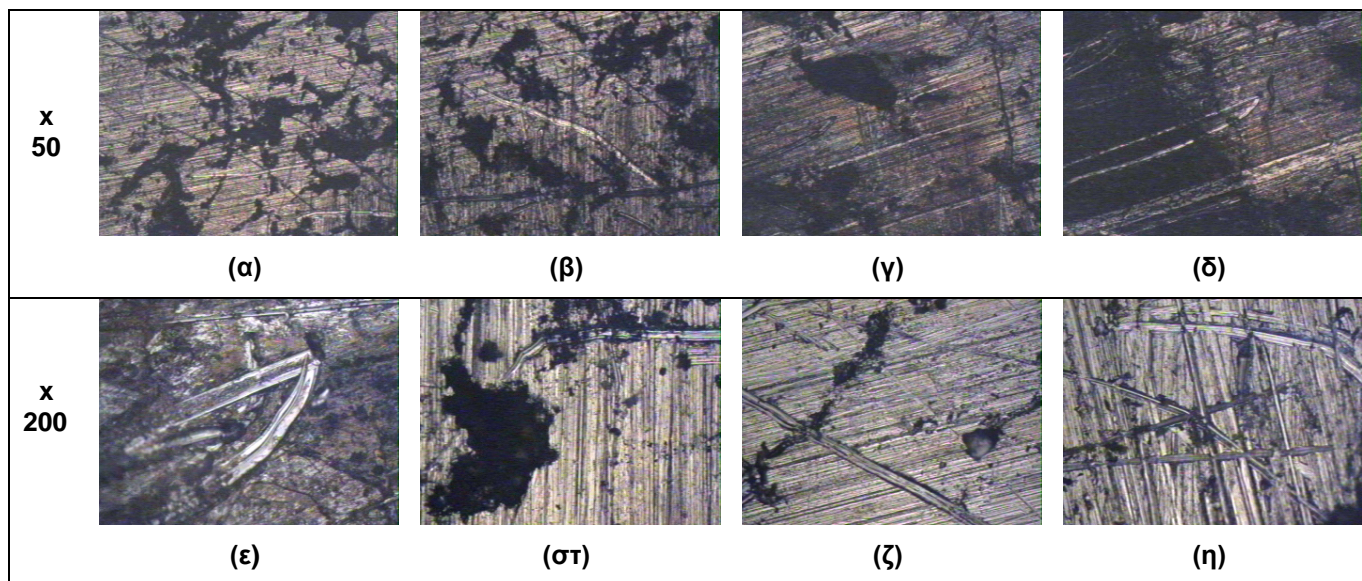
Σχήμα 3.1: Δοκίμιο Α εκρηκτικής συμπίεσης σε κάθετη τομή

3.2.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

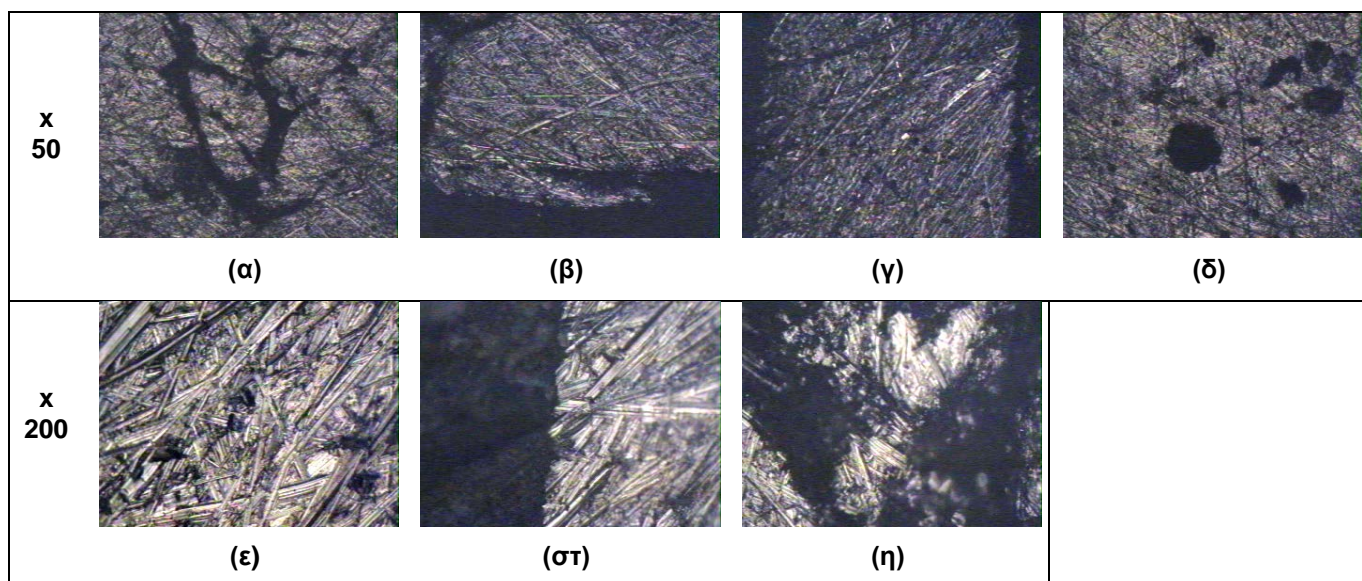
Για την προετοιμασία του δοκιμίου ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα

1. Εγκιβωτισμός του δοκιμίου.
2. Λείανση με γυαλόχαρτα 120, 320, 500, 1000, 2400, 4000.

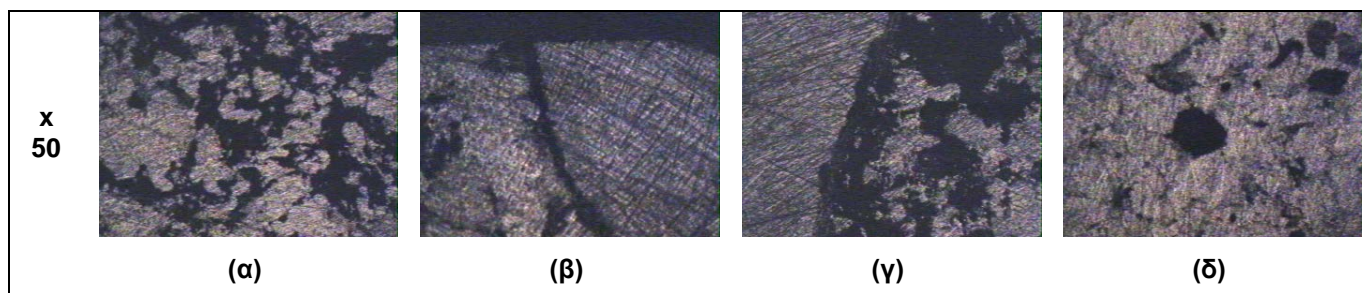
3.2.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

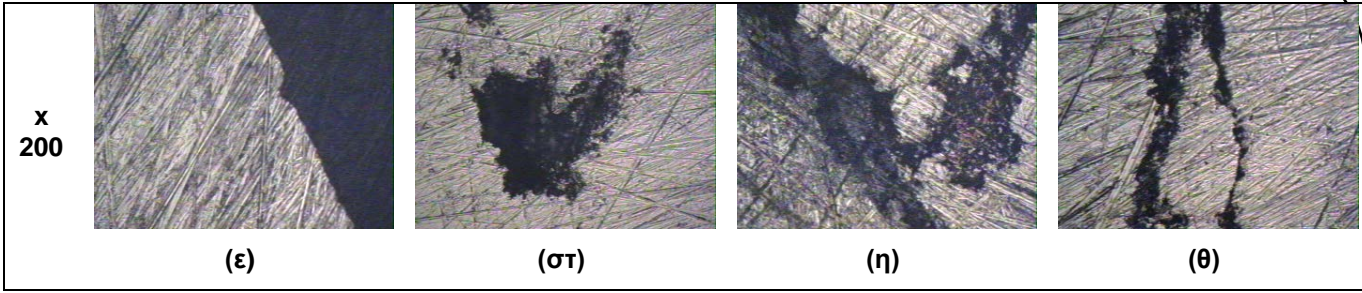


Σχήμα 3.2:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Α χωρίς λείανση

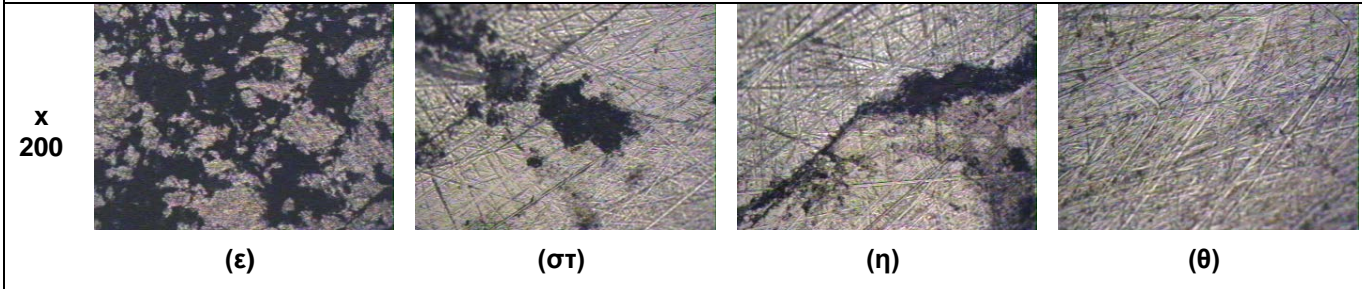
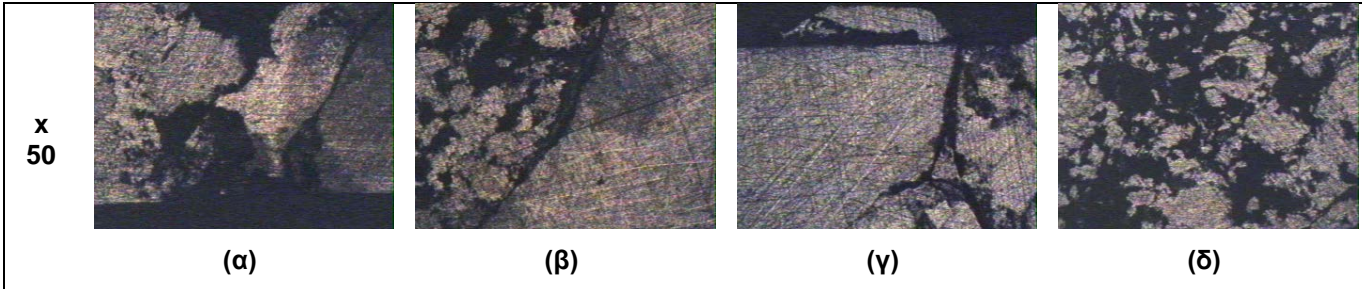


Σχήμα 3.3:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Α με λείανση με γυαλόχαρτο 120

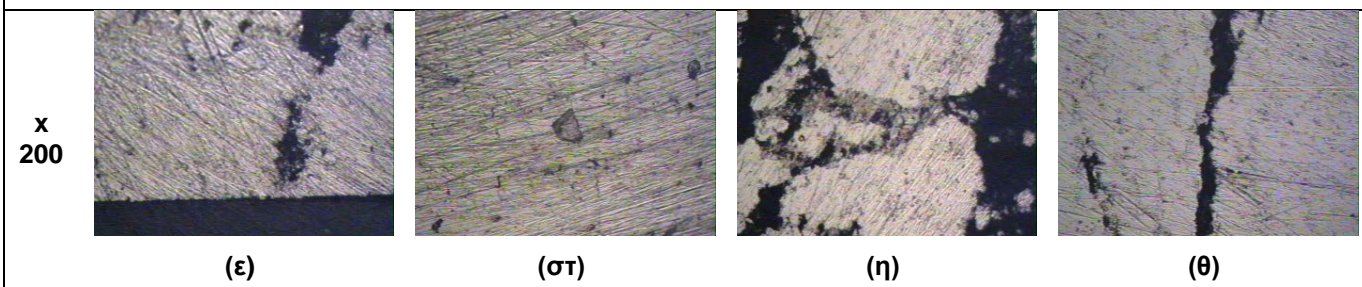
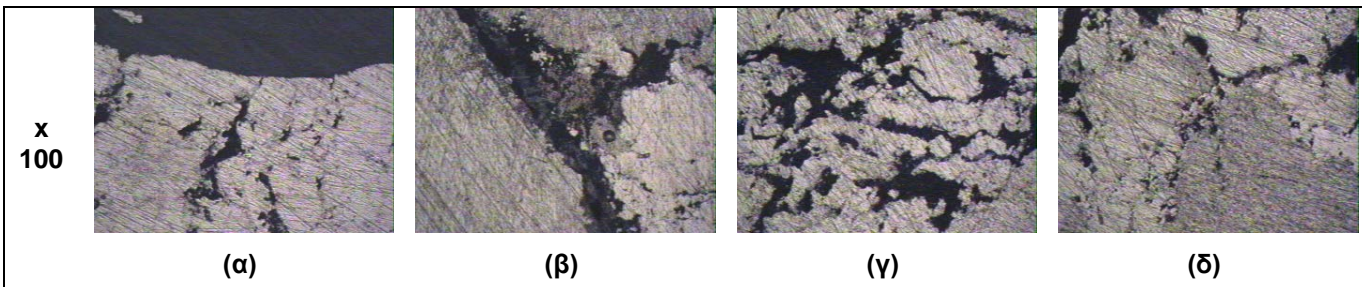




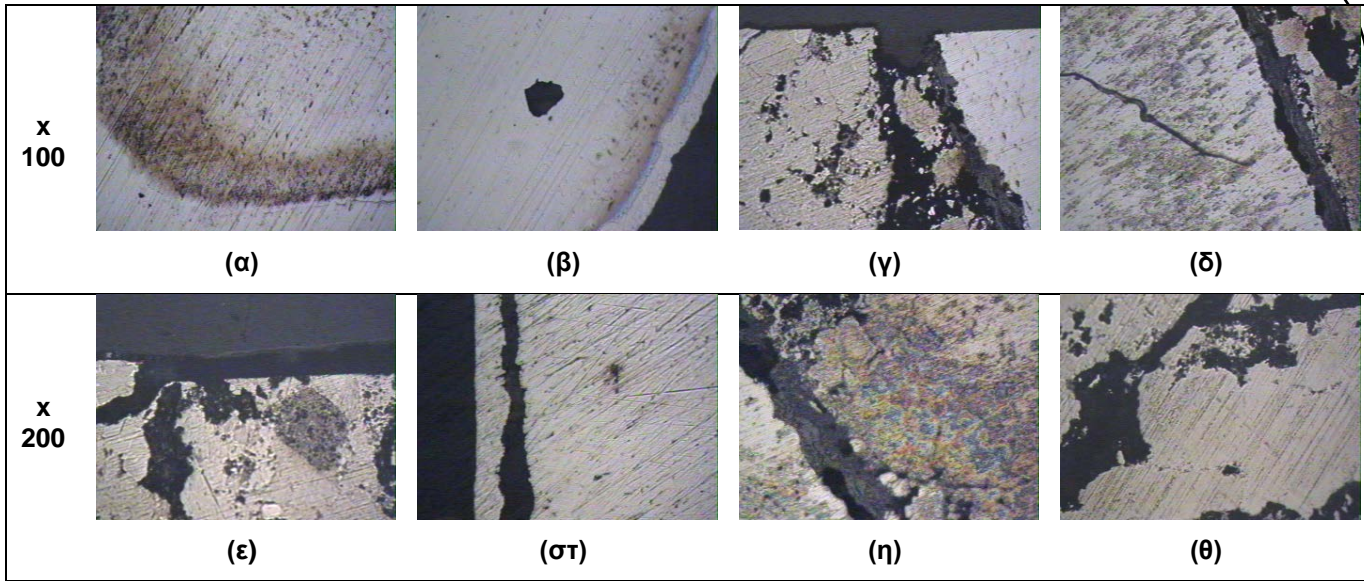
Σχήμα 3.4:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Α με λείανση με γυαλόχαρτο 320



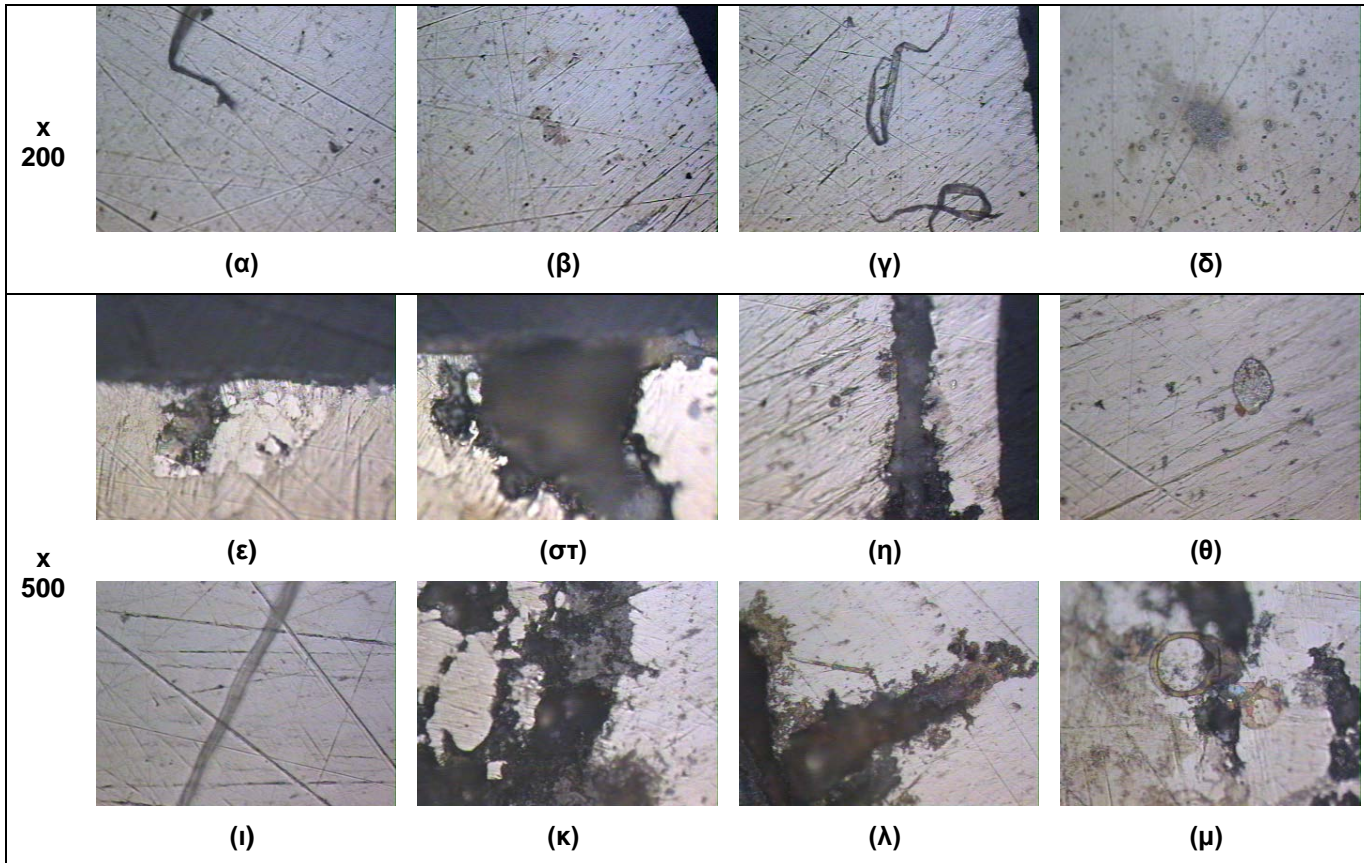
Σχήμα 3.5:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Α με λείανση με γυαλόχαρτο 500



Σχήμα 3.6:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Α με λείανση με γυαλόχαρτο 1000



Σχήμα 3.7:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Α με λείανση με γυαλόχαρτο 2400



Σχήμα 3.8:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Α με λείανση με γυαλόχαρτο 4000

3.2.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρώντας τις φωτογραφίες του δοκιμίου χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί λείανση δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της εκρηκτικής συμπίεσης. Παρατηρούνται πολλές ατέλειες που μπορεί να οφείλονται στον δίσκο κοπής ο οποίος παραμόρφωσε την επιφάνεια ή στην επίδραση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας που είναι ικανό να οξειδώσει την χαλύβδινη θήκη.

Χρησιμοποιώντας το γυαλόχαρτο πυκνότητας 120 μπορούμε να διακρίνουμε καλύτερα την διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών (χάλυβας – κυβικό βορίδιο) ιδιαίτερα στην μεγέθυνση 200x. Στη συνέχεια, με χρήση γυαλόχαρτου πυκνότητας 320 και 500 μπορούμε να παρατηρήσουμε πλέον τη δομή τόσο του χάλυβα όσο και του κυβικού βοριδίου, την διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δύο υλικών και αρκετές ατέλειες στο τμήμα της σκόνης κυβικού βοριδίου που μπορεί να οφείλεται σε μη πετυχημένη κατεργασία εκρηκτικής συμπίεσης. Τα παραπάνω στοιχεία γίνονται πιο αισθητά λειαινώντας το δοκίμιο με γυαλόχαρτα πυκνότητας 1000 και 2400 όπου μπορούμε πλέον να παρατηρήσουμε αρκετές ατέλειες στο κυβικό βορίδιο στην περιοχή γύρω από τη θήκη του χάλυβα με τους κόκκους του αλουμινίου να διακρίνονται πλέον περισσότερο.

Τέλος, πιο εμφανείς παρατηρήσεις μπορούμε να εξάγουμε με τη χρήση του γυαλόχαρτου πυκνότητας 4000 και μεγέθυνση 500x όπου παρατηρούμε καθαρά πλέον τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ της θήκης του χάλυβα και της σκόνης του κυβικού βοριδίου, αρκετά ελαττώματα στην επιφάνεια του κυβικού βοριδίου που οφείλονται στη κατεργασία της εκρηκτικής συμπίεσης και αρκετή οξείδωση στη θήκη του χάλυβα στην περιοχή όπου έρχεται σε επαφή με τη σκόνη του κυβικού βοριδίου.

3.3 ΔΟΚΙΜΙΟ Β

3.3.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Β προέρχεται από εκρηκτική συμπίεση σκόνης κυβικού βοριδίουσε χαλύβδινη θήκη και παρουσιάζεται σε εγκάρσια τομή.



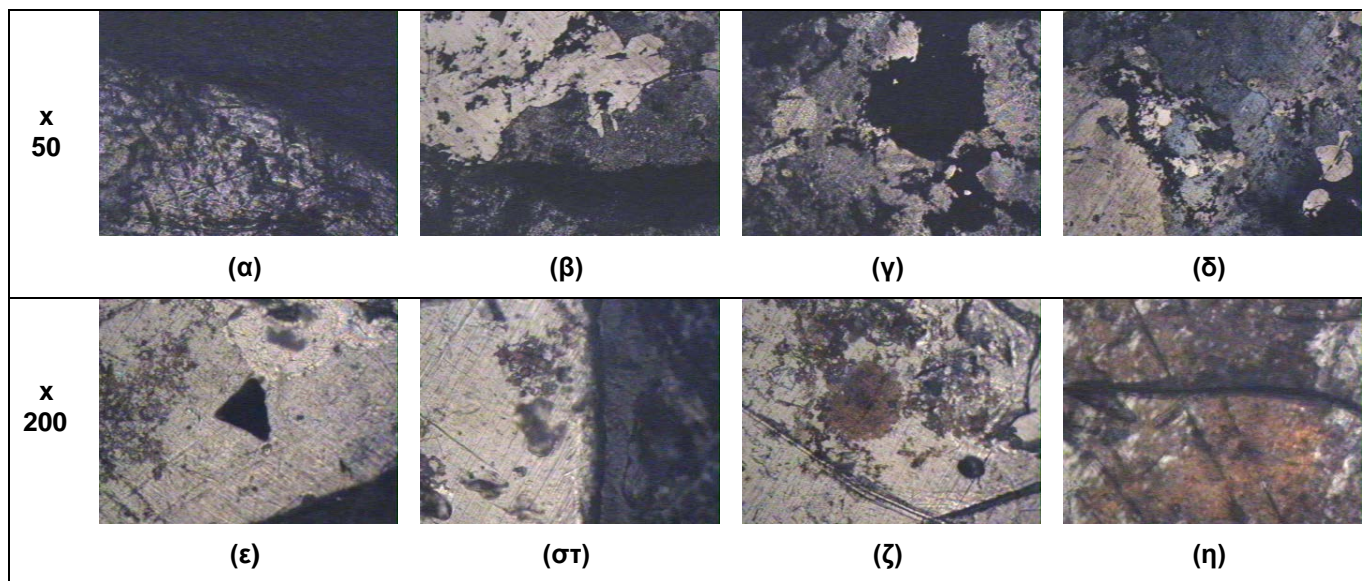
Σχήμα 3.9: Δοκίμιο Β εκρηκτικής συμπίεσης σε εγκάρσια τομή

3.3.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

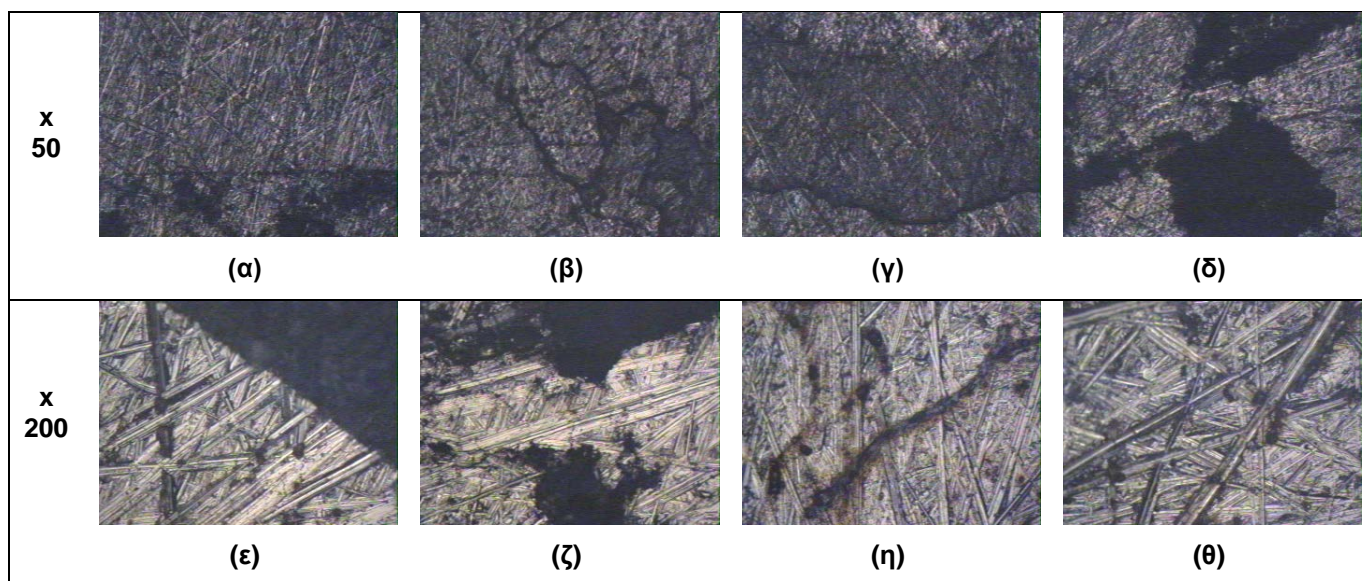
Για την προετοιμασία του δοκιμίου ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα

1. Εγκιβωτισμός του δοκιμίου.
2. Λείανση με γυαλόχαρτα 120, 320, 500, 1000, 2400, 4000.

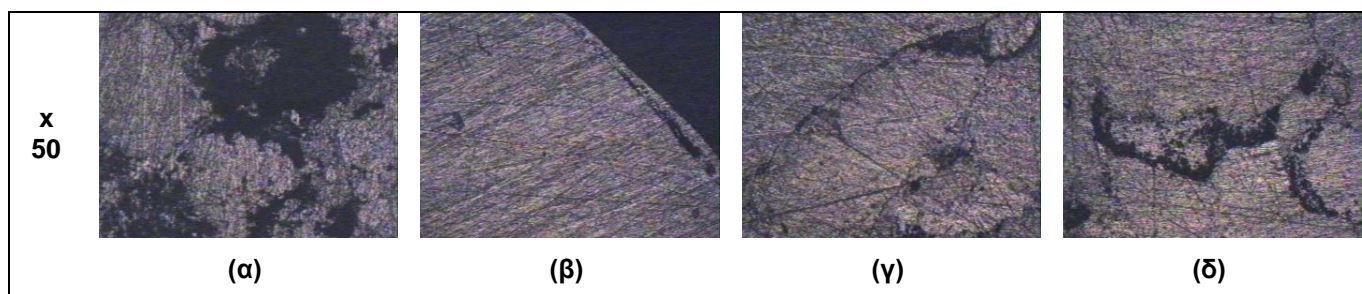
3.3.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

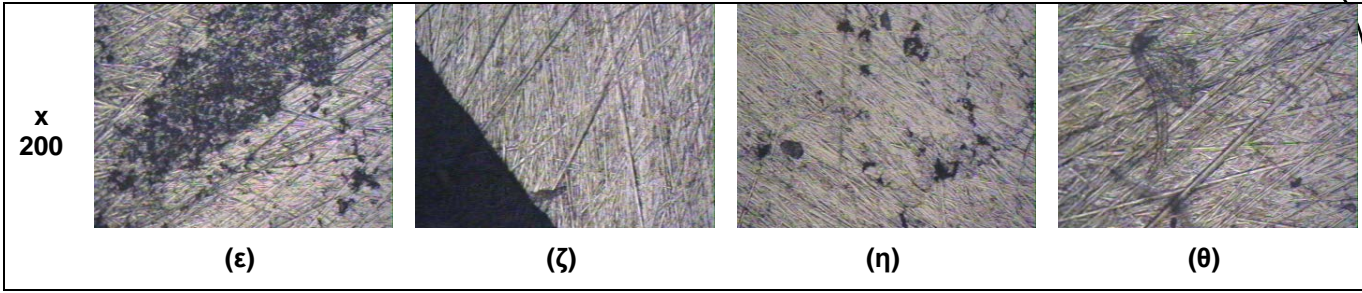


Σχήμα 3.10:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Β χωρίς λείανση

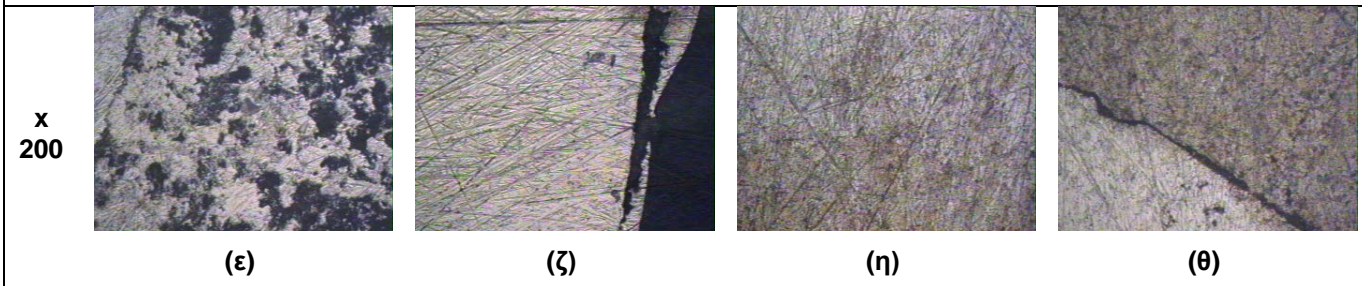
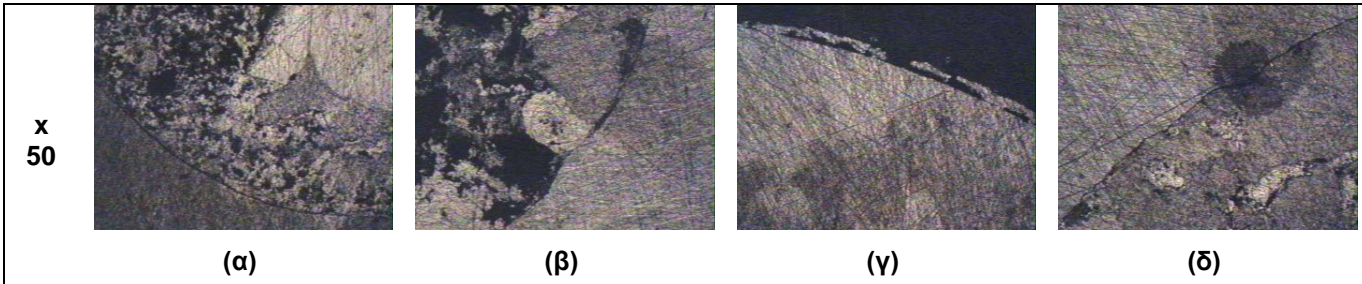


Σχήμα 3.11:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Β με λείανση με γυαλόχαρτο 120

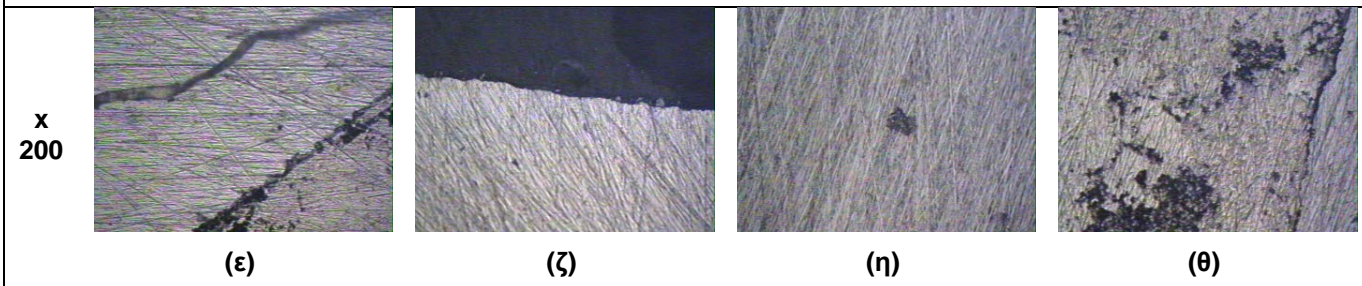
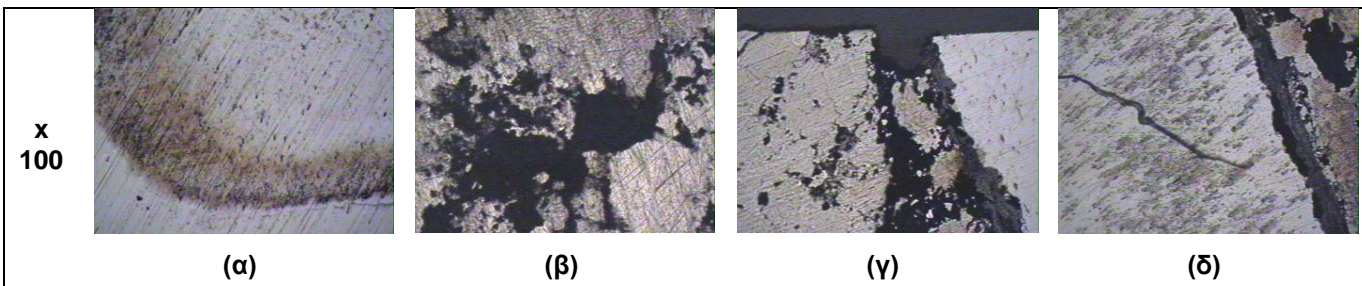




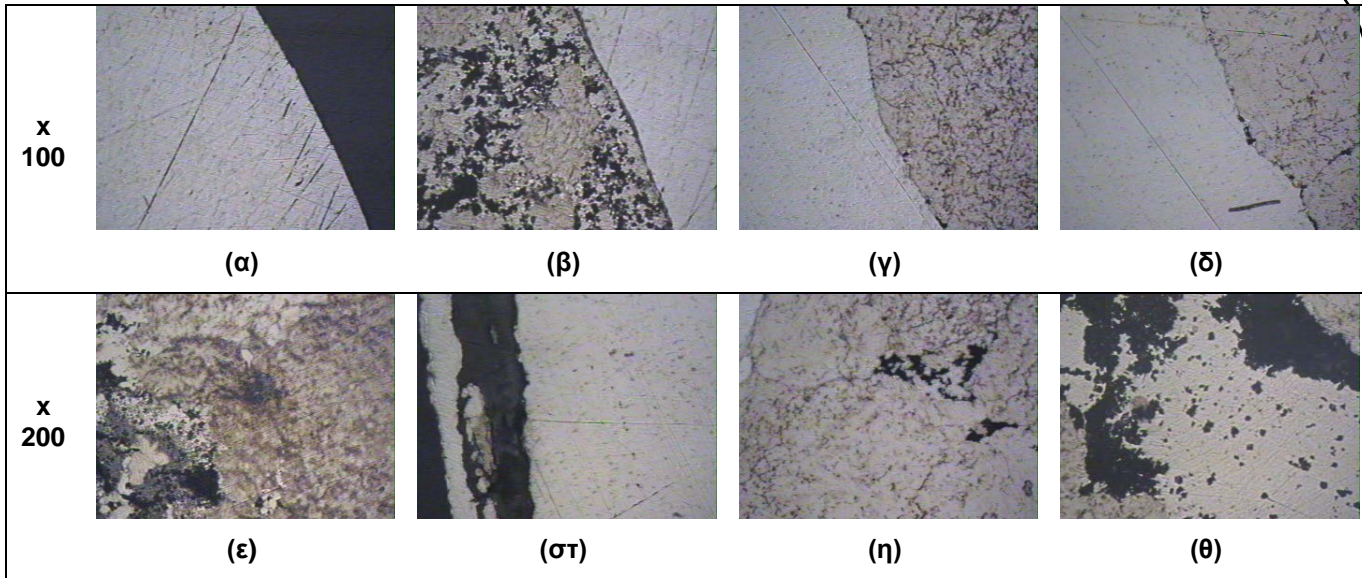
Σχήμα 3.12: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Β με λείανση με γυαλόχαρτο 320



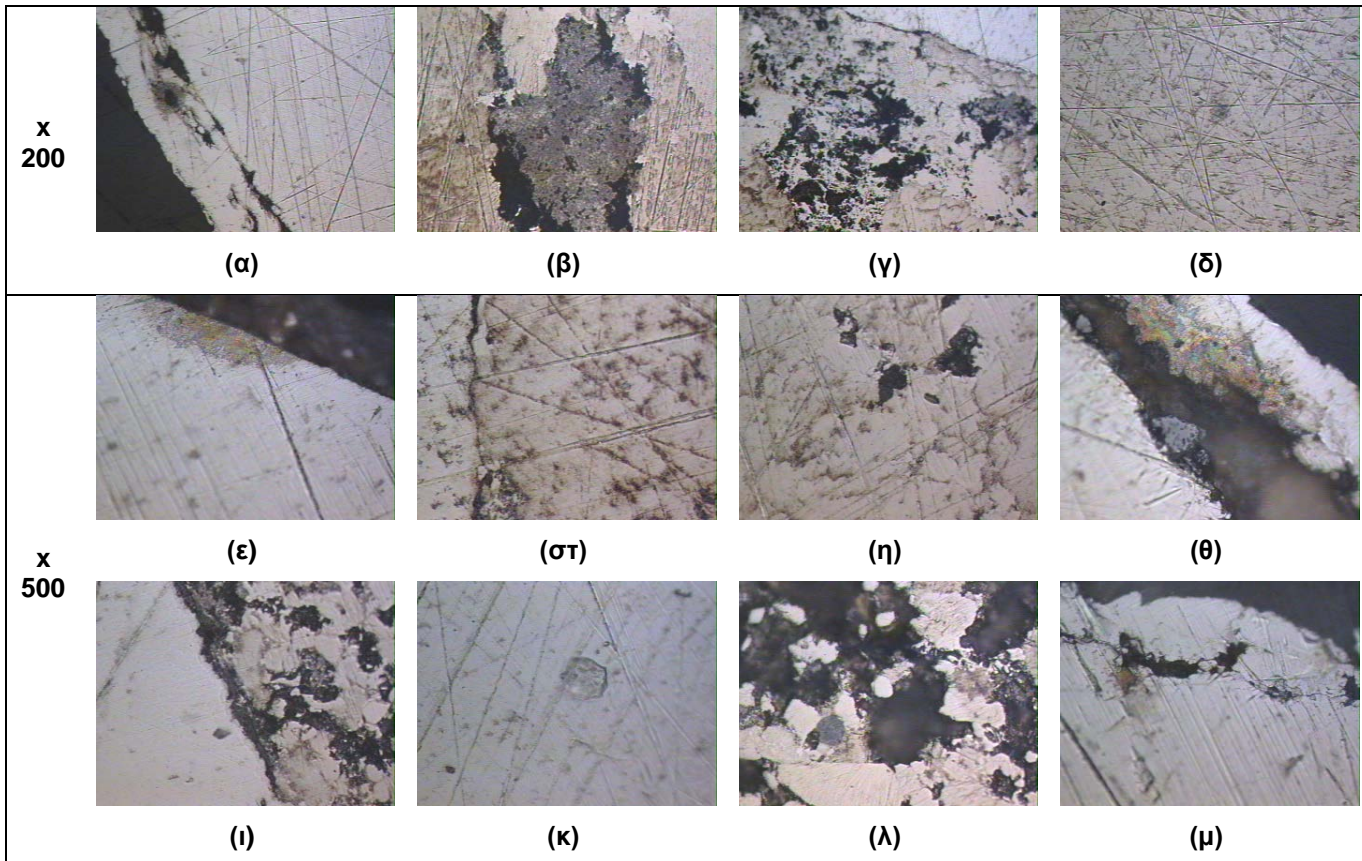
Σχήμα 3.13: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Β με λείανση με γυαλόχαρτο 500



Σχήμα 3.14: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Β με λείανση με γυαλόχαρτο 1000



Σχήμα 3.15:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Β με λείανση με γυαλόχαρτο 2400



Σχήμα 3.16:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Β με λείανση με γυαλόχαρτο 4000

3.3.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρώντας στο μικροσκόπιο το συγκεκριμένο δοκίμιο, τα συμπεράσματα που μπορούν να παρατηρηθούν και εξαχθούν είναι παρόμοια με αυτά της κάθετης τομής του ίδιου δοκιμίου της προηγούμενης παραγράφου.

Έτσι, παρατηρώντας τις φωτογραφίες του δοκιμίου χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί λείανση παρατηρούνται πολλές ατέλειες που μπορεί να οφείλονται στον δίσκο κοπής ο οποίος παραμόρφωσε την επιφάνεια ή στην επίδραση του οξυγόνου της ατμόσφαιρας που είναι ικανό να οξειδώσει την χαλύβδινη θήκη.

Χρησιμοποιώντας το γυαλόχαρτο πυκνότητας 120 μπορούμε να διακρίνουμε καλύτερα την διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών (χάλυβας – κυβικό βορίδιο) ιδιαίτερα στην μεγέθυνση 200x. Στη συνέχεια, με χρήση γυαλόχαρτου πυκνότητας 320 και 500 μπορούμε να παρατηρήσουμε πλέον τη δομή τόσο του χάλυβα όσο και του κυβικού βοριδίου, την διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δύο υλικών και αρκετές ατέλειες στο τμήμα της σκόνης κυβικού βοριδίου που μπορεί να οφείλεται σε μη πετυχημένη κατεργασία εκρηκτικής συμπίεσης. Τα παραπάνω στοιχεία γίνονται πιο αισθητά λειαινώντας το δοκίμιο με γυαλόχαρτα πυκνότητας 1000 και 2400 όπου μπορούμε πλέον να παρατηρήσουμε αρκετές ατέλειες στο κυβικό βορίδιο στην περιοχή γύρω από τη θήκη του χάλυβα με τους κόκκους του κυβικού βοριδίου να διακρίνονται πλέον περισσότερο.

Όπως και στην κάθετη τομή, πιο εμφανείς παρατηρήσεις μπορούμε να εξάγουμε με τη χρήση του γυαλόχαρτου πυκνότητας 4000 και μεγέθυνση 500x όπου παρατηρούμε καθαρά πλέον τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ της θήκης του χάλυβα και της σκόνης του κυβικού βοριδίου, αρκετά ελαττώματα στην επιφάνεια του κυβικού βοριδίου που οφείλονται στη κατεργασία της εκρηκτικής συμπίεσης και αρκετή οξείδωση στη θήκη του χάλυβα στην περιοχή όπου έρχεται σε επαφή με τη σκόνη του κυβικού βοριδίου. Τέλος, μπορούμε να παρατηρήσουμε ακόμα κάποιες ατέλειες στην επιφάνεια που είναι πιθανό να οφείλονται από την διαδικασία κοπής του δοκιμίου με τον δίσκο κοπής του εργαστηρίου.

3.4 ΔΟΚΙΜΙΟ Γ

3.4.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Γ προέρχεται από σκόνη χαλκού από κατεργασία κονιομεταλλουργίας όπου έγινε συμπίεση σε δίσκο και παρουσιάζεται σε κάθετη τομή,



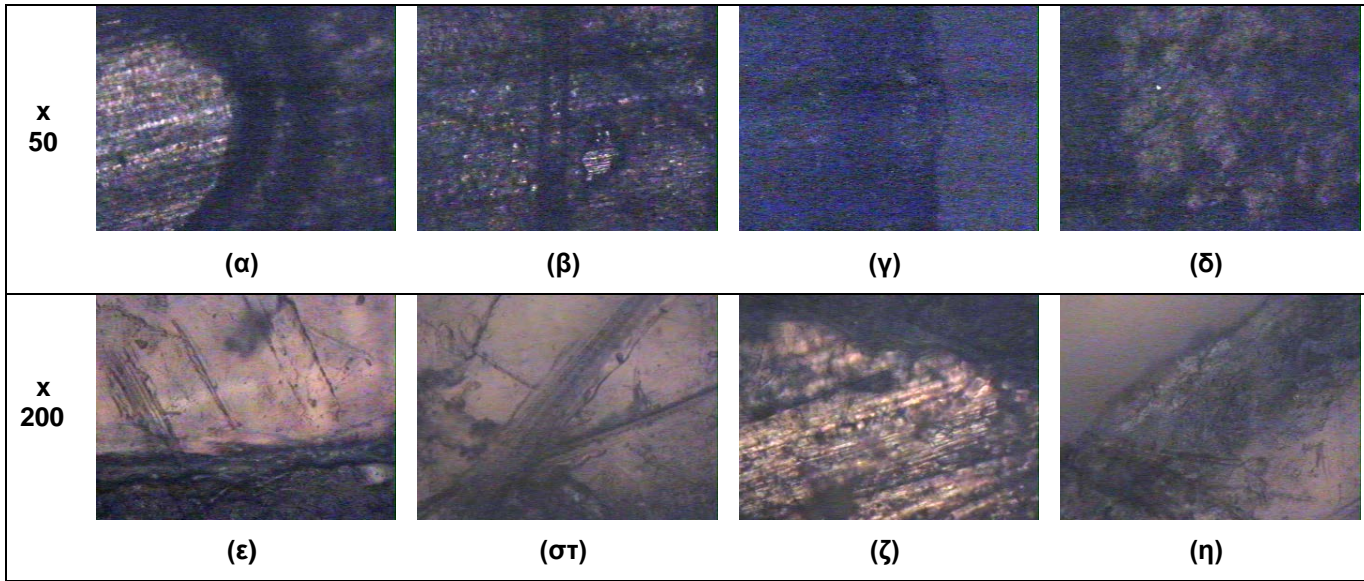
Σχήμα 3.17: Δοκίμιο Γ συμπίεσης σκόνης χαλκού σε δίσκο σε κάθετη τομή

3.4.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

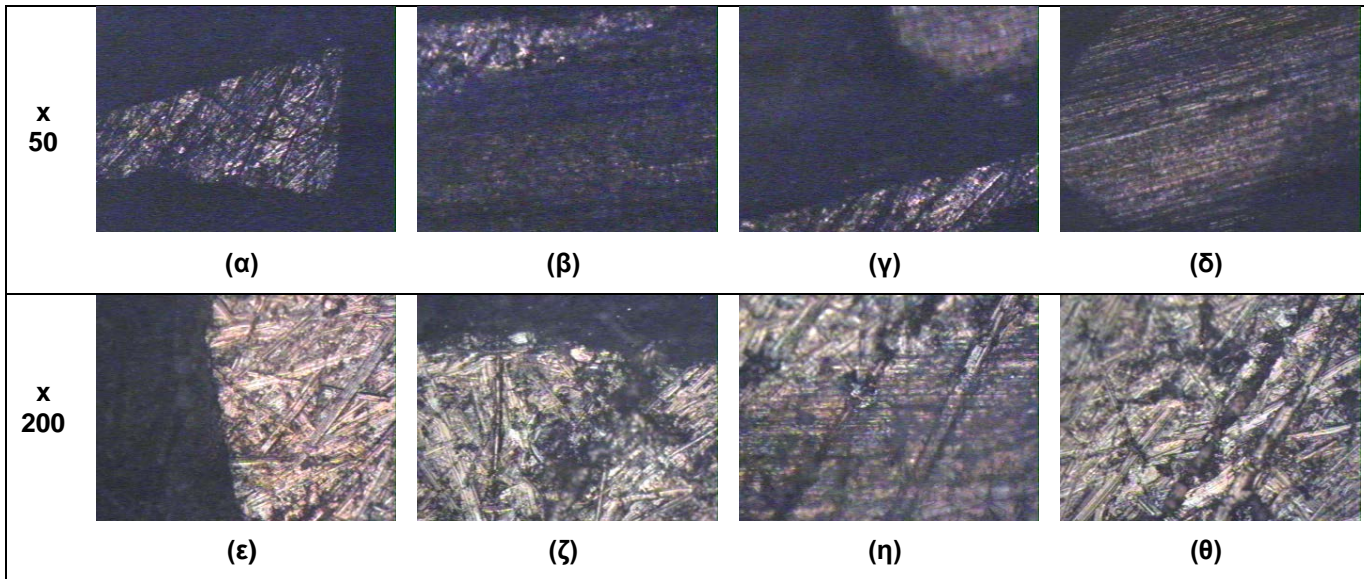
Για την προετοιμασία του δοκιμίου ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα

1. Εγκιβωτισμός του δοκιμίου.
2. Λείανση με γυαλόχαρτα 120, 320, 500, 1000, 2400, 4000.

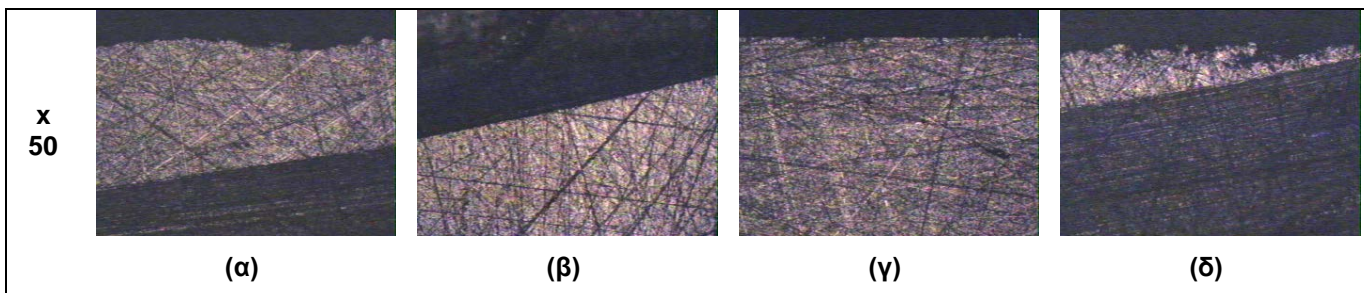
3.4.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

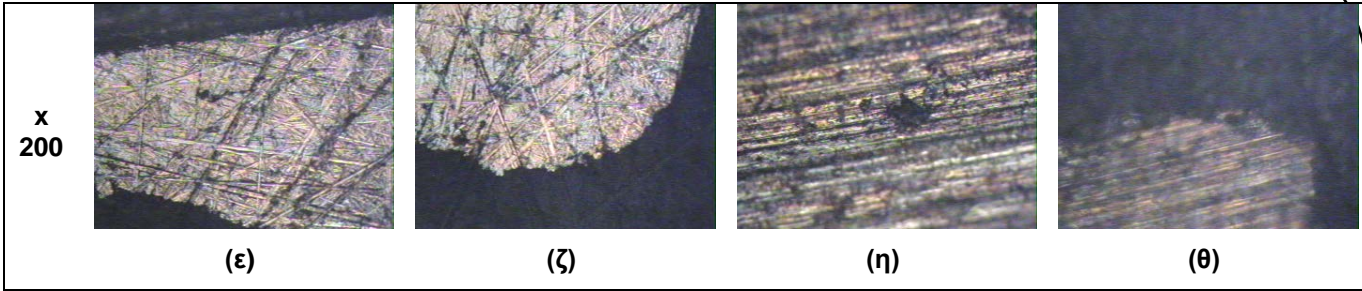


Σχήμα 3.18: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Γ χωρίς λείανση

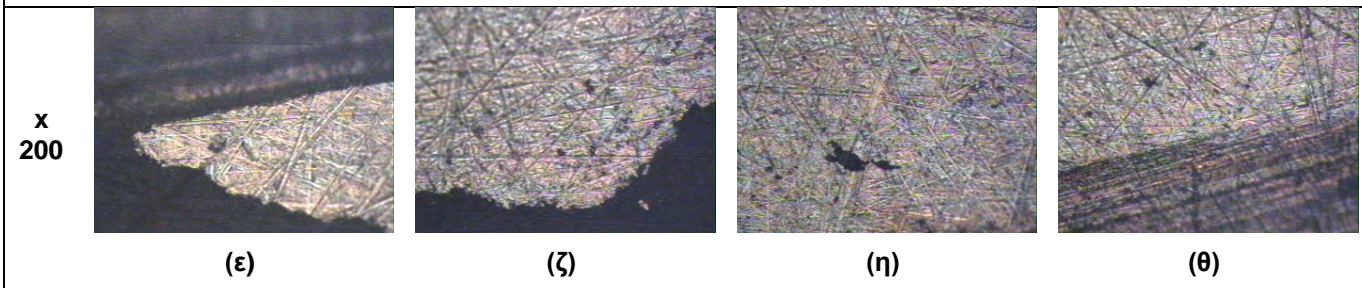
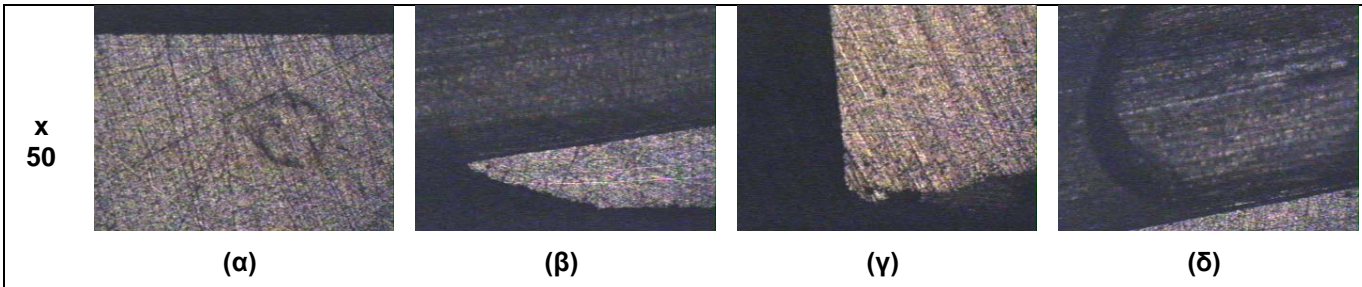


Σχήμα 3.19: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Γ με λείανση με γυαλόχαρτο 120

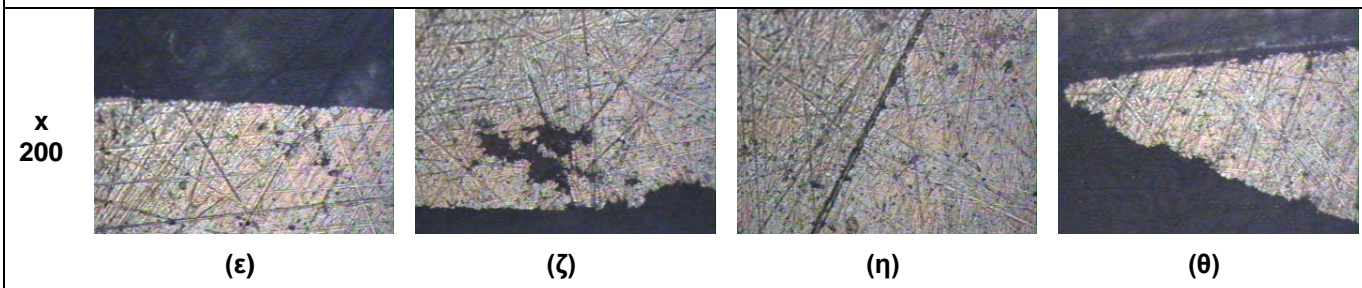
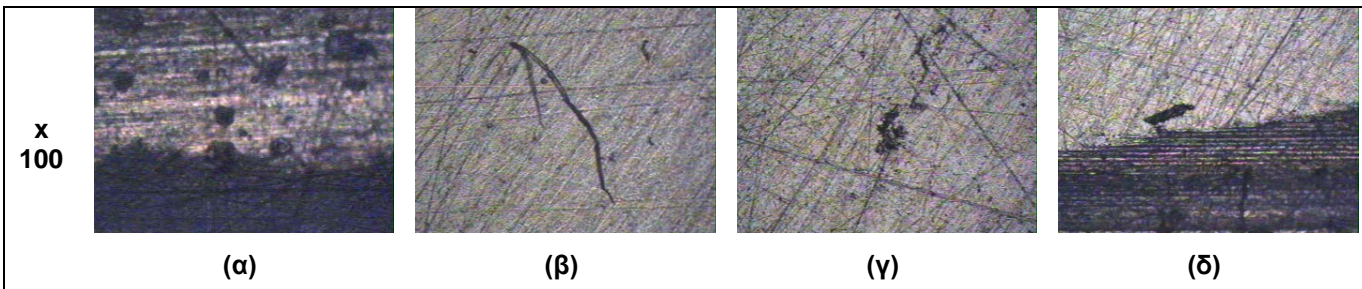




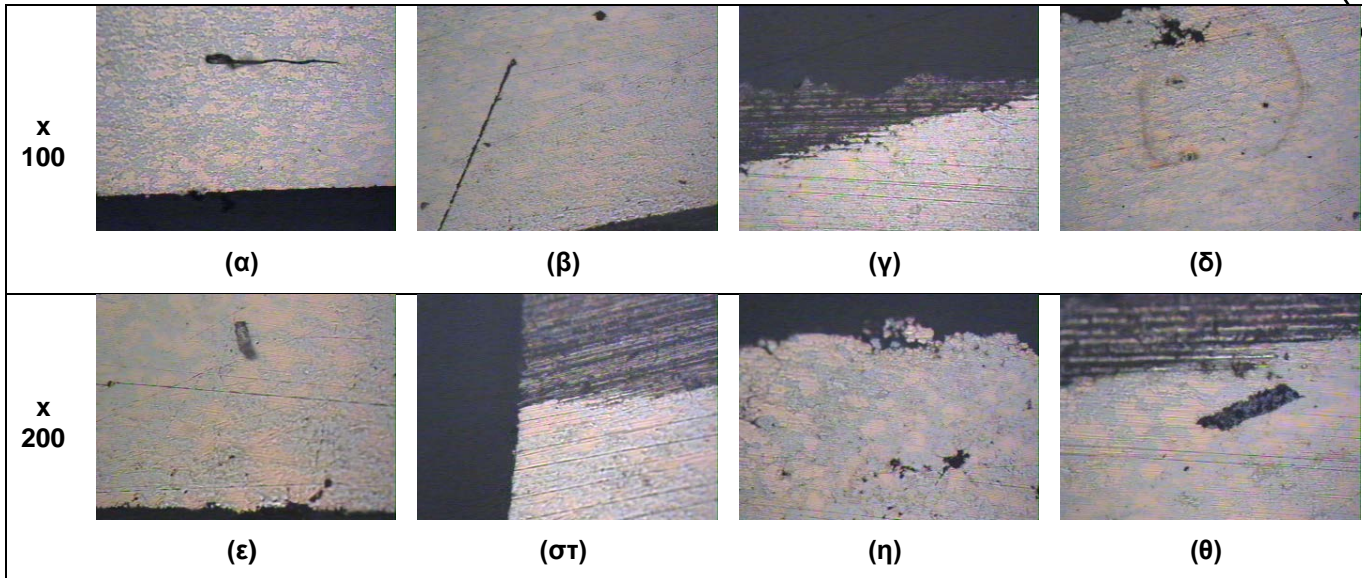
Σχήμα 3.20: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Γ με λείανση με γυαλόχαρτο 320



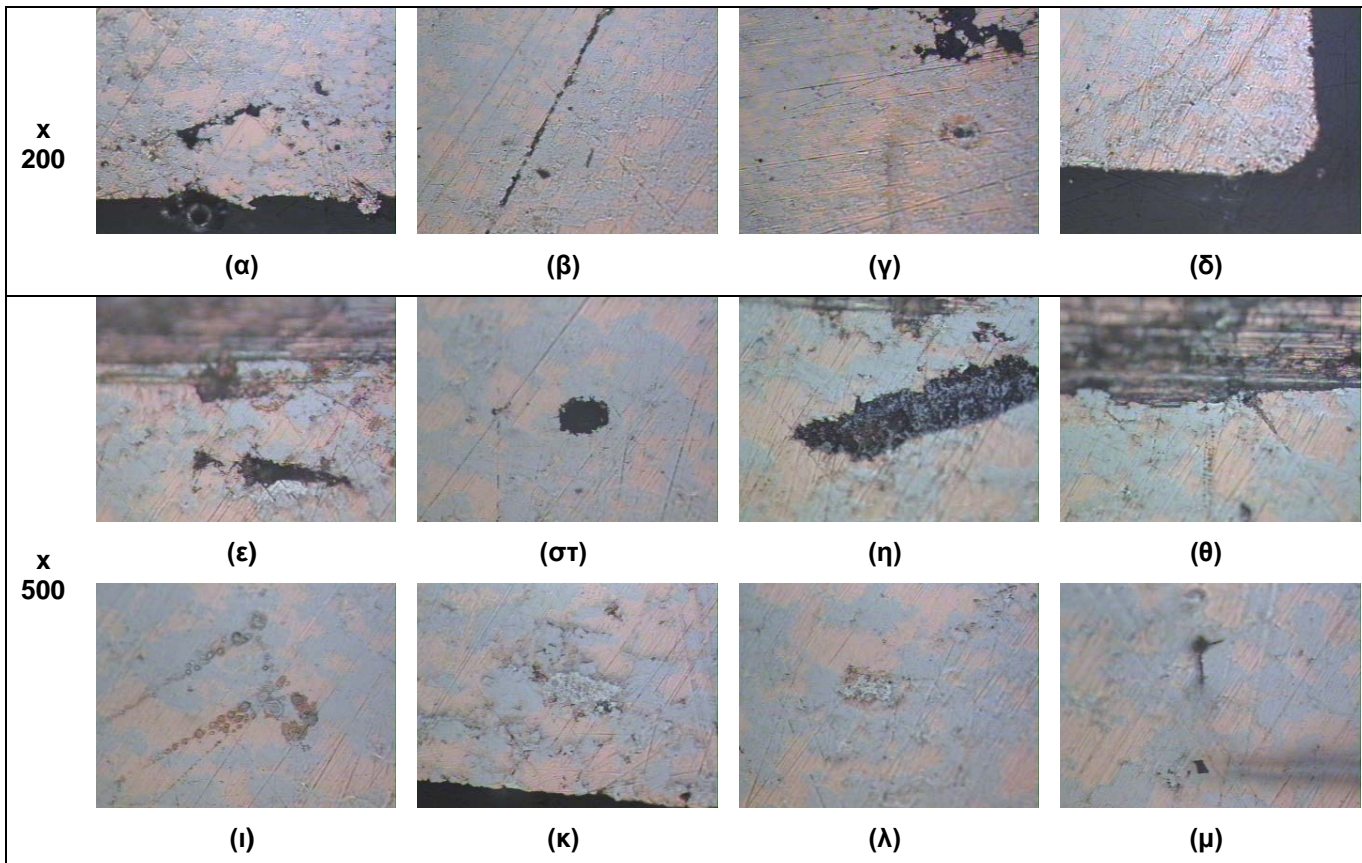
Σχήμα 3.21: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Γ με λείανση με γυαλόχαρτο 500



Σχήμα 3.22: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Γ με λείανση με γυαλόχαρτο 1000



Σχήμα 3.23:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Γ με λείανση με γυαλόχαρτο 2400



Σχήμα 3.24:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Γ με λείανση με γυαλόχαρτο 4000

3.4.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρώντας τις φωτογραφίες του δοκιμίου χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί λείανση δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας της συμπίεσης. Παρατηρούνται πολλές ατέλειες που μπορεί να οφείλονται στον δίσκο κοπής ο οποίος παραμόρφωσε την επιφάνεια κατά την κάθετη τομή του δοκιμίου.

Χρησιμοποιώντας το γυαλόχαρτο πυκνότητας 120 οι ατέλειες στη επιφάνεια μειώθηκαν αισθητά ενώ η δομή του χαλκού μπορεί να παρατηρηθεί πιο καθαρά με τη χρήση των γυαλόχαρτων πυκνότητας 320 και 500. Στη συνέχεια, με τη χρήση των γυαλόχαρτων πυκνότητας 1000 και 2400 μπορούμε να παρατηρήσουμε πλέον καθαρότερη και ομοιογενή επιφάνεια ενώ είναι και εμφανής μια περιοχή με διαφορετική δομή και διαφορετικό χρώμα στο δοκίμιο που μπορεί να οφείλεται σε προσμίξεις στη σκόνη χαλκού που είναι πιθανό να μην ήταν 100% καθαρή.

Τέλος, πιο εμφανείς παρατηρήσεις μπορούμε να εξάγουμε με τη χρήση του γυαλόχαρτου πυκνότητας 4000 και μεγέθυνση 500χόπου παρατηρούμε καθαρά πλέον την περιοχή που διαφέρει από το υπόλοιπο δοκίμιο του συμπιεσμένου χαλκού ενώ το υπόλοιπο τμήμα παρουσιάζει μία ομοιογένεια που εκφράζει την επιτυχία της συμπίεσης σε μεγάλο βαθμό.

3.5 ΔΟΚΙΜΙΟ Δ

3.5.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Δ προέρχεται από συγκόλληση χαλύβδινου δοκιμίου, όπου παρουσιάζεται το σκέτο μέταλλο σε εγκάρσια τομή.



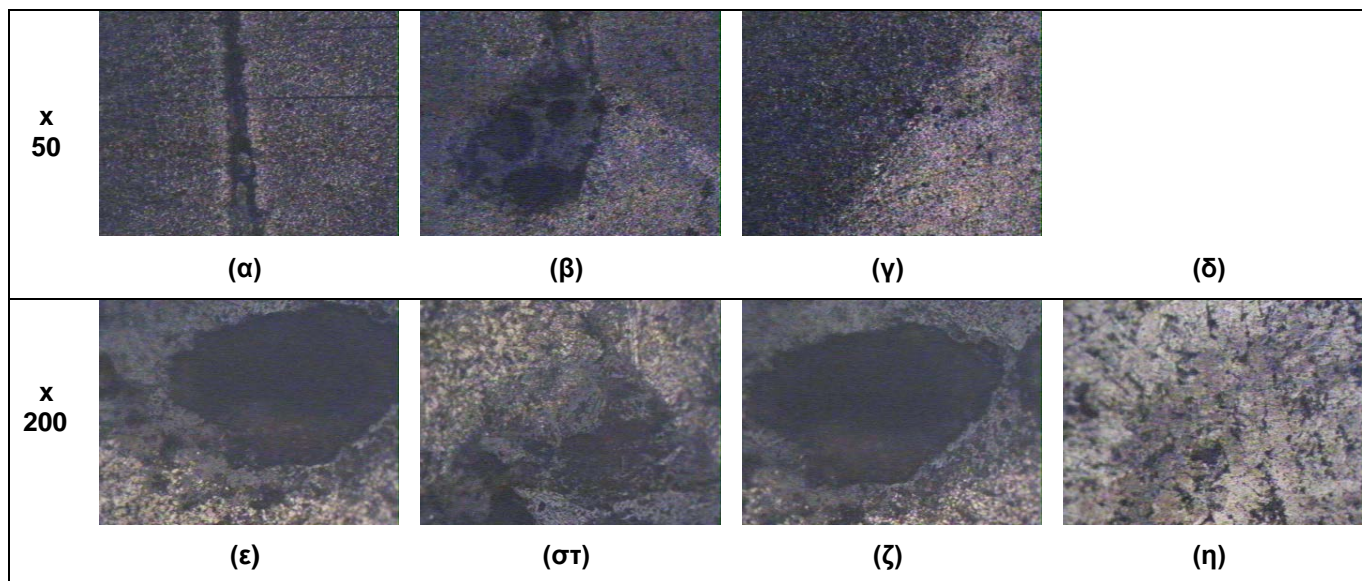
Σχήμα 3.25: Δοκίμιο Δ από χάλυβα μετά από συγκόλληση σε εγκάρσια τομή

3.5.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

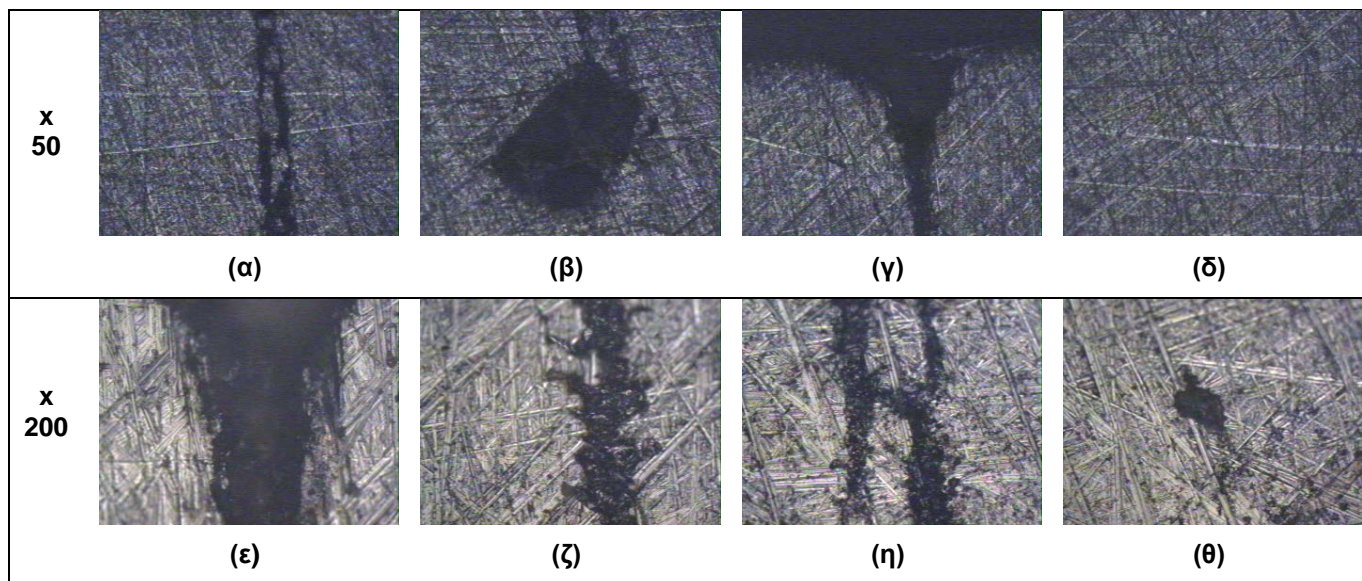
Για την προετοιμασία του δοκιμίου ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα

1. Εγκιβωτισμός του δοκιμίου.
2. Λείανση με γυαλόχαρτα 120, 320, 500, 1000, 2400, 4000.

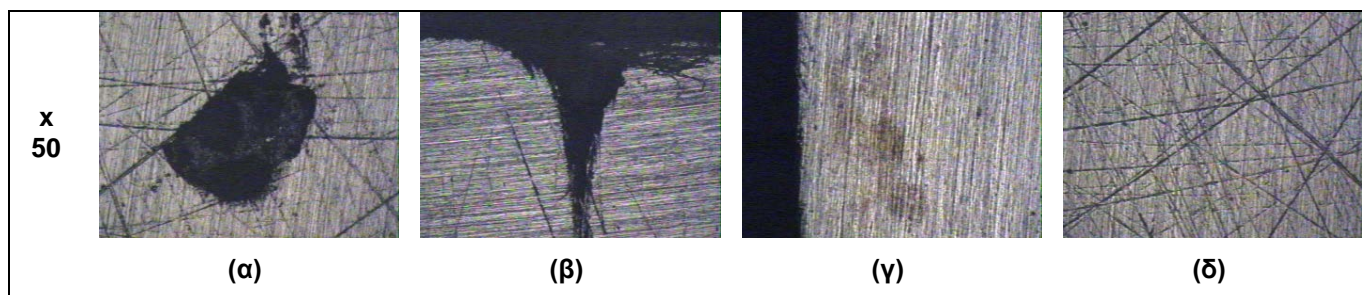
3.5.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

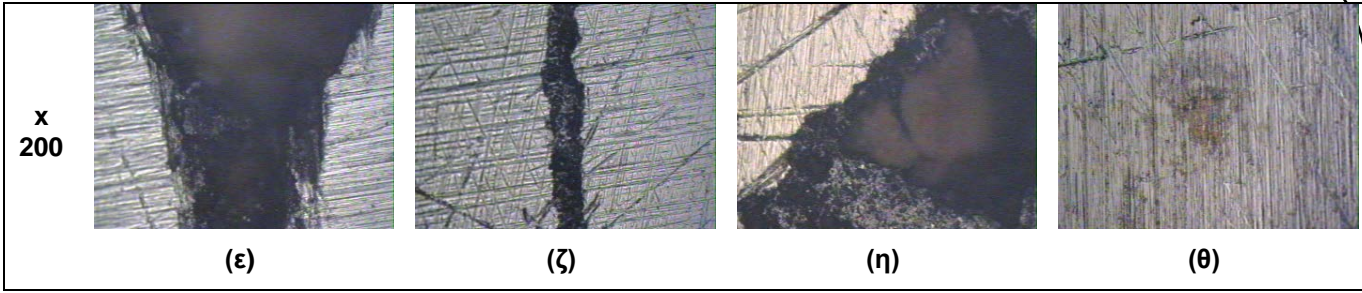


Σχήμα 3.26: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Δ χωρίς λείανση

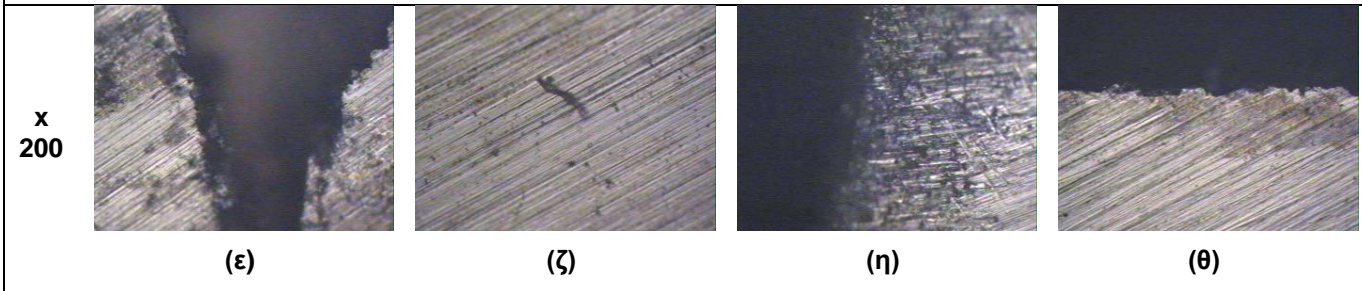
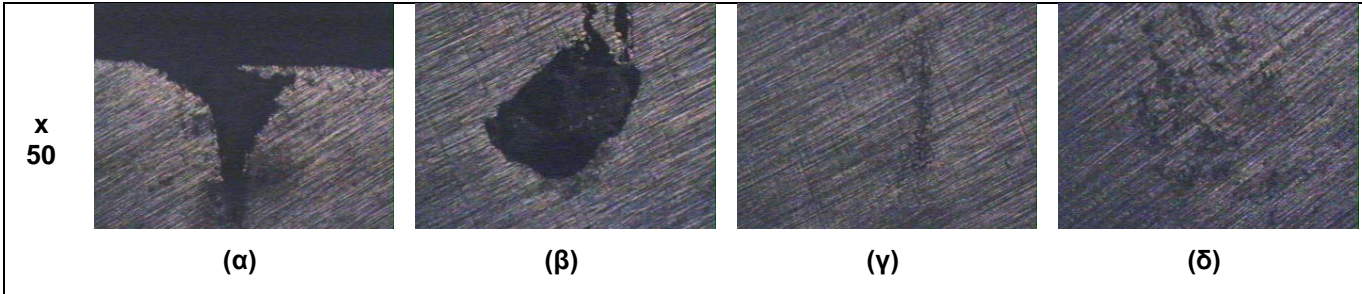


Σχήμα 3.27: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Δ με λείανση με γυαλόχαρτο 120

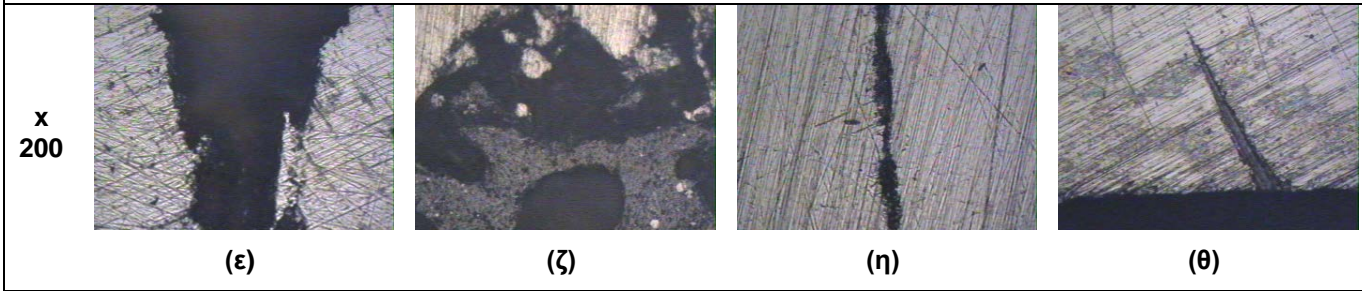
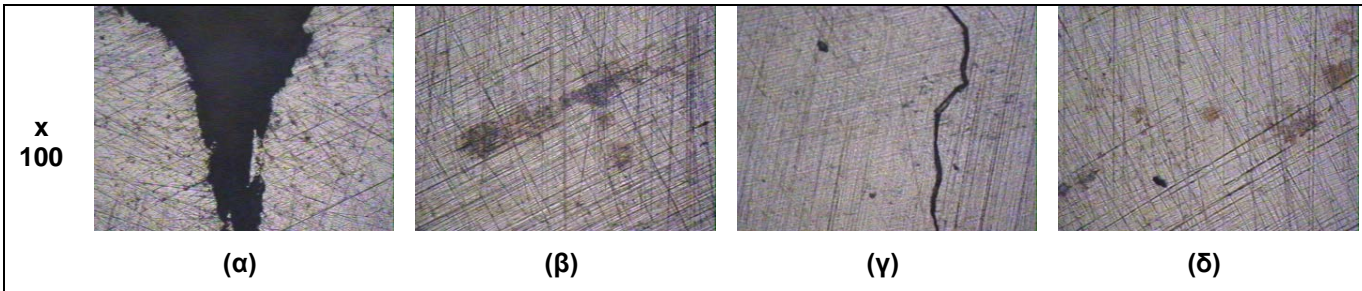




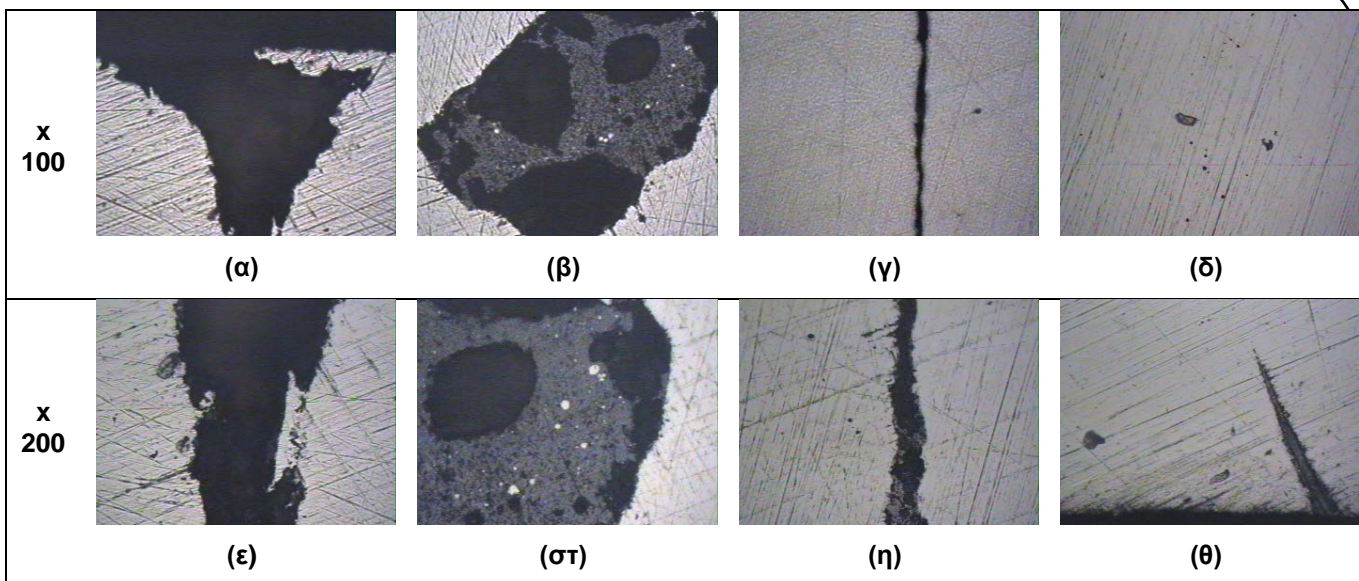
Σχήμα 3.28: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Δ με λείανση με γυαλόχαρτο 320



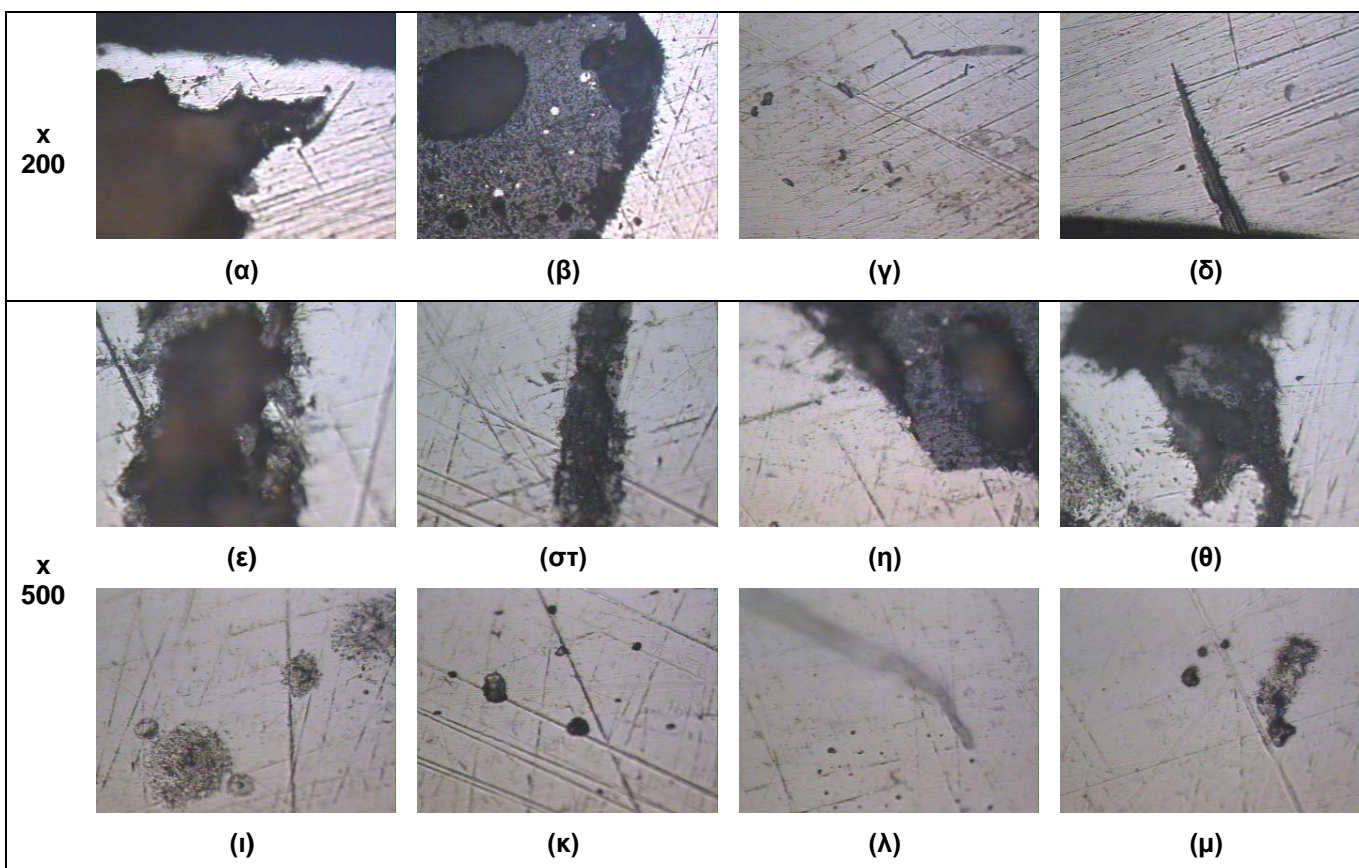
Σχήμα 3.29: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Δ με λείανση με γυαλόχαρτο 500



Σχήμα 3.30: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Δ με λείανση με γυαλόχαρτο 1000



Σχήμα 3.31:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Δ με λείανση με γυαλόχαρτο 2400



Σχήμα 3.32:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Δ με λείανση με γυαλόχαρτο 4000

3.5.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρώντας τις φωτογραφίες του δοκιμίου χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί λείανση μπορούμε να διακρίνουμε την οξειδωση του δοκιμίου με πολλές ατέλειες στην επιφάνεια που καθιστά έντονη την ανάγκη για περαιτέρω λείανση του δοκιμίου για να εξαχθούν περισσότερα αποτελέσματα.

Χρησιμοποιώντας το γυαλόχαρτο πυκνότητας 120 μπορούμε να διακρίνουμε την διαχωριστική επιφάνεια (ραφή) μεταξύ των δύο τμημάτων που έχουν ενωθεί με την κατεργασία της συγκόλλησης. Επίσης, με τη μεγέθυνση 200x παρατηρείται αρκετά καθαρά η δομή του χάλυβα. Στη συνέχεια, με χρήση γυαλόχαρτου πυκνότητας 320 και 500 μπορούμε να παρατηρήσουμε τη ραφή της συγκόλλησης με εμφανή μια παραμόρφωση στην γύρω περιοχή και πιθανή οξειδωση γύρω από το υλικό της συγκόλλησης. Τα παραπάνω στοιχεία γίνονται πιο αισθητά λειαινώντας το δοκίμιο με γυαλόχαρτα πυκνότητας 1000 και 2400 όπου μπορούμε πλέον να παρατηρήσουμε την ραφή της συγκόλλησης με τα φαινόμενα οξειδωσης να ελαττώνονται και την εμφάνιση μιας περιοχής που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελάττωμα της συγκόλλησης από τυχόν διασκορπισμό του υλικού συγκόλλησης κατά την κατεργασία.

Τέλος, πιο εμφανείς παρατηρήσεις μπορούμε να εξάγουμε με τη χρήση του γυαλόχαρτου πυκνότητας 4000 και μεγέθυνση 500x όπου παρατηρούμε καθαρά πλέον να διακρίνουμε τη ραφή της συγκόλλησης και την περιοχή του ελαττώματος που είχε παρατηρηθεί με τη λείανση με γυαλόχαρτο πυκνότητας 1000.

3.6 ΔΟΚΙΜΙΟ Ε

3.6.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Ε είναι δίσκος χάλυβα με επικάλυψη με ψεκασμό πλάσματος και παρουσιάζεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία

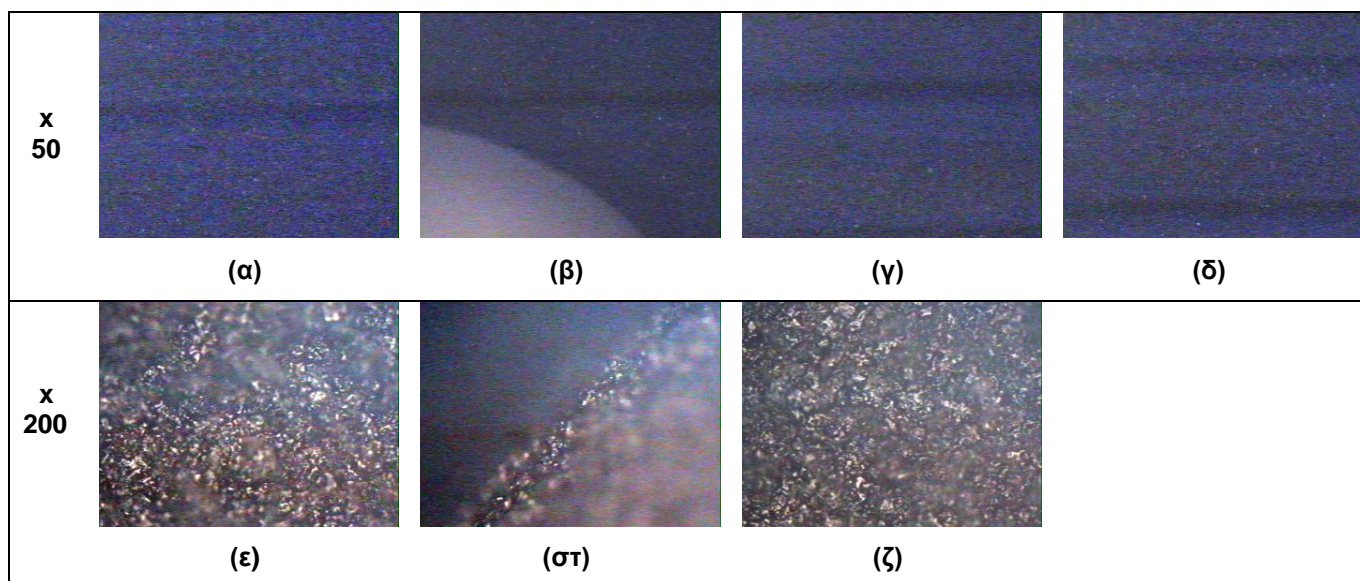


Σχήμα 3.33: Δοκίμιο Ε, δίσκος χάλυβα με επικάλυψη

3.6.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθησαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.6.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.34: Οπτική παρατήρηση δοκίμιου Ε χωρίς λείανση

3.6.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια που δημιουργήθηκε με κατεργασία ψεκασμού πλάσματος. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τις φωτογραφίες μεγέθυνσης 200x, είναι εμφανείς οι κόκκοι με τους οποίους έχει επικαλυφθεί η επιφάνεια του χάλυβα ενώ παρατηρείται αρκετή ομοιογένεια της επικάλυψης.

3.7 ΔΟΚΙΜΙΟ Z

3.7.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Ζ είναι χαλύβδινο δοκίμιο το οποίο έχει οξειδωθεί και παρουσιάζεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

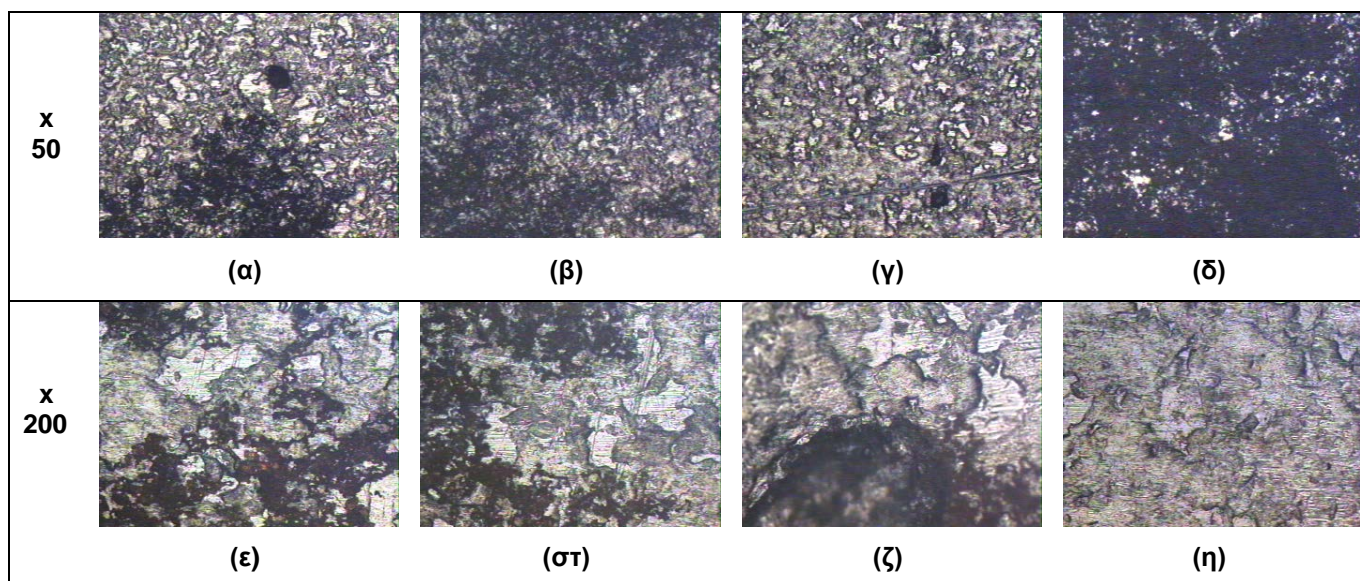


Σχήμα 3.35: Δοκίμιο Ζ οξειδωμένο χαλύβδινο δοκίμιο

3.7.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθηκαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.7.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.36: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Z χωρίς λείανση

3.7.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια του δοκιμίου. Το φαινόμενο που μπορούμε να παρατηρήσουμε στο συγκεκριμένο δοκίμιο είναι η εκτεταμένη οξειδωση που έχει υποστεί και είναι πολύ πιθανό να οφείλεται σε επαφή με οξειδωτικά μέσα και μακροχρόνια επίδραση οξειδωτικού περιβάλλοντος χωρίς καθαρισμού του δοκιμίου. Τόσο στις φωτογραφίες μεγέθυνσης 50x και 200x είναι εμφανής η ανομοιομορφία της επιφάνειας και η αλλοίωση της δομής της επιφάνειας του χάλυβα.

3.8 ΔΟΚΙΜΙΟ Η

3.8.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Η προέρχεται από έλασμα αλουμινίου μετά από διαρροή καταπόνησης σε εφελκυσμό και παρουσιάζεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

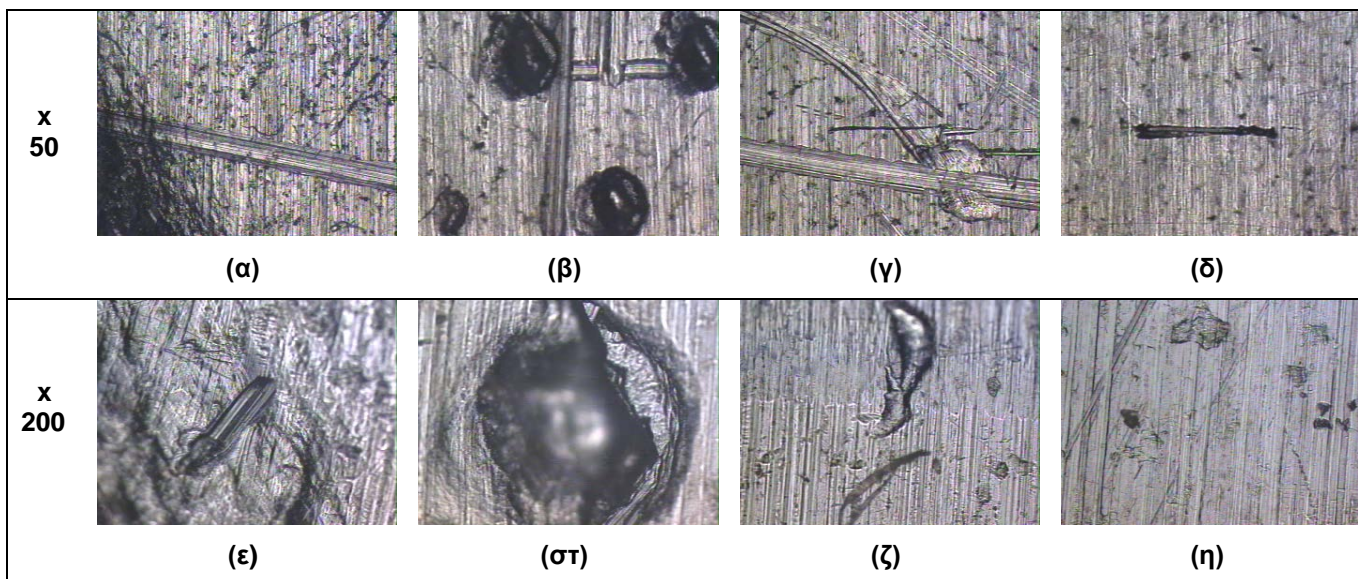


Σχήμα 3.37: Δοκίμιο Η, έλασμα αλουμινίου μετά από αστοχία σε εφελκυσμό

3.8.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθησαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.8.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.38: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Η χωρίς λείανση

3.8.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από τη συγκράτηση του δοκιμίου στις αρπάγες της δοκιμής εφελκυσμού και την αστοχία 45° από την διαρροή καταπόνησης του δοκιμίου του αλουμινίου στο πέρας της συγκεκριμένης δοκιμής. Στις φωτογραφίες που λήφθηκαν με το μικροσκόπιο μπορούν να παρατηρηθούν τόσο οι εσοχές συγκράτησης του δοκιμίου από τις αρπάγες εφελκυσμού όσο και χαρακές και παραμόρφωση στην επιφάνεια του δοκιμίου από τον εφελκυσμό του υλικού.

3.9 ΔΟΚΙΜΙΟ Θ

3.9.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Θπροέρχεται από έλασμα χαλκού μετά από διαρροή καταπόνησης σε εφελκυσμό και παρουσιάζεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

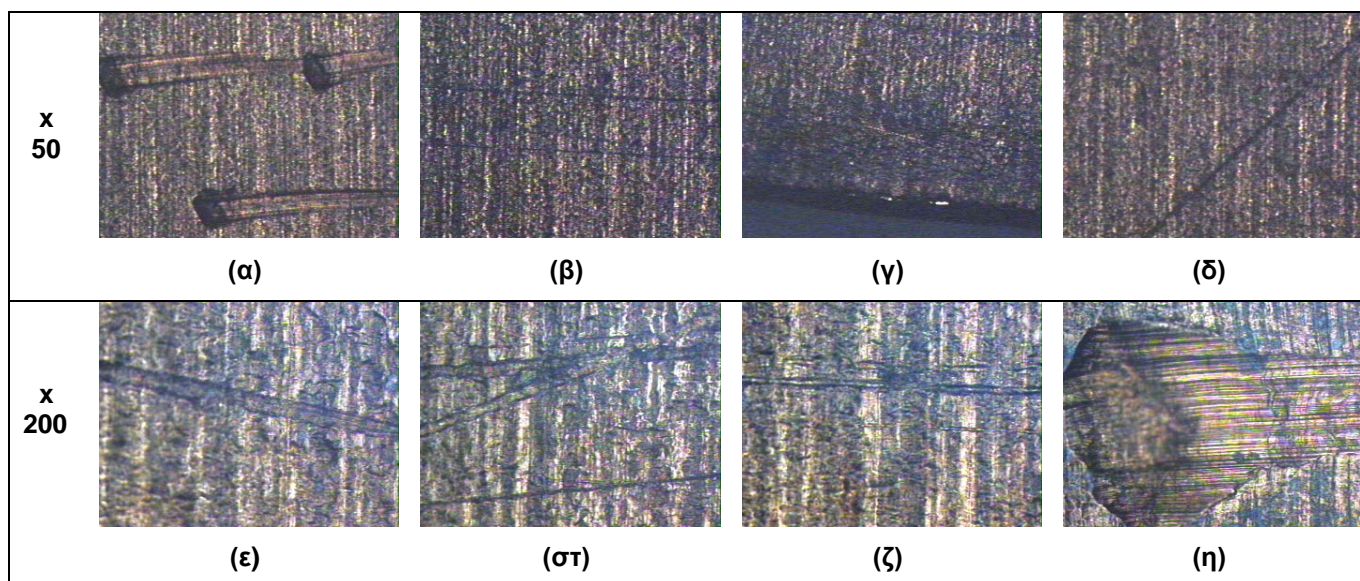


Σχήμα 3.39:Δοκίμιο Θ έλασμα χαλκού μετά από αστοχία σε εφελκυσμό

3.9.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθηκαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.9.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.40: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Θ χωρίς λείανση

3.9.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από τη συγκράτηση του δοκιμίου στις αρπάγες της δοκιμής εφελκυσμού και την αστοχία από την διαρροή καταπόνησης του δοκιμίου του αλουμινίου στο πέρας της συγκεκριμένης δοκιμής. Στις φωτογραφίες που λήφθηκαν με το μικροσκόπιο μπορούν να παρατηρηθούν τόσο οι εσοχές συγκράτησης του δοκιμίου από τις αρπάγες εφελκυσμού που έχουν αλλοιωθεί αρκετά λόγω του εφελκυσμού του υλικού όσο και χαρακές και παραμόρφωση στην επιφάνεια του δοκιμίου από τον εφελκυσμό του υλικού.

3.10 ΔΟΚΙΜΙΟ Ι

3.10.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Ι προέρχεται από μεταλλικό αφρό από αλουμίνιο και παρουσιάζεται χωρίς επιπλέον επεξεργασία.

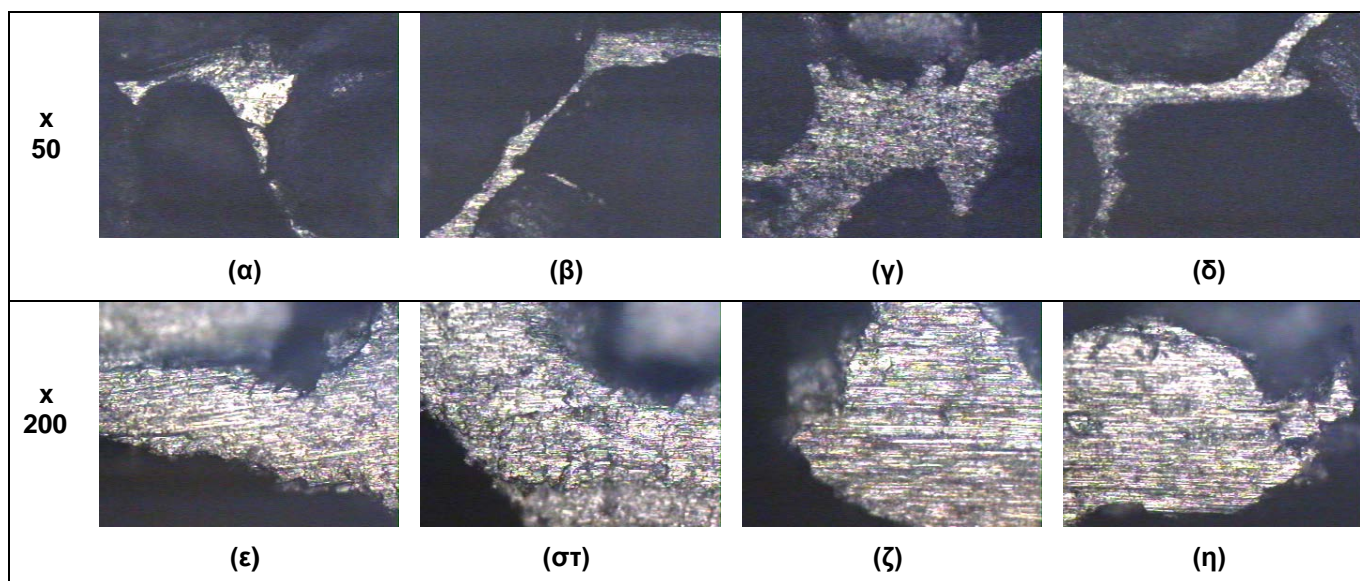


Σχήμα 3.41: Δοκίμιο Ι μεταλλικού αφρού από αλουμίνιο

3.10.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθησαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.10.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.42: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου I χωρίς λείανση

3.10.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από την διαδικασία στερεοποίησης του αφρού αλουμινίου. Από τις φωτογραφίες που λήφθηκαν είναι εμφανείς οι εσοχές στο δοκίμιο κατά τη στερεοποίηση του αφρού που είναι λογικό να υπάρχουν εξαιτίας της μορφής του αφρού και τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα κατά την στερεοποίηση.

3.11 ΔΟΚΙΜΙΟ Κ

3.11.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Κ είναι εγκιβωτισμένος χαλκός και παρουσιάζεται σε εγκάρσια τομή.



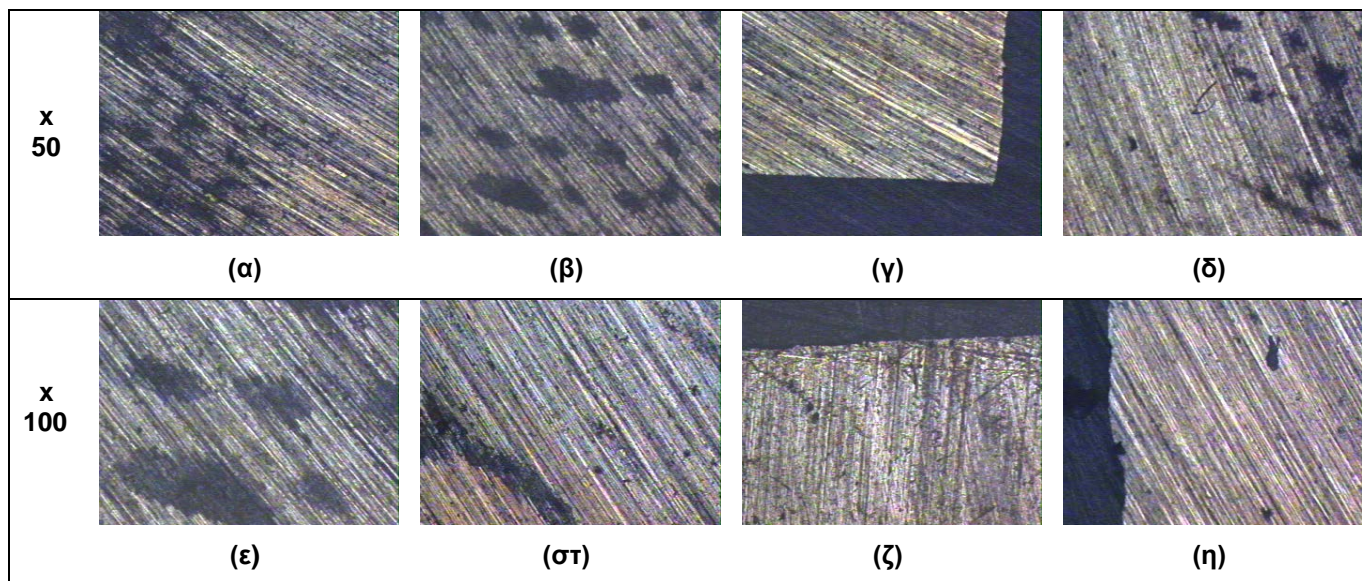
Σχήμα 3.43: Δοκίμιο Κ εγκιβωτισμένου χαλκού σε εγκάρσια τομή

3.11.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

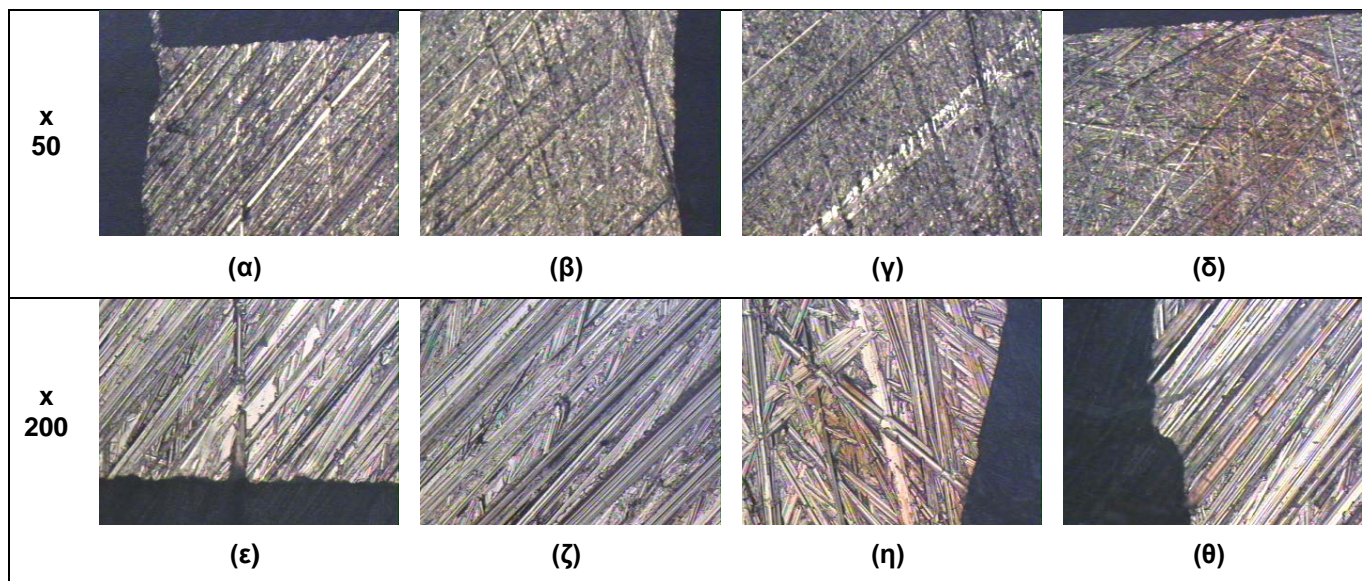
Για την προετοιμασία του δοκιμίου ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

1. Εγκιβωτισμός του δοκιμίου.
2. Λείανση με γυαλόχαρτα 120, 320, 500, 1000, 2400, 4000.

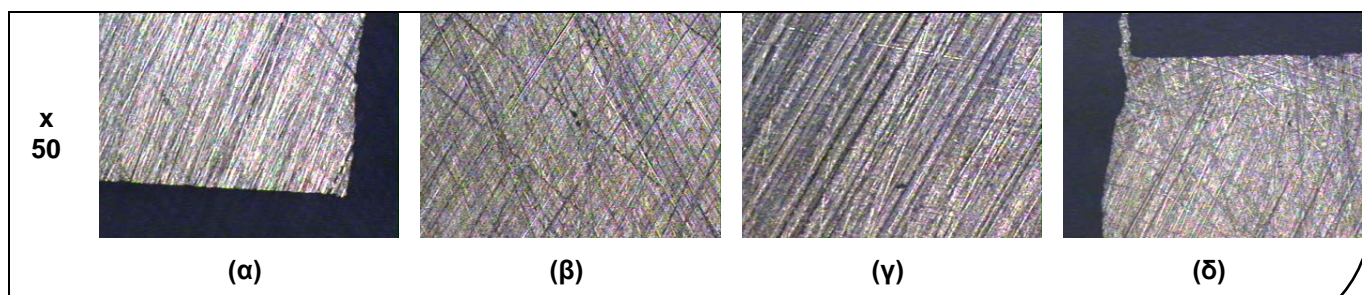
3.11.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

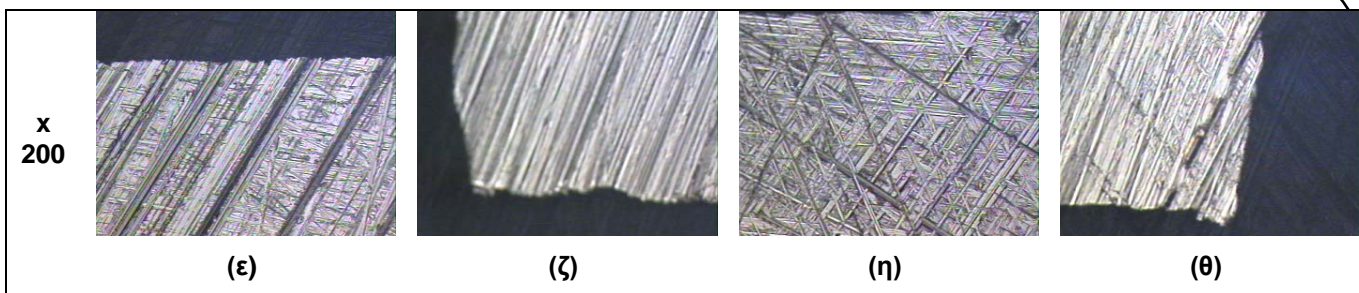


Σχήμα 3.44: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Κ χωρίς λείανση

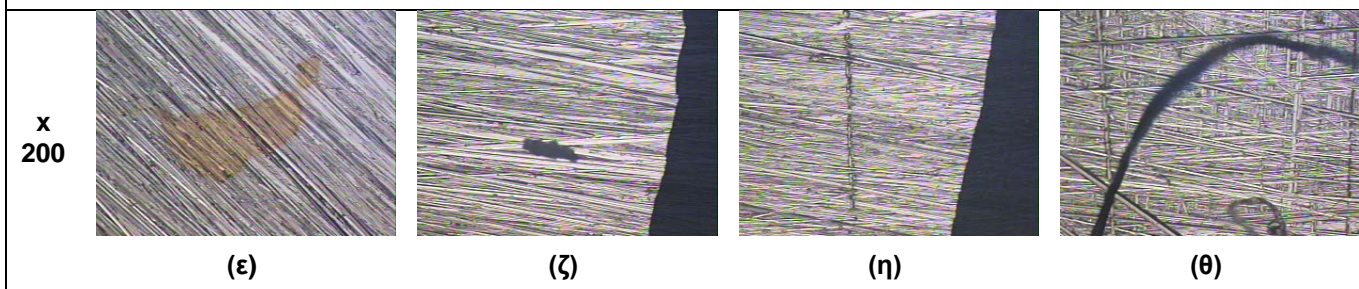
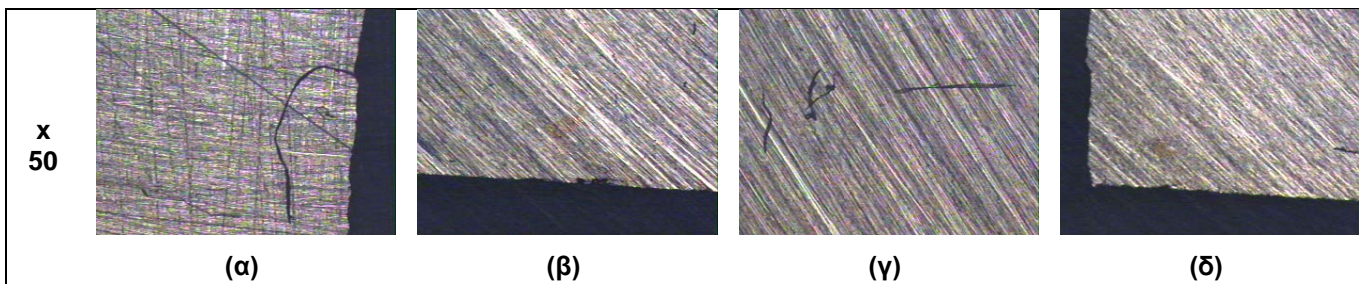


Σχήμα 3.45: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Κ με λείανση με γυαλόχαρτο 120

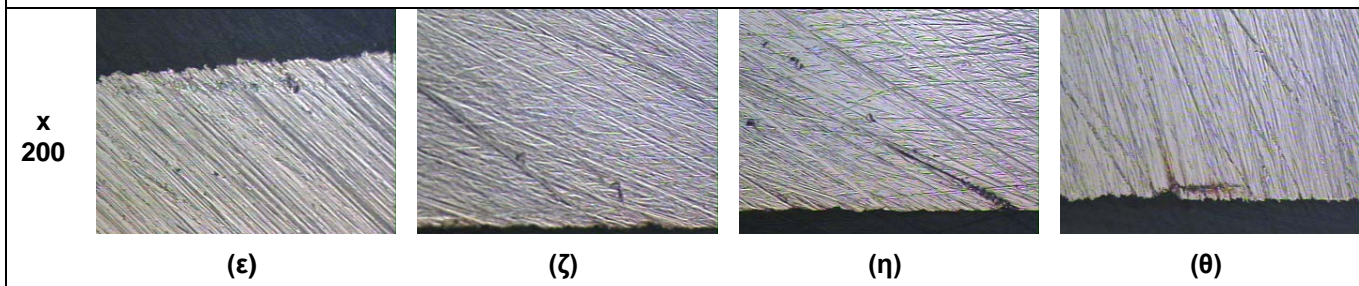
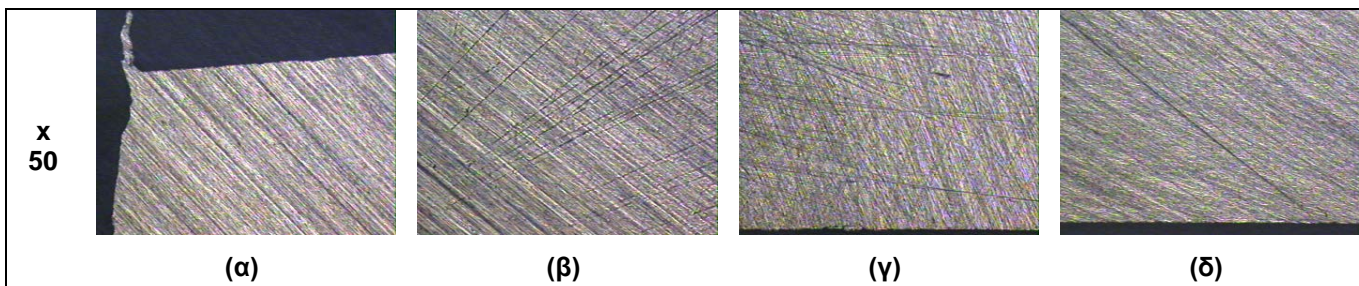




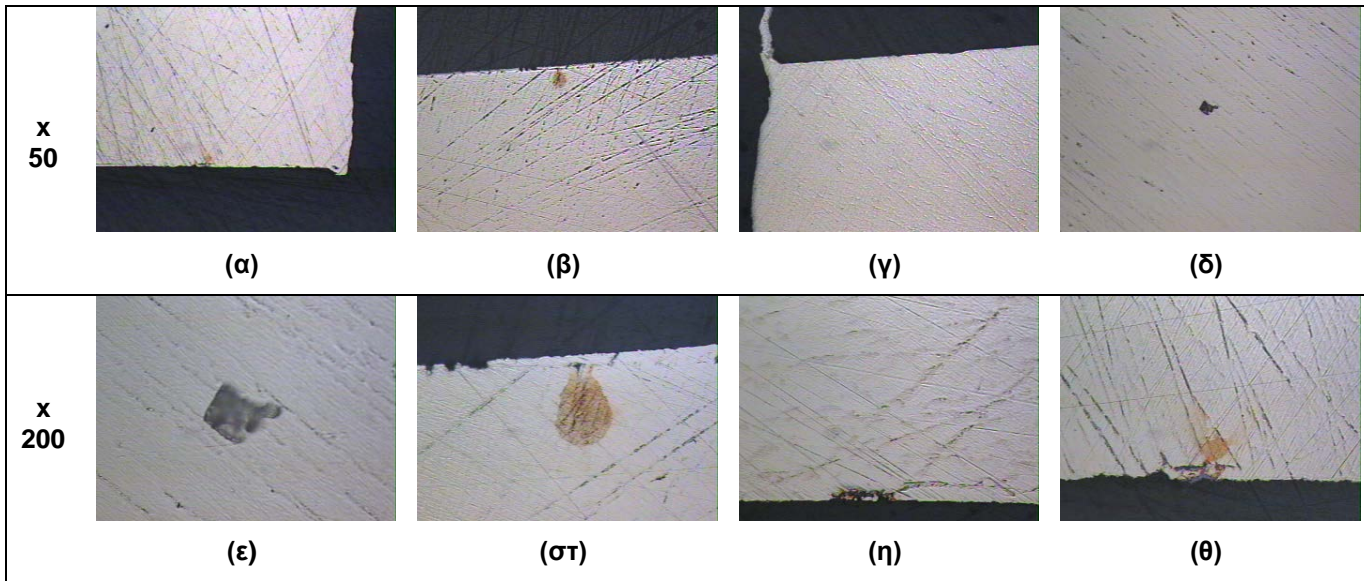
Σχήμα 3.46: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Κ με λείανση με γυαλόχαρτο 320



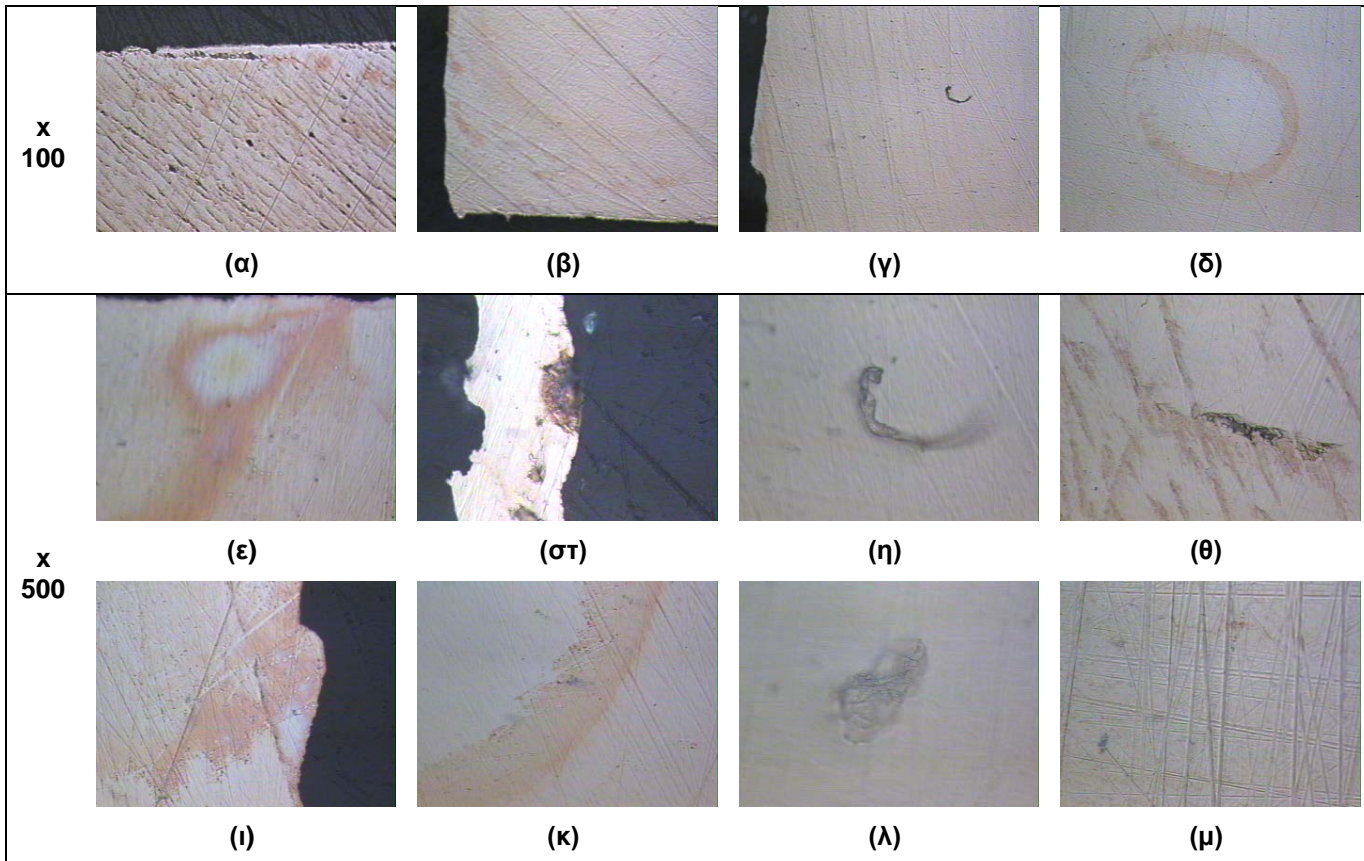
Σχήμα 3.47: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Κ με λείανση με γυαλόχαρτο 500



Σχήμα 3.48: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Κ με λείανση με γυαλόχαρτο 1000



Σχήμα 3.49:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου K με λείανση με γυαλόχαρτο 2400



Σχήμα 3.50:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου K με λείανση με γυαλόχαρτο 4000

3.11.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρώντας τις φωτογραφίες του δοκιμίου χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί λείανση δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συγκεκριμένο συμπέρασμα. Παρατηρούνται πολλές ατέλειες που μπορεί να οφείλονται στον δίσκο κοπής ο οποίος παραμόρφωσε την επιφάνεια.

Χρησιμοποιώντας το γυαλόχαρτο πυκνότητας 120 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι ατέλειες αυτές μειώνονται ενώ φαίνεται πιο καθαρά η δομή του χαλκού. Στη συνέχεια, με χρήση γυαλόχαρτου πυκνότητας 320 και 500 μπορούμε να παρατηρήσουμε πλέον καθαρά τη μικροδομή του δοκιμίου. Τα παραπάνω στοιχεία γίνονται πιο αισθητά λειαινώντας το δοκίμιο με γυαλόχαρτα πυκνότητας 1000 και 2400 όπου μπορούμε πλέον να παρατηρήσουμε την ομοιογένεια του καθαρού χαλκού με εμφανείς κάποιες ατέλειες που οφείλονται σε ειδικές μετρήσεις πάνω στο δοκίμιο, όπως σκληρομέτρηση.

Τέλος, πιο εμφανείς παρατηρήσεις μπορούμε να εξάγουμε με τη χρήση του γυαλόχαρτου πυκνότητας 4000 και μεγέθυνση 500χόπου παρατηρούμε καθαρά πλέον τη δομή του καθαρού χαλκού, αλλά και μία αλλοίωση στο χρώμα της επιφάνειας σε αρκετά σημεία που μπορεί να οφείλεται σε επίδραση κάποιου υδατικού διαλύματος που έφερε το συγκεκριμένο αποτέλεσμα.

3.12 ΔΟΚΙΜΙΟ Λ

3.12.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Λ είναι διμεταλλικό με αλουμίνιο εσωτερικά σε θήκη χαλκού, έχει κατασκευαστεί με την κατεργασία της διέλασης και παρουσιάζεται σε εγκάρσια τομή.



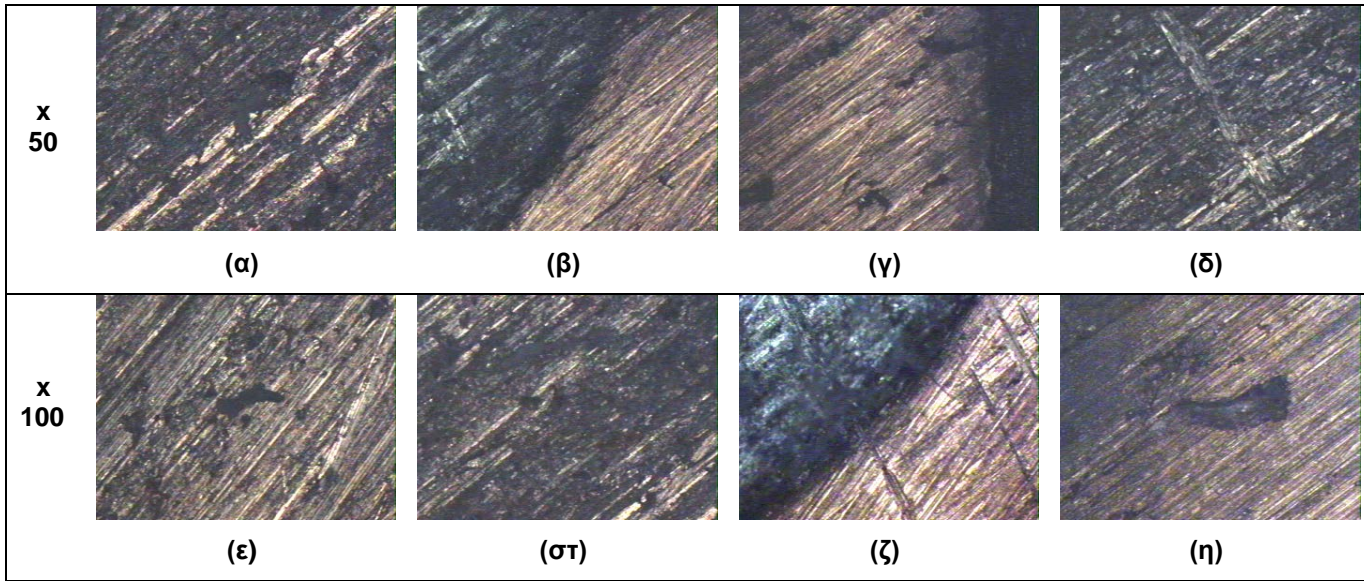
Σχήμα 3.51: Δοκίμιο Λ διμεταλλικό με αλουμίνιο και χαλκό σε εγκάρσια τομή

3.12.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

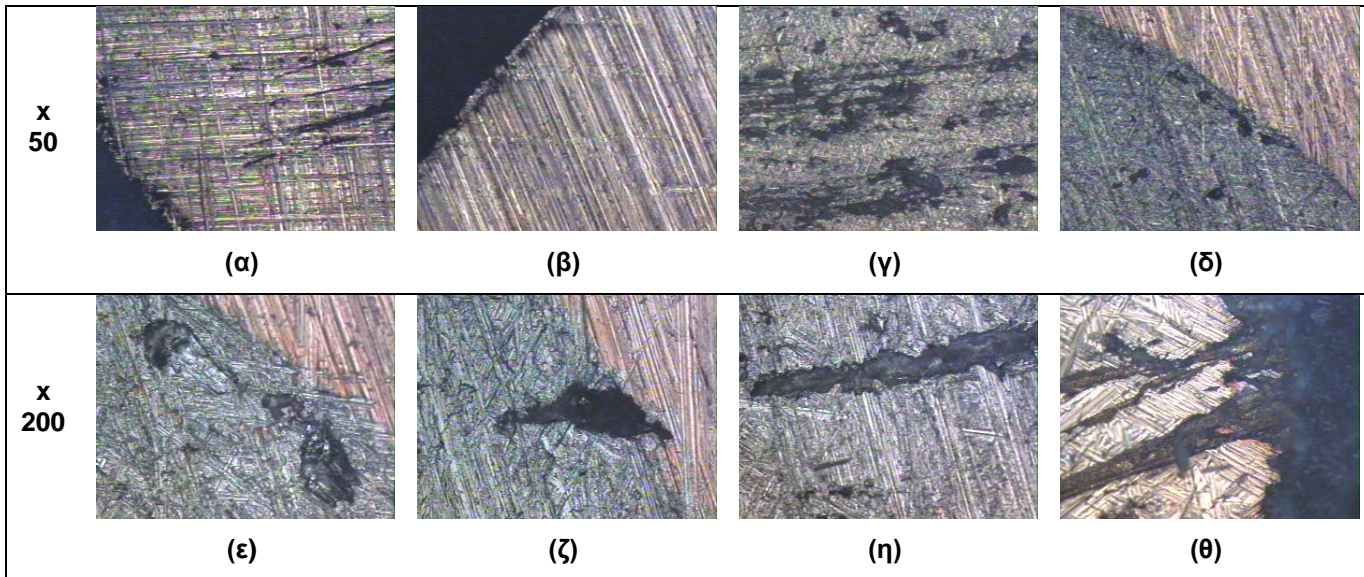
Για την προετοιμασία του δοκιμίου ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

1. Εγκιβωτισμός του δοκιμίου.
2. Λείανση με γυαλόχαρτα 120, 320, 500, 1000, 2400, 4000.

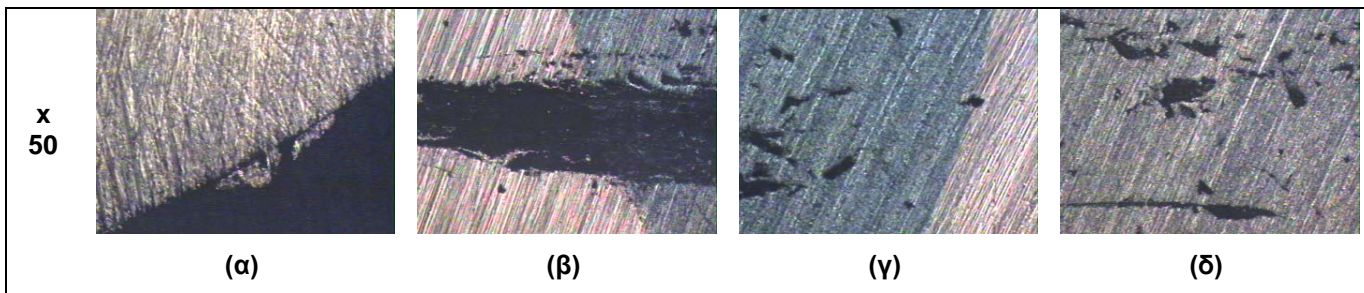
3.12.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

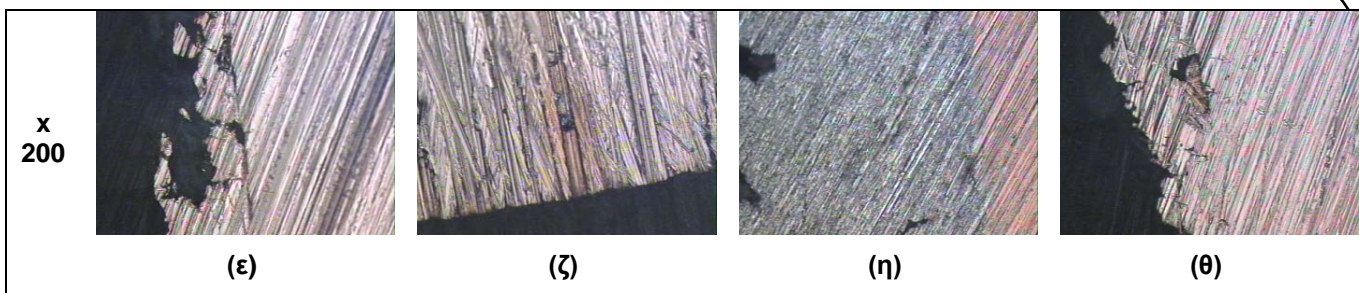


Σχήμα 3.52: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Λ χωρίς λείανση

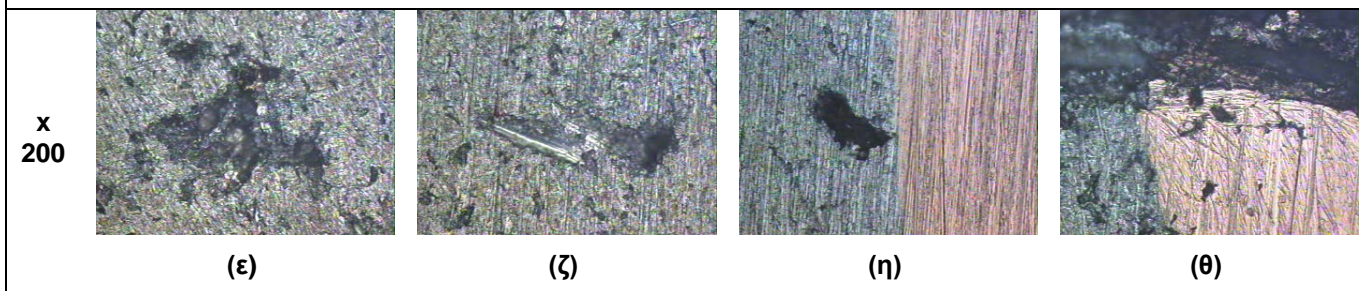
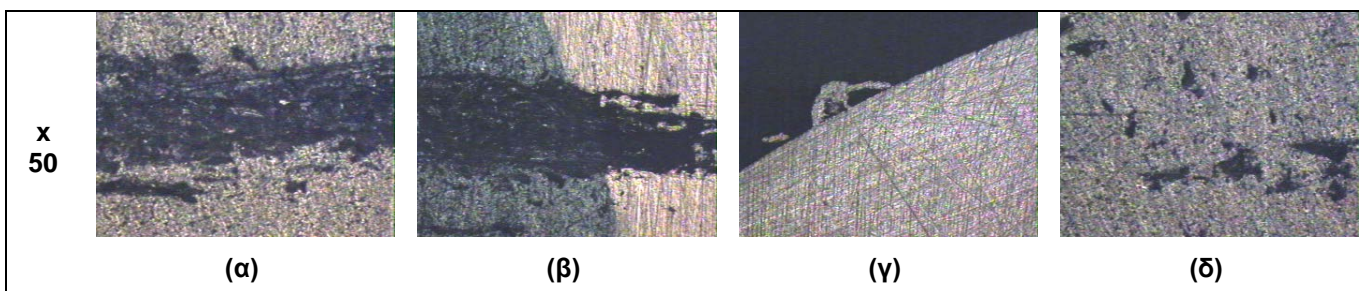


Σχήμα 3.53: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Λ με λείανση με γυαλόχαρτο 120

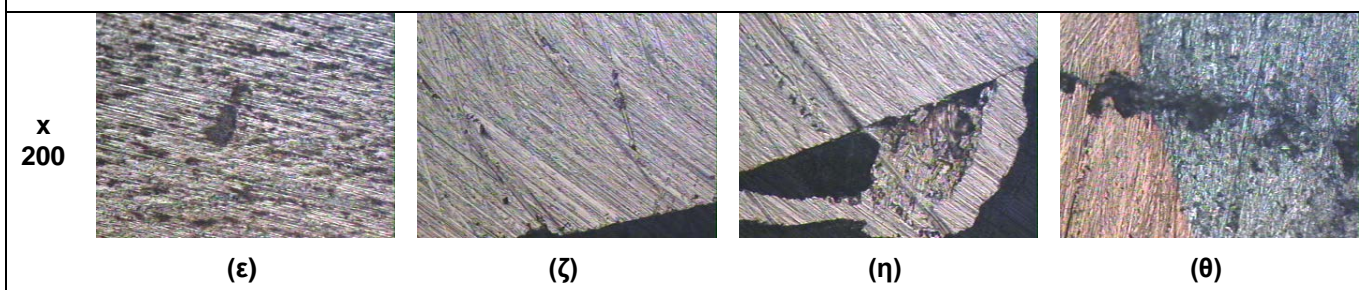
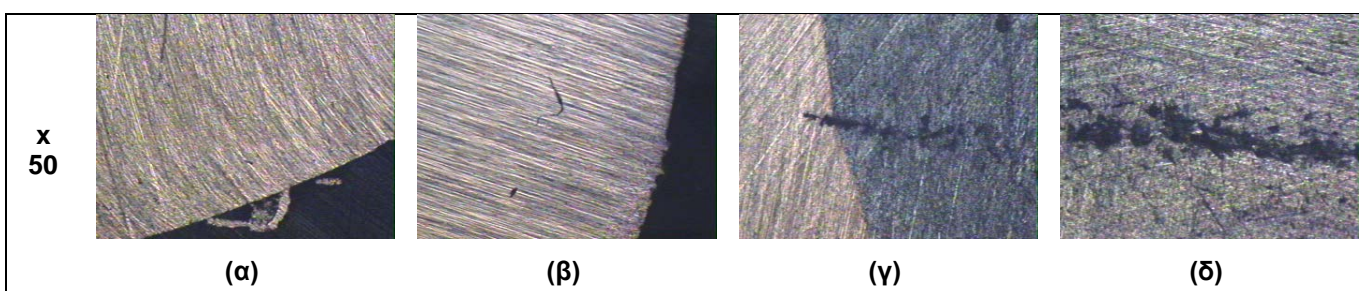




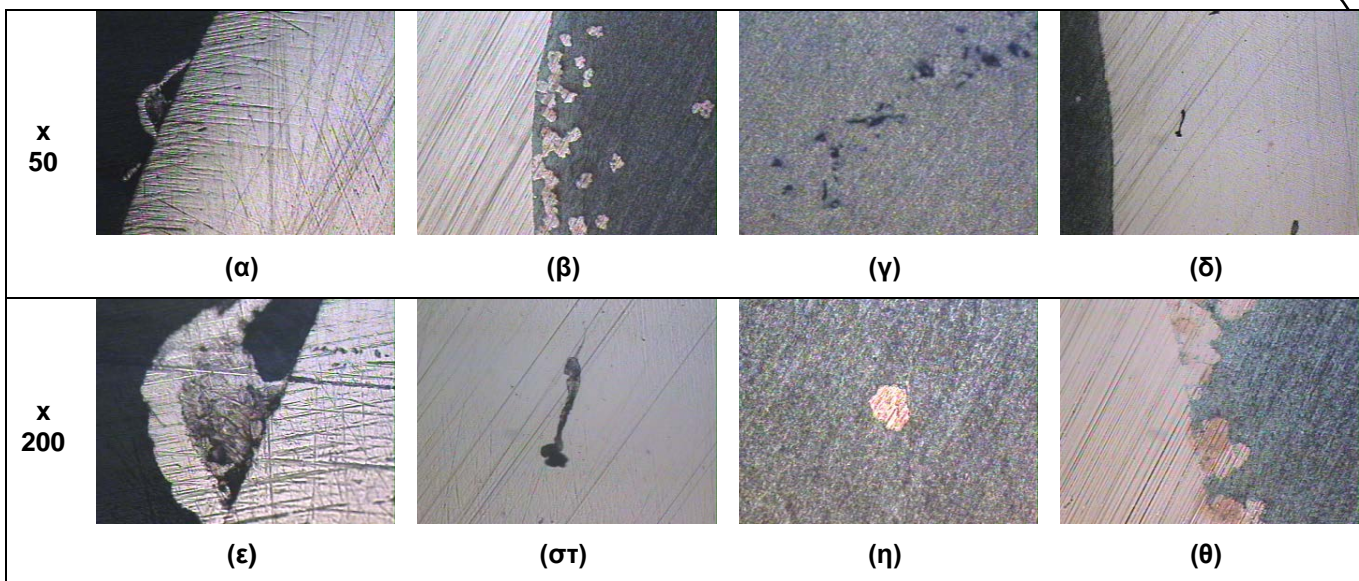
Σχήμα 3.54: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Λ με λείανση με γυαλόχαρτο 320



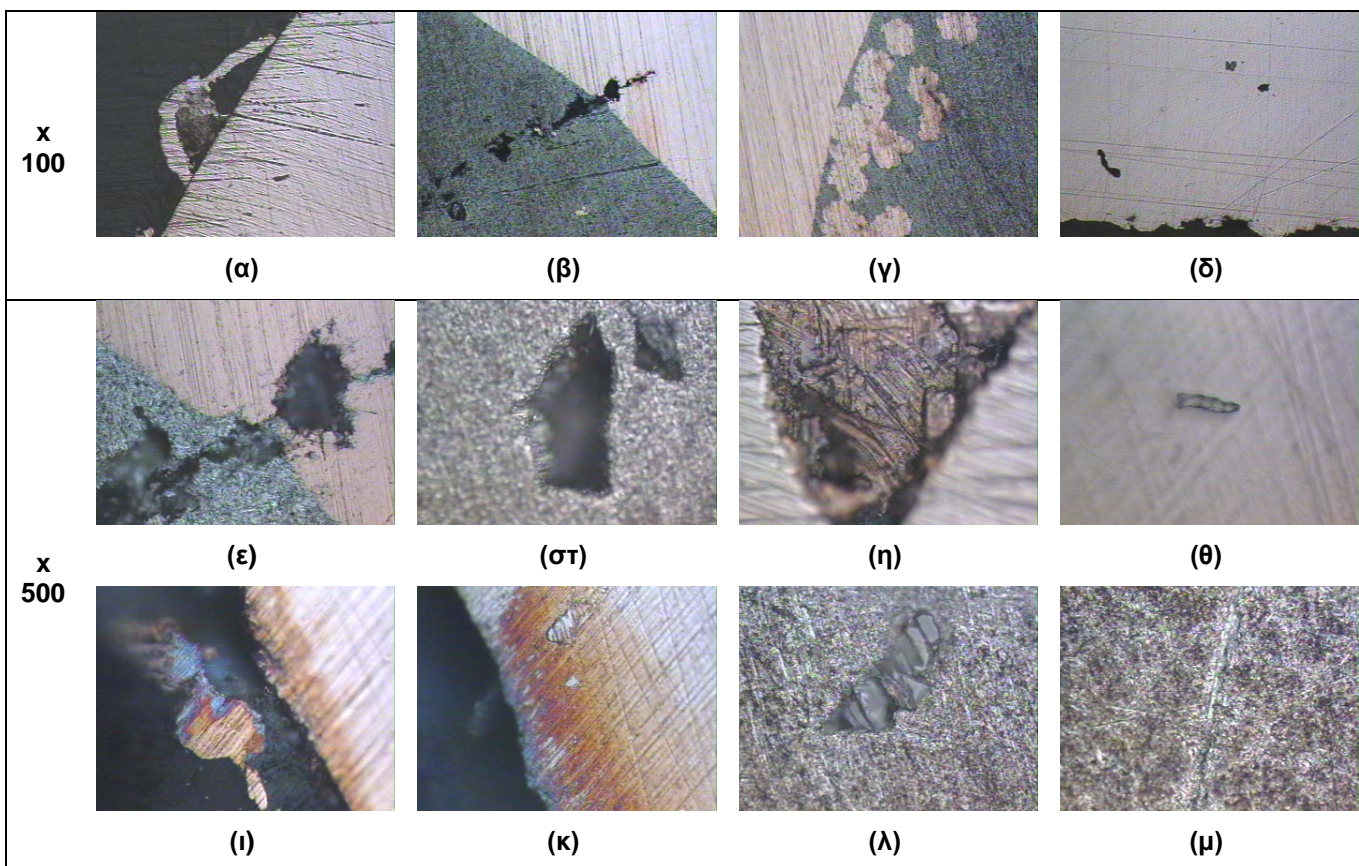
Σχήμα 3.55: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Λ με λείανση με γυαλόχαρτο 500



Σχήμα 3.56: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Λ με λείανση με γυαλόχαρτο 1000



Σχήμα 3.57:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Λ με λείανση με γυαλόχαρτο 2400



Σχήμα 3.58:Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Λ με λείανση με γυαλόχαρτο 4000

3.12.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρώντας τις φωτογραφίες του δοκιμίου χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί λείανση δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συγκεκριμένο συμπέρασμα. Παρατηρούνται πολλές ατέλειες που μπορεί να οφείλονται στον δίσκο κοπής ο οποίος παραμόρφωσε την επιφάνεια και επίδραση της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Χρησιμοποιώντας το γυαλόχαρτο πυκνότητας 120 μπορούμε να διακρίνουμε πιο καθαρά τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών ενώ παράλληλα παρατηρούνται ακόμα ατέλειες στην επιφάνεια. Στη συνέχεια, με χρήση γυαλόχαρτου πυκνότητας 320 και 500 μπορούμε να παρατηρήσουμε πολύ πιο καθαρά τον διαχωριστικό όριο των δύο υλικών. Τα παραπάνω στοιχεία γίνονται πιο αισθητά λειαινοντας το δοκίμιο με γυαλόχαρτα πυκνότητας 1000 και 2400 όπου πλέον δεν υπάρχουν σημάδια κοπής από τον τροχό του εργαστηρίου, με αρκετές αλληλοεπικαλύψεις στην περιοχή όπου ενώνονται τα δύο υλικά πιθανότατα από την λειαντική διαδικασία.

Τέλος, πιο εμφανείς παρατηρήσεις μπορούμε να εξαγάγουμε με τη χρήση του γυαλόχαρτου πυκνότητας 4000 και μεγέθυνση 500χόπου παρατηρούμε καθαρά πλέον τις διαφορετικές επιφάνειες των υλικών, την διαχωριστική επιφάνεια όπου δεν παρατηρείται κάποιο διάκενο αλλά και αρκετά “σπασίματα” στις επιφάνειες και των δύο υλικών που μπορούν να οφείλονται στην παραμόρφωση της δομής τους από το μέγεθος του φορτίου που χρησιμοποιήθηκε για την συμπίεση των δύο υλικών.

3.13 ΔΟΚΙΜΙΟ Μ

3.13.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Μ προέρχεται από μερική πίεση σκόνης χαλκού στα 40 kN και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε πυροσυσσωμάτωση και παρουσιάζεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

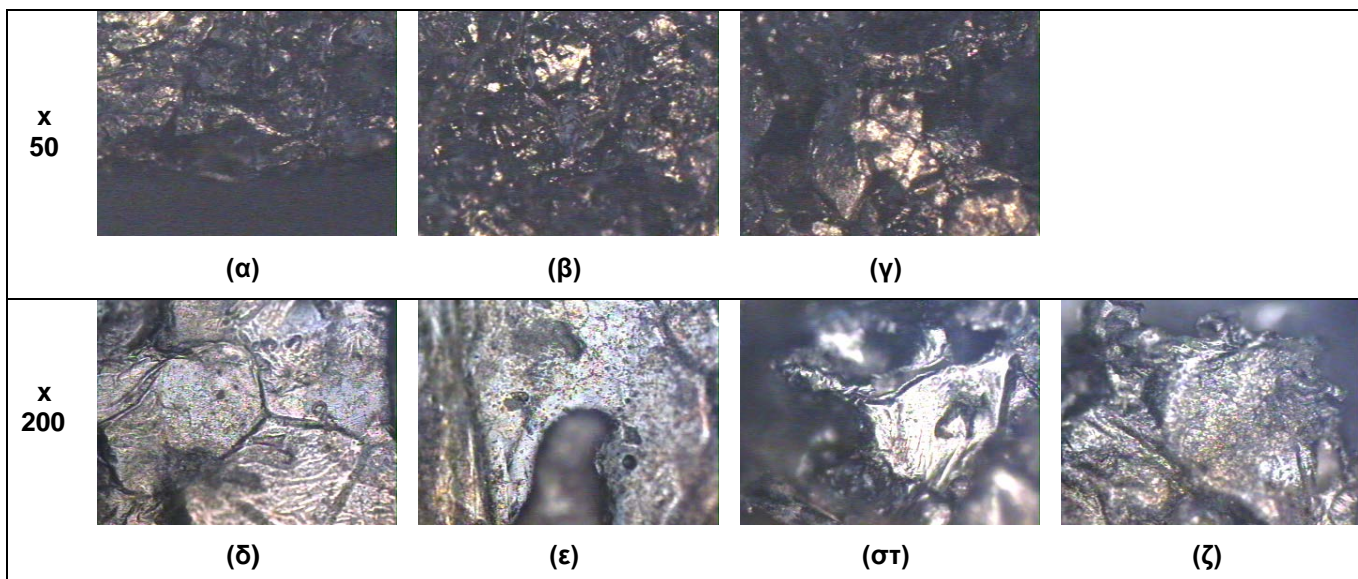


Σχήμα 3.59: Δοκίμιο Μ μερικής πίεσης σκόνης χαλκού στα 40 kN

3.13.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθηκαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.13.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.60: Οπτική παρατήρηση δοκίμιου M χωρίς λείανση

3.13.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από μερική πίεση σκόνης χαλκού με φορτίο 40kN. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε δεν υπάρχει μεγάλη ομοιογένεια στην επιφάνεια, μπορούμε να διακρίνουμε τους κόκκους του χαλκού ιδιαίτερα σε συγκεκριμένα τμήματα που σημαίνει ότι το υλικό δεν έχει συσσωματωθεί σε μεγάλο βαθμό και μπορεί να διασκορπιστεί αρκετά εύκολα με την εφαρμογή μιας μικρής δύναμης.

3.14 ΔΟΚΙΜΙΟ Ν

3.14.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Ν προέρχεται από μερική πίεση σκόνης χαλκού στα 70 kN και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε πυροσυσσωμάτωση και παρουσιάζεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

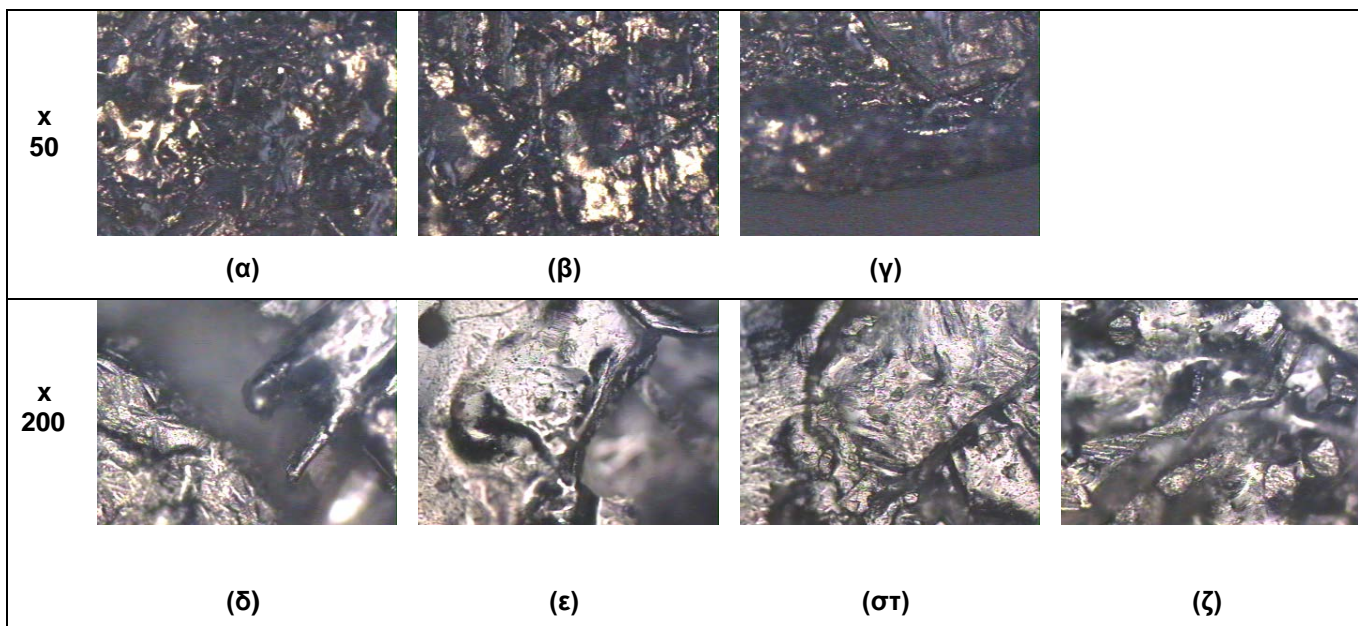


Σχήμα 3.61: Δοκίμιο Ν μερικής πίεσης σκόνης χαλκού στα 70 kN

3.14.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθηκαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.14.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.62: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου N χωρίς λείανση

3.14.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από μερική πίεση σκόνης χαλκού με φορτίο 70kN. Σε σύγκριση με το αντίστοιχο δοκίμιο όπου πραγματοποιήθηκε μερική συμπίεση 40 kN μπορούμε να παρατηρήσουμε μεγαλύτερη ομοιογένεια στην επιφάνεια, όπου ακόμα μπορούμε να διακρίνουμε τους κόκκους του χαλκού αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό, με τα κενά μεταξύ των κόκκων να έχουν σχεδόν εξαλειφθεί. Εδώ η συσσωμάτωση είναι πιο συμπαγής και δίνει ένα αποτέλεσμα πιο ομοιογενές.

3.15 ΔΟΚΙΜΙΟ Ξ

3.15.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Ξπροέρχεται από μερική πίεση σκόνης χαλκού στα 90 kNκαι εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε πυροσυσσωμάτωση και παρουσιάζεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

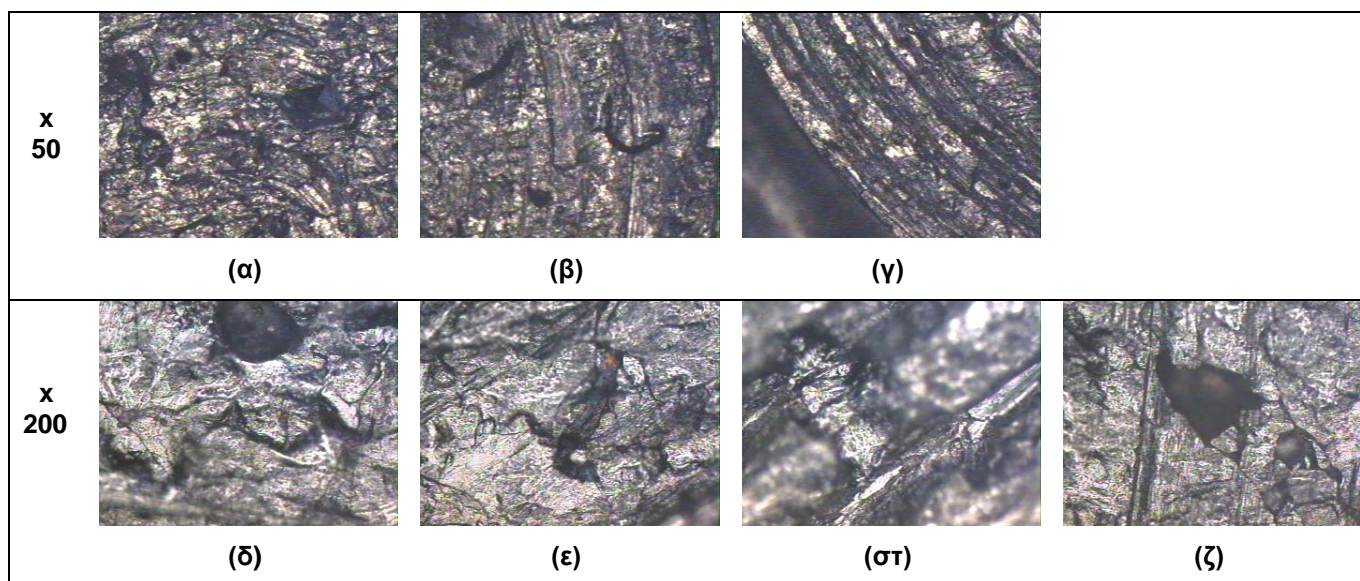


Σχήμα 3.63:Δοκίμιο Ξμερικής πίεσης σκόνης χαλκού στα 90 kN

3.15.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθησαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.15.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.64: Οπτική παρατήρηση δοκίμιου Ξ χωρίς λείανση

3.15.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από μερική πίεση σκόνης χαλκού με φορτίο 90kN. Σε σύγκριση με το αντίστοιχο δοκίμιο όπου πραγματοποιήθηκε μερική συμπίεση 40 kN παρατηρούμε πολύ μεγάλη διαφορά στη μορφή της επιφάνειας, ενώ επίσης και με το δοκίμιο μερικής συμπίεσης στα 70 kN η διαφορά είναι εμφανής. Μπορούμε να παρατηρήσουμε πολύ μεγάλη ομοιογένεια στην επιφάνεια, με τους κόκκους του χαλκού να διακρίνονται με αρκετή δυσκολία και τα κενά να μην είναι πλέον ορατά. Εδώ η συσσωμάτωση είναι πολύ πιο συμπαγής και δίνει ένα αποτέλεσμα πολύ ομοιογενές.

3.16 ΔΟΚΙΜΙΟ Ο

3.16.1 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Το δοκίμιο Ο προέρχεται από εκρηκτική συμπίεση σκόνης αλουμινίου σε χαλύβδινη θήκη και παρουσιάζεται σε εγκάρσια τομή.

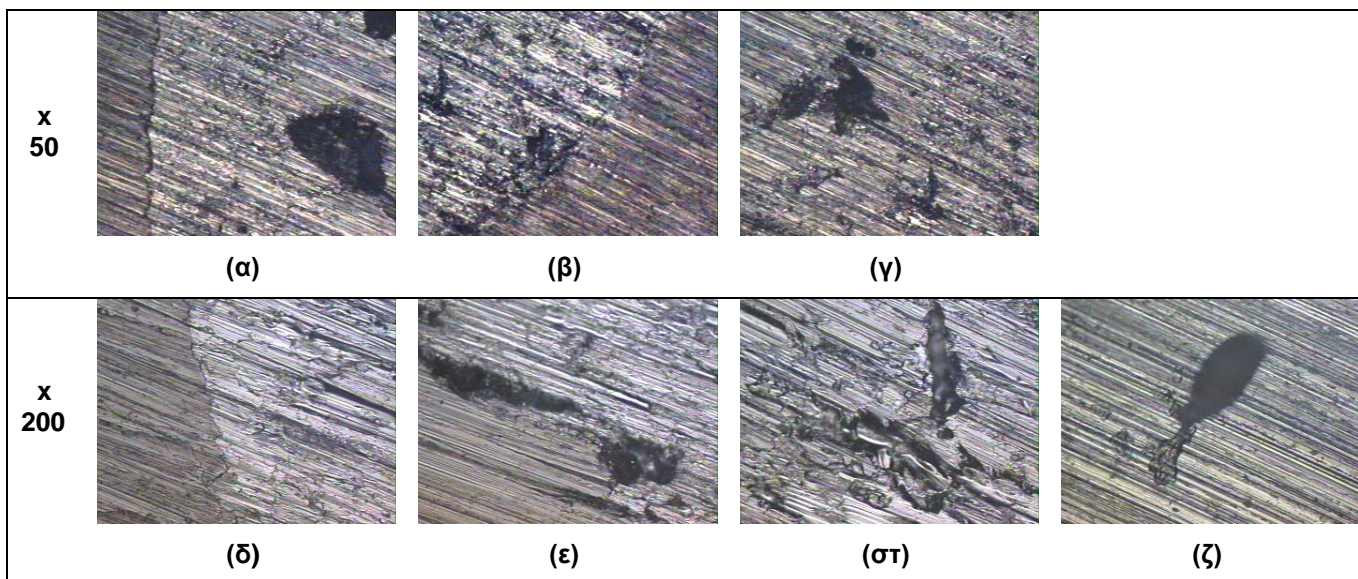


Σχήμα 3.65: Δοκίμιο Ο εκρηκτικής συμπίεσης σε εγκάρσια τομή

3.16.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να μην αλλοιωθεί η δομή του δοκιμίου δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία και προετοιμασία του δοκιμίου και απλά λήφθηκαν φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο.

3.16.3 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ



Σχήμα 3.66: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου Ο χωρίς λείανση

3.16.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν πραγματοποιήθηκε λείανση αλλά παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο με μεγέθυνση 50x και 200x για να μην αλλοιωθεί η επιφάνεια που δημιουργήθηκε από εκρηκτική συμπίεση σκόνης αλουμινίου σε χαλύβδινη θήκη. Όπως είναι λογικό παρατηρούνται στην επιφάνεια αρκετές χαρακές από την κοπή του δοκιμίου στον δίσκο κοπής του εργαστηρίου, είναι εμφανής η διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών και αρκετές αποκολλήσεις από την επιφάνεια του αλουμινίου που πιθανότατα προκλήθηκε από την κοπή του κομματιού και την αδυναμία τέλει συσσωμάτωσης των κόκκων του αλουμινίου από την κατεργασία της εκρηκτικής συμπίεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στη συνέχεια, τα δοκίμια που παρατηρήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία κατηγοριοποιούνται για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ως προς τις ατέλειες που έχουν εμφανίσει και την εφαρμογή τεχνικών ελάττωσης τους ή αποφυγής τους. Οι κατηγορίες στις οποίες θα χωρίσουμε τα δοκίμια είναι οι εξής:

1. Δοκίμια εκρηκτικής συμπίεσης
2. Δοκίμια κονιομεταλλουργίας
3. Δοκίμια καθαρών μετάλλων
4. Διμεταλλικά δοκίμια
5. Δοκίμια με επικάλυψη
6. Δοκίμια από μεταλλικό αφρό
7. Δοκίμια συγκόλλησης

4.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Τα δοκίμια εκρηκτικής συμπίεσης που εξετάστηκαν στη παρούσα εργασία ήταν τα δοκίμια Α, Β και Ο. Τα βασικότερα σημεία που παρατηρήθηκαν από την οπτική παρατήρηση των δοκιμίων ήταν οι αρκετές αποκολλήσεις του συμπιεσμένου υλικού από την επιφάνεια του δοκιμίου οι οποίες μπορεί να οφείλονται είτε στην διαδικασία της κοπής με τον τροχό του εργαστηρίου, είτε στη διαδικασία της λείανσης που έχει την τάση να αφαιρεί κόκκους από την επιφάνεια αλλά και να αναμιγνύει τα υλικά ιδιαίτερα στην διαχωριστική επιφάνεια των υλικών, είτε φυσικά στο ποσοστό επιτυχίας της κατεργασίας της εκρηκτικής συμπίεσης. Επίσης παρατηρήθηκαν αρκετές οξειδώσεις στις χαλύβδινες θήκες λόγω έκθεσης του δοκιμίου στο περιβάλλον και άμεσης επαφής με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητο τα προς εξέταση δοκίμια να αποθηκεύονται σε ειδικό μη οξειδωτικό χώρο για να αποφεύγονται τέτοιου είδους ατέλειες όπως στα δοκίμια που παρατηρήθηκαν. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα χημικό αντιδραστήριο χημικής προσβολής αντιοξειδωτικής δράσης του εργαστηρίου.



Σχήμα 4.1: Χημικό αντιδραστήριο αντιοξειδωτικής δράσης του εργαστηρίου

4.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

Τα δοκίμια κονιομεταλλουργίας που εξετάσθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν τα δοκίμια Γ, Μ, Ν και Ξ. Στο δοκίμιο Γ πραγματοποιήθηκε συμπίεση σκόνης χαλκού σε δίσκο ενώ στα δοκίμια Μ, Ν και Ξ πραγματοποιήθηκε συμπίεση σκόνης (φολίδες)χαλκού με διάφορα φορτία. Σε όλες τις περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε πυροσυσσωμάτωση με την κατεργασία της συμπίεσης. Το δοκίμιο Γ είναι πιο ομοιογενές και συμπαγές, πράγμα που οφείλεται στο μέγεθος των κόκκων και το φορτίο συμπίεσης που εφαρμόστηκε. Από την άλλη, για τη συμπίεση των δοκιμίων Μ, Ν, και Ξ χρησιμοποιήθηκε χοντρόκοκκη σκόνη χάλυβα (φολίδες) και εφαρμόστηκαν 3 φορτία πίεσης: 40 kN, 70 kN και 90 kN. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, αυξάνοντας το φορτίο συμπίεσης έχουμε καλύτερο αποτέλεσμα ομοιογένειας και σύσφιξης του δοκιμίου ενώ τα διάκενα μεταξύ των κόκκων ελαχιστοποιούνται.

4.4 ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΑΘΑΡΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Τα δοκίμια καθαρών μετάλλων που εξετάσθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν τα δοκίμια Ζ, Η, Θ και Κ. Το δοκίμιο Ζ είναι χαλύβδινο και είναι εμφανής η οξειδωση του μετά από μακροχρόνια παραμονή σε οξειδωτικό μέσο. Τα δοκίμια Η και Θ προέρχονται από διαρροή δοκιμής εφελκυσμού και αποτελούνται από αλουμίνιο και χαλκό αντίστοιχα. Είναι εμφανείς οι εσοχές από τις αρπάγες συγκράτησης και στα δύο δοκίμια καθώς και αρκετές χαρακές που οφείλονται στην μεγάλη παραμόρφωση του δοκιμίου. Τέλος, το δοκίμιο Κ είναι από καθαρό χαλκό ο οποίος παρουσιάζεται σε τομή όπου διακρίνεται καθαρά η δομή του και κάποιες ατέλειες στην επιφάνεια από προηγούμενη επεξεργασία που έχει δεχτεί.

4.5 ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Το διμεταλλικό δοκίμιο που εξετάσθηκε στην παρούσα εργασία ήταν το δοκίμιο Λ. Τα δύο υλικά που αποτελούν το δοκίμιο αλουμίνιο που προστέθηκε με χύτευση μέσα σε θήκη χαλκού. Από την οπτική παρατήρηση διακρίναμε τις διαφορετικές επιφάνειες των υλικών, την διαχωριστική επιφάνεια όπου δεν παρατηρείται κάποιο διάκενο αλλά και αρκετά “σπασίματα” στις επιφάνειες και των δύο υλικών που μπορούν να οφείλονται στην παραμόρφωση της δομής τους από το μέγεθος του φορτίου που χρησιμοποιήθηκε για την συμπίεση των δύο υλικών. Τα δοκίμια προήλθε από διέλαση όπου οι συνθήκες κατεργασίας είναι πολύ σημαντικές για το αποτέλεσμα δημιουργίας του διμεταλλικού υλικού.

4.6 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

Το δοκίμιο με επικάλυψη που εξετάσθηκε στη παρούσα εργασία είναι το δοκίμιο Ε. Από την οπτική παρατήρηση διακρίναμε τους κόκκους με τους οποίους έχει επικαλυφθεί η επιφάνεια του χάλυβα ενώ παρατηρείται αρκετή ομοιογένεια της επικάλυψης. Η διαδικασία έχει πραγματοποιηθεί με την συσκευή ψεκασμού πλάσματος του εργαστηρίου όπου χρησιμοποιείται σκόνη τιτανίας και οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη (απόσταση πιστολιού, ρεύμα δημιουργίας φλόγας, ποσότητα σκόνης) είναι καθοριστικοί.

4.7 ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΠΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΑΦΡΟ

Το δοκίμιο που προήλθε από μεταλλικό αφρό στη παρούσα εργασία είναι το δοκίμιο Ι. Από την οπτική παρατήρηση διακρίναμε τις εσοχές κατά τη στερεοποίηση του αφρού που είναι λογικό να υπάρχουν εξαιτίας της μορφής του αφρού και τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα κατά την στερεοποίηση.

4.8 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Το δοκίμιο συγκόλλησης που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία είναι το δοκίμιο Δ από χάλυβα. Από την οπτική παρατήρηση διακρίναμε την ραφή της συγκόλλησης με αρκετά φαινόμενα οξειδωσης στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και μια περιοχή που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελάττωμα της συγκόλλησης από τυχόν διασκορπισμό του υλικού συγκόλλησης κατά την κατεργασία. Για τον περιορισμό της οξειδωσης είναι απαραίτητη η χρήση αντιδραστηρίου κατά την αποθήκευση, όπως στο σχήμα 4.1. Για τυχόν ατέλειες που οφείλονται στην κατεργασία της συγκόλλησης βασικός παράγοντας είναι η δημιουργία ιδανικού τόξου συγκόλλησης ανάλογα με τη σύσταση του υλικού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**Π.1 ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. H.C. Sorby, in *How to Work with the Microscope*, London, 1867
2. C.S. Smith, *A History of Metallography*, University of Chicago Press, 1960
3. H.C. Sorby, *J. Iron Steel Inst.*, Vol 28, 1886, p 140
4. B.L. Bramfitt and A.O. Benscoter, *Metallographer's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*, ASM International, 2002, p 88
5. H. Wedding, *J. Iron Steel Inst.*, Vol 27, 1885, p 187
6. L.E. Samuels, *Metallographic Polishing by Mechanical Means*, 4th ed., ASM International, 2003, p 6
7. J.R. Vilella, *Metallographic Techniques for Steels*, American Society for Metals, 1938
8. M.R. Louthan, Jr., *Optical Metallography, Materials Characterization*, Vol 10, ASM Handbook, American Society for Metals, 1986, p 299–308
9. W.T. Becker, *Fracture Appearance and Mechanisms of Deformation and Fracture, Failure Analysis and Prevention*, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, 2002, p 559–586
10. R.W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 4th ed., John Wiley, 1996
11. R.A. Lund and S. Sheybany, *Fatigue Fracture Appearances, Failure Analysis and Prevention*, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, 2002, p 627–640
12. *Fatigue Failures, Failure Analysis and Prevention*, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, 2002, p 708
13. G.F. Vander Voort, *Metallographic Techniques in Failure Analysis, Failure Analysis and Prevention*, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, 2002, p 498–510
14. G.F. Vander Voort, *The SEM as a Metallographic Tool, Applied Metallography*, Van Nostrand Reinhold Co., 1986, p 139–170
15. C.A. Zapffe and M. Clogg, *Trans. ASM*, Vol 34, 1945, p 71–107
16. K. Kornfeld, *Met. Prog.*, Vol 77, Jan 1960, p 131–132
17. P.J.E. Forsyth and D.A. Ryder, *Metallurgia*, March 1961, p 117–124
18. K.R.L. Thompson and A.J. Sedriks, *J. Aust. Inst. Met.*, Vol 9, Nov 1964, p 269–271
19. H.C. Rogers, *Trans. AIME*, Vol 218, June 1960, p 498–506
20. C. Laird and G.C. Smith, *Philos. Mag.*, Vol 7, 1962, p 847–857

21. R.H. Van Stone and T.B. Box, "Use of Fractography and Sectioning Techniques to Study Fracture Mechanisms," STP 600, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 1976, p 5–29
22. W. Staehle et al., Corrosion, Vol 15, July 1959, p 51–59 (373t–381t)
23. D. Eylon and W.R. Kerr, "Fractographic and Metallographic Morphology of Fatigue Initiation Sites," STP 645, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 1978, p 235–248
24. W.R. Kerr et al., Metall. Trans., Vol 7A, Sept 1976, p 1477–1480
25. W.T. Shieh, Metall. Trans., Vol 5, May 1974, p 1069–1085
26. J.R. Pickens and J. Gurland, Metallographic Characterization of Fracture Surface Profiles on Sectioning Planes, Proc. Fourth International Congress for Stereology, NBS Spec. Publ. 431, 1976, p 269–272
27. E. Rabinowicz, Met. Ind., Vol 76, 3 Feb 1950, p 83–86
28. L.E. Samuels, Metallurgia, Vol 51, March 1955, p 161–162
29. M.H. Hurdus, "Taper Sectioning of Tubular Specimens and Its Application to Corrosion Oxide Film Examination," Report AERE-R9704, U.K. Atomic Energy Authority, Harwell, Oct 1980
30. S.M. El-Soudani, Metallography, Vol 11, July 1978, p 247–336
31. E.E. Underwood and E.A. Starke, Jr., "Quantitative Stereological Methods for Analyzing Important Features in Fatigue of Metals and Alloys," STP 675, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 1979, p 633–682
32. E.E. Underwood and S.B. Chakraborty, "Quantitative Fractography of a Fatigued Ti-28V Alloy," STP 733, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 1981, p 337–354
33. M. Coster and J.L. Chermant, Int. Met. Rev., Vol 28, 1983, p 228–250
34. E.E. Underwood, Quantitative Fractography, Applied Metallography, Van Nostrand Reinhold, 1986, p 101–122
35. E.E. Underwood, "Practical Solutions to Stereological Problems," STP 839, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 1984, p 160–179
36. D.W. Hetzner, Applications, Chapter 8 in Practical Guide to Image Analysis, ASM International, p 203–256
37. G.F. Vander Voort, Image Analysis, Materials Characterization, Volume 10, ASM Handbook, American Society for Metals, 1986, p 309–322
38. C. Fisher, The Quantimet: Setting the Threshold and the Correction of Off-Set Threshold Error, Pract. Metallogr., Vol 6, Nov 1969, p 659–672

Π.2 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

39. Δ. Ε. Μανωλάκος, “Εκπαιδευτικό Υλικό από το μάθημα Κατεργασίες Ι”, Αθήνα 2010
40. Α.Γ. Μάμαλης, “Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: Μη συμβατικές κατεργασίες” Αθήνα 1996
41. Δ. Ι. Παντελής, “Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά”, Αθήνα 2008
42. Α. Γ. Μάμαλης, “Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά”, Αθήνα 2009
43. Α. Γ. Μάμαλης, “Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Δυναμικές Καταπονήσεις”, Αθήνα 2009

Π.3 ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

44. <https://www.google.com/>
45. <https://www.wikipedia.org>
46. <https://www.matweb.com>