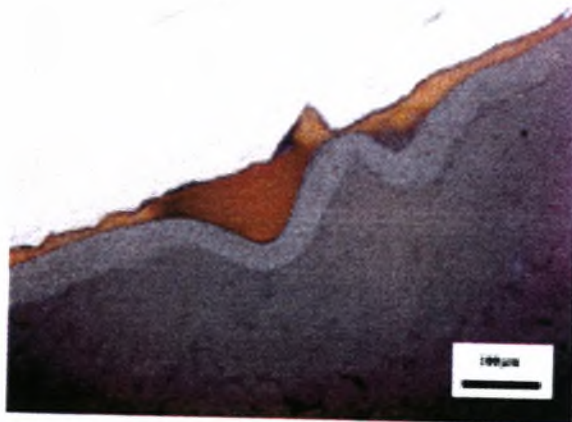


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ-ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΛΑΙΟΥ ΧΑΛΥΒΑ  
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ**



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: ΚΑΠΤΣΙΑΝΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: κ. ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΧΑΪΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας  
**ΒΟΛΟΣ 2004**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	3938/1
Ημερ. Εισ.:	30-09-2004
Δωρεά:	Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜΒ
	2004
	ΚΑΠ

### **Ευχαριστίες**

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γρηγόριο Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμον στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Νικόλαο Χασιώτη και Αντώνιο Κατσαμά για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Άννα Ζερβάκη για την πολύτιμη βοήθεια της και συμπαράστασης της κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και την κύρια Ελένη Καμούτση. Ευχαριστώ τη φίλη και συνάδελφό μου Δήμητρα Βασιλειάδου για την ηθική υποστήριξή της. Επίσης, ευχαριστώ τους Αργυρώ και Αχιλλέα Τσαρδακά για την πολύτιμη βοήθεια τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου . Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμον στους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Μπαζιανή Καπτσιανού ,στην αδερφή μου Ιωάννα και τη γιαγιά μου Δήμητρα για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου.

Δήμητρα Καπτσιανού

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη αστοχίας των υλικών αποτελεί ένα πεδίο έρευνας για τους μηχανικούς και τους μεταλλουργούς. Ο προσδιορισμός της αιτίας αστοχίας και η διορθωτική δράση που ακολουθεί συμβάλλει στην αποφυγή παρόμοιων αστοχιών και επομένως στην αποφυγή ατυχημάτων αλλά και στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της κατασκευής που μελετάται. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μια εισαγωγή στην ανάλυση αστοχιών, μια παρουσίαση και ομαδοποίηση των μελετών αστοχίας που έχουν διεξαχθεί από το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας καθώς και μελέτη παλαιού χάλυβα κατασκευής γεφυρών.

Αρχικά πραγματοποιείται μια εισαγωγή στην ανάλυση αστοχιών που περιλαμβάνει τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της αιτίας αστοχίας και ακολουθεί η παρουσίαση των μελετών αστοχίας που έχουν διεξαχθεί από το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας καθώς και η ομαδοποίηση τους σύμφωνα με την αιτία αστοχίας.

Τέλος περιλαμβάνεται η μελέτη παλιού χάλυβα κατασκευής γεφυρών και ακολουθεί η αποτίμηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων κόπωσης σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 3 που περιλαμβάνει ένα σύνολο από κριτήρια για το κατασκευαστικό και το γεωτεχνικό σχεδιασμό των κτηρίων και των έργων της πολιτικής μηχανικής και εφαρμόζεται στο σχεδιασμό των κτηρίων και των έργων των πολιτικών μηχανικών που πρόκειται να κατασκευαστούν με χάλυβα. Καλύπτει τις απαιτήσεις για αντοχή και χρησιμότητα των κατασκευών.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των μεθόδων ανάλυσης αστοχιών και μια γενική παρουσίαση της ανάλυσης αστοχιών.

### 1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

Μια έρευνα αστοχίας και διαδοχική μελέτη θα πρέπει να προσδιορίζει την κύρια αιτία μιας αστοχίας και βασιζόμενη στον προσδιορισμό και διορθωτική δράση θα πρέπει να ξεκινήσει η οποία θα αποτρέψει παρόμοιες αστοχίες. Συχνά η σημασία συντελεστικών αιτιών σε μια αστοχία θα πρέπει να αποτιμάται, νέες πειραματικές τεχνικές θα πρέπει ίσως να αναπτυχθούν ή ένα άγνωστο πεδίο μηχανικής ή επιστήμης να εξερευνηθεί. Μια σύνθετη μελέτη ατυχήματος, όπως μια μελέτη αεροπορικού ατυχήματος, συνήθως απαιτεί τις υπηρεσίες ειδικών από διάφορους τομείς της μηχανικής και των φυσικών επιστημών, όπως η μεταλλουργία.

### 1.2 ΣΤΑΔΙΑ ΜΙΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Αν και η σειρά είναι ένα θέμα που ποικίλλει, εξαρτώμενο από τη φύση της εκάστοτε αστοχίας, τα κύρια στάδια που συνθέτουν μια έρευνα και μελέτη μιας αστοχίας είναι:

- Συλλογή δεδομένων και επιλογή δοκιμών
- Προκαταρκτική εξέταση του αστοχούντος μέρους (οπτική εξέταση και κράτηση αρχείου)
- Μη καταστροφικός έλεγχος
- Μηχανολογικός έλεγχος (που περιλαμβάνει έλεγχο σκληρότητας και ανθεκτικότητας)
- Συλλογή, αναγνώριση, διατήρηση και ή καθαρισμός όλων των δειγμάτων
- Μακροσκοπική εξέταση και ανάλυση (επιφανειών θραύσης, δευτερεύουσων ρωγμών και άλλων επιφανειακών φαινομένων)
- Μικροσκοπική εξέταση και ανάλυση
- Συλλογή και προετοιμασία των μεταλλογραφικών δοκιμών
- Εξέταση και ανάλυση των μεταλλογραφικών δοκιμών
- Προσδιορισμός του μηχανισμού αστοχίας
- Χημικές αναλύσεις
- Ανάλυση του μηχανισμού της θραύσης
- Έλεγχος κάτω από συνθήκες προσομοίωσης λειτουργίας (ειδικά τεστ)
- Ανάλυση όλων των στοιχείων, διατύπωση των συμπερασμάτων και καταγραφή της έκθεσης (συμπεριλαμβανομένων και των συστάσεων)

### 1.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Αρχικά η μελέτη αστοχίας θα πρέπει να κατευθυνθεί με σκοπό να αποκτηθεί μια εξοικείωση με τις λεπτομέρειες που σχετίζονται με την αστοχία συλλέγοντας τις διαθέσιμες πληροφορίες όσον αφορά την κατασκευή, εξέλιξη και ιστορία λειτουργίας του εξαρτήματος ή της κατασκευής που έχει υποστεί αστοχία και ανακατασκευάζοντας τη σειρά των γεγονότων που οδήγησαν σε αστοχία όσο αυτό είναι δυνατόν. Η συλλογή των δεδομένων για την κατασκευή του εξαρτήματος πρέπει να αρχίσει με την αποκόμιση λεπτομερειών και σκαριφημάτων και να περιλαμβάνει όλες τις όψεις του σχεδίου του εξαρτήματος.

ενός πλήρους ιστορικού λειτουργίας απλοποιεί την αποστολή του αναλυτή. Κατά τη συλλογή των δεδομένων του ιστορικού λειτουργίας ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στις περιβαντολογικές λεπτομέρειες όπως η κανονική και μη κανονική φόρτιση, τυχαίες υπερφορτίσεις, κυκλικές φορτίσεις, μεταβολές στην πίεση και τη θερμοκρασία και λειτουργίας σε διαβρωτικό περιβάλλον συμπεριλαμβανομένης της συγκέντρωσης και/ ή της ροής ενός υγρού περιβάλλοντος.

**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ.** Ο αναλυτής θα πρέπει να αποφασίσει εάν οι φωτογραφίες του εξαρτήματος ή της κατασκευής είναι απαραίτητες. Σε ορισμένες περιπτώσεις το διαθέσιμο φωτογραφικό υλικό μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμο.

**Η ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ** πρέπει να γίνεται πριν την έναρξη της εξέτασης, ειδικά αν η έρευνα πρόκειται να είναι εκτενής και σύνθετη. Όπως και με τις φωτογραφίες, ο αναλυτής είναι υπεύθυνος για το αν τα δείγματα είναι κατάλληλα για το συγκεκριμένο σκοπό και για το αν αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά της αστοχίας επαρκώς.

**ΜΗ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.** Επιπρόσθετα για την ανάπτυξη ενός γενικού ιστορικού του αστοχούντος εξαρτήματος ή κατασκευής θα ήταν χρήσιμο να διευκρινιστεί αν επικράτησαν κάποιες μη κανονικές συνθήκες ή αν συνέβη κάτι κατά τη διάρκεια της λειτουργίας το οποίο ίσως να έχει συμβάλλει στην αιτία της αστοχίας και να προσδιοριστεί αν κάποιες πρόσφατες επισκευές έχουν διεξαχθεί και γιατί.

#### **1.4 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΟΥ ΑΣΤΟΧΟΥΝΤΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ**

Το τμήμα που έχει αστοχήσει, συμπεριλαμβανόμενων όλων των τεμαχίων του, θα πρέπει να υποβληθεί σε μια λεπτομερή οπτική εξέταση πριν λάβει μέρος οποιοσδήποτε καθαρισμός. Υπολείμματα και θραύσματα που τυχόν βρεθούν στο κομμάτι συχνά παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες που επαληθεύουν το αίτιο της αστοχίας ή καθορίζουν τη σειρά των γεγονότων που οδήγησαν στην αστοχία.

**ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ.** Η προκαταρκτική εξέταση θα πρέπει να αρχίσει με οπτική επιθεώρηση. Το χωρίς βοήθεια μάτι έχει εξαιρετική ικανότητα να εστιάζει και έχει την ικανότητα να εξετάζει γρήγορα μεγάλες περιοχές και να εντοπίζει λεπτές αλλαγές στο χρώμα και την υφή.

**ΦΩΤΟΓΡΑΦΩΝΤΑΣ ΘΡΑΥΣΕΙΣ.** Όπου συμπεριλαμβάνονται θραύσεις, το επόμενο βήμα στην προκαταρκτική εξέταση πρέπει να είναι μια φωτογράφιση όλου του σπασμένου τμήματος γενικά, η οποία θα συμπεριλαμβάνει και σπασμένα κομμάτια, με σκοπό την καταγραφή του μεγέθους και της κατάστασης και για να δειχθεί πως η θραύση σχετίζεται με τα εξαρτήματα του τμήματος που εξετάζεται. Αυτή θα πρέπει να ακολουθείται από προσεκτική εξέταση της επιφάνειας θραύσης σε διαφορετικές γωνίες και μεγεθύνσεις.

#### **1.5 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ**

Αρκετοί μη καταστροφικοί έλεγχοι είναι εξαιρετικά χρήσιμοι στην εξέταση και ανάλυση μιας αστοχίας και ειδικότερα η μαγνητο-μοριακή επιθεώρηση των σιδηρούχων μετάλλων, υγρό-διεισδυτική επιθεώρηση, η υπερηχητική επιθεώρηση και η αυτεπαγωγική επιθεώρηση των υλικών που άγουν ηλεκτρισμό. Όλοι αυτοί οι έλεγχοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό επιφανειακών ρωγμών και ασυνεχειών. Άλλα μη καταστροφικά τεστ που χρησιμοποιούνται είναι η ραδιογραφία

(κυρίως για εσωτερική εξέταση), η ακουστικό- εκπομπή επιθεώρηση και πειραματική ανάλυση τάσεων (για τον προσδιορισμό μηχανικών φορτίων και συνισταμένων τάσεων που μπορούν να προκαλέσουν αστοχία).

*Η μαγνητο-μοριακή επιθεώρηση χρησιμοποιεί μαγνητικά πεδία για τον εντοπισμό επιφανειακών και υποεπιφανειακών ασυνεχειών στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Όταν το υλικό ή το τμήμα που εξετάζεται είναι μαγνητισμένο, ασυνέχειες που κείτονται γενικά κάθετες στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου θα προκαλέσουν ένα πεδίο διαρροής που θα σχηματιστεί πάνω στην επιφάνεια του τμήματος.*

Τα πλεονεκτήματα της μαγνητο-μοριακής επιθεώρησης είναι:

- ◆ Είναι η καλύτερη και πιο αξιόπιστη μέθοδος για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών, ειδικά των πιο λεπτών και ρηχών ρωγμών καθώς και εκείνων που καλύπτονται με ξένη ύλη
- ◆ Οι τεχνικές της είναι εύκολες όσο αφορά την κατανόηση και η διαδικασία είναι γρήγορη, απλή και ανέξοδη κατά τη διεξαγωγή της.
- ◆ Οι ενδείξεις παράγονται απευθείας στην επιφάνεια του τμήματος και είναι μια μαγνητική εικόνα της πραγματικής ασυνέχειας. Δεν υπάρχει ηλεκτρικό κύκλωμα ή ηλεκτρονική συσκευή ένδειξης πληροφοριών η οποία να απαιτεί ρύθμιση ή να πρέπει να διατηρείται σε κατάλληλη κατάσταση λειτουργίας
- ◆ Υπάρχει μικρός ή καθόλου περιορισμός στο μέγεθος ή στο σχήμα του τμήματος που εξετάζεται
- ◆ Συνήθως δεν είναι απαραίτητος λεπτομερής καθαρισμός και η διαδικασία θα προχωρήσει σωστά διαμέσου ενός λεπτού στρώματος μπογιάς ή άλλων μη μεταλλικών καλυμμάτων

Τα μειονεκτήματα της μαγνητο-μοριακής επιθεώρησης είναι:

- ❖ Δεν είναι απολύτως αξιόπιστη στον εντοπισμό ασυνεχειών που κείτονται εξ ολοκλήρου κάτω από την επιφάνεια
- ❖ Το μαγνητικό πεδίο πρέπει να είναι στην κατεύθυνση που θα εμποδίζει το κύριο επίπεδο της ασυνέχειας
- ❖ Απαιτείται προσοχή ώστε να αποφεύγεται τοπική θέρμανση και κάψιμο των επιφανειών στα σημεία της ηλεκτρικής επαφής

*Η υγρό-διδεισδυτική επιθεώρηση χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ελαττωμάτων στα υλικά. Χρησιμοποιείται κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά, στα μη μαγνητικά υλικά στα οποία η μαγνητο-μοριακή μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Η τεχνική της υγρό-διδεισδυτικής περιλαμβάνει τον ψεκασμό του υγρού διεισδυτικού πάνω στο δοκίμιο. Το υγρό διεισδύει στις μικρές ρωγμές (τόσο λεπτές όσο 1μm) στην επιφάνεια του δοκιμίου και έχουμε τη μορφή τριχοειδούς αγγείου. Το επιπλέον υγρό σκουπίζεται από την επιφάνεια και ένα εμφανιστικό υγρό εφαρμόζεται που αναγκάζει το υγρό να απομακρυνθεί από τις ρωγμές ή τα διάφορα ελαττώματα που είναι ανοιχτά στην επιφάνεια. Το υγρό έχει συνήθως ένα ζωηρό χρώμα ή περιέχει φωσφορίζοντα στοιχεία τα οποία κάτω από υπεριώδη ακτινοβολία αναγκάζουν τις ασυνέχειες που υπάρχουν στο υλικό να εμφανιστούν.*

Τα κύρια πλεονεκτήματα της υγρο- διεισδυτικής μεθόδου είναι η ικανότητα της να χρησιμοποιείται σε μη μαγνητικά υλικά, το χαμηλό της κόστος, η ικανότητα της να μεταφέρεται και η ευκολία με την οποία μπορούν να ερμηνευτούν τα αποτελέσματά της.



Τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Οι ασυνέχειες πρέπει να είναι ανοιχτές στην επιφάνεια
- Τα δοκίμια θα πρέπει να καθαρίζονται πριν και μετά τη μέθοδο γιατί το διεσδυτικό υγρό μπορεί να διαβρώσει το μέταλλο
- Επιφανειακά καλύμματα μπορεί να εμποδίσουν τον προσδιορισμό των ασυνεχειών
- Η μέθοδος γενικά δεν ενδείκνυται για τον έλεγχο πορωδών υλικών

*Η αυτεπαγωγική μέθοδος* μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα υλικά που άγουν ηλεκτρισμό. Αν ένα πηνίο που άγει ένα εναλλασσόμενο ρεύμα τοποθετείται γύρω ή κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου θα δημιουργήσει ρεύματα αυτεπαγωγής μέσα στο υλικό με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Αυτά τα ρεύματα αυτεπαγωγής επηρεάζουν τη σύνθετη αντίσταση στο υπάρχον πηνίο ή σε οποιοδήποτε πηνίο βρίσκεται κοντά. Ρωγμές ή ελαττώματα μέσα στο δοκίμιο θα προκαλέσουν διαταραχές στο ρεύμα αυτεπαγωγής το οποίο διαδοχικά θα προκαλέσει διαταραχές στη σύνθετη αντίσταση του πηνίου. Η τελική αλλαγή στη σύνθετη αντίσταση μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια κατάλληλων ηλεκτρικών κυκλωμάτων και ενός μέτρου. Τα διάφορα ελαττώματα ή οι ρωγμές θα εμφανιστούν σαν κάποιες παρεκτροπές ή διακυμάνσεις στο μέτρο.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Οι επιφανειακές και οι κάτω από την επιφάνεια ατέλειες είναι εντοπίσιμες.
- Δεν απαιτούνται ειδικές ικανότητες διαχείρισης
- Η διαδικασία είναι ευπροσάρμοστη σε συνεχή παρακολούθηση
- Η διαδικασία μπορεί να γίνει πλήρως αυτοματοποιημένη και είναι δεκτική σε υψηλές ταχύτητες
- Δεν χρειάζεται διερεύνηση

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Το βάθος της διείσδυσης είναι μικρό
- Τα υλικά που ελέγχονται πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγίμα
- Οι ενδείξεις επηρεάζονται από περισσότερες από μία μεταβλητές
- Απαιτούνται κριτήρια αναφοράς

*Η υπερηχητική μέθοδος* είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος στην οποία υψηλής συχνότητας ακτίνες ακουστικής ενέργειας εισάγονται στο υλικό υπό αποτίμηση για να προσδιορίσουν επιφανειακά και υποεπιφανειακά ελαττώματα και να μετρήσουν το πάχος του υλικού ή την απόσταση μιας ατέλειας. Μια υπερηχητική ακτίνα θα ταξιδέψει μέσα στο υλικό μέχρι να χτυπήσει μια κοινή επιφάνεια ή ασυνέχεια, όπως μια ατέλεια. Οι κοινές επιφάνειες και οι ατέλειες διακόπτουν την ακτίνα και αντανακλούν ένα τμήμα της συνεπαγόμενης ακουστικής ενέργειας. Το ποσό της ενέργειας που αντανακλάται είναι μια συνάρτηση της φύσης και του προσανατολισμού των κοινών επιφανειών ή των ατελειών καθώς επίσης και της ακουστικής αντίστασης μιας τέτοιας αντανάκλασης. Η ενέργεια που αντανακλάται από τις διάφορες κοινές επιφάνειες ή ατέλειες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει την παρουσία και την τοποθεσία των ατελειών, το πάχος του υλικού ή το βάθος στο οποίο βρίσκεται η ατέλεια κάτω από την επιφάνεια.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Υψηλή ευαισθησία η οποία επιτρέπει των προσδιορισμό πολύ μικρών ρωγμών
- Μεγάλη διεισδυτική ικανότητα που επιτρέπει την εξέταση εξαιρετικά χοντρών κομματιών
- Ακρίβεια στη μέτρηση της θέσης της ατέλειας και στην εκτίμηση του μεγέθους της

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Πολυπλοκότητα στο περίγραμμα του μεγέθους και δυσμενή προσανατολισμό της ασυνέχειας μπορούν να προβλήματα στην εξήγηση του μοτίβου της ηχούς
- Ανεπιθύμητη εσωτερική δομή-για παράδειγμα, το μέθοδος του κόκκου, η δομή, η παρουσία πόρων, η περιεκτικότητα σε εγκλείσματα ή τα πολύ λεπτά διασκορπισμένα ιζήματα-μπορούν ομοίως να εμποδίσουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων
- Απαιτούνται κριτήρια αναφοράς

*Η ραδιογραφία είναι μια μη καταστροφική μέθοδος επιθεώρησης η οποία είναι βασισμένη στη διαφορική απορρόφηση της διεισδυτικής ακτινοβολίας-είτε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ή ακτινοβολία με ξεχωριστά σωματίδια-του κομματιού ή του δοκιμίου που εξετάζεται. Εξαιτίας διαφορών στην πυκνότητα και μεταβολών στο πάχος του κομματιού ή λόγω διαφορών στα χαρακτηριστικά της απορρόφησης προκαλούμενα από μεταβολές στη σύνθεση, από το γεγονός ότι διαφορετικά τμήματα του δοκιμίου απορροφούν διαφορετικά ποσά διεισδυτικής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία που δεν έχει απορροφηθεί και που έχει περάσει διαμέσου του κομματιού μπορεί να καταγραφεί σε φιλμ ή φωτοευαίσθητο χαρτί, να γίνει ορατή σε φωσφορίζουσα οθόνη ή να παρακολουθηθεί με τη βοήθεια διάφορων τύπων ανιχνευτών ακτινοβολίας.*

- ✓ Η ραδιογραφική εξέταση χρησιμοποιείται εκτεταμένα στα χυτά και στις συγκολλήσεις όπου είναι απαραίτητη ανάγκη διαβεβαίωσης ότι δεν υπάρχουν εσωτερικά ελαττώματα.
- ✓ Συγκρινόμενη με τις άλλες μη καταστροφικές μεθόδους η ραδιογραφία είναι ακριβή.
- ✓ Συγκεκριμένοι τύποι ατελειών είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με τη ραδιογραφία. Ατέλειες σε στρώματα όπως είναι οι ρωγμές παρουσιάζουν προβλήματα εκτός εάν είναι ουσιοδώς παράλληλη στην ακτίνα. Σφιχτές, ελικοειδείς ρωγμές σε τμήματα με μεγάλο πάχος δεν μπορούν να εντοπιστούν ακόμα και όταν είναι κατάλληλα προσανατολισμένες. Πολύ μικρές ασυνέχειες όπως είναι τα εγκλείσματα σε σφυρήλατα μέταλλα, τα μικρά κομμάτια, το μικροπορώδες και οι μικροσχισμές δεν μπορούν να εντοπιστούν εκτός και αν είναι επαρκώς διαχωρισμένα ώστε να αποδώσει μια εντοπίσιμη επίδραση. Τα ελασματοποιημένα στρώματα φυσιολογικά δεν είναι εντοπίσιμα με τη ραδιογραφία εξαιτίας του μη επιθυμητού προσανατολισμού τους –συντά παράλληλα προς την επιφάνεια. Τα ελασματοποιημένα στρώματα σπάνια παρουσιάζουν διαφορές στην απορρόφηση ώστε να μην είναι δυνατό να διακρίνονται οι μη ελασματοποιημένες από τις ελασματοποιημένες.

**Ακουστικό-Εκπομπή Επιθεώρηση.** Η ακουστική εκπομπή είναι ορισμένη σαν μια υψηλής συχνότητας τάση κυμάτων δημιουργημένη από την ταχεία απελευθέρωση τεταμένης ενέργειας η οποία συναντάται μέσα σε ένα υλικό κατά τη διάρκεια μιας

διεργασίας όπως είναι η ανάπτυξη ρωγμής, η πλαστική παραμόρφωση και ο μετασχηματισμός φάσεων. Αυτή η ενέργεια μπορεί να προέρχεται από αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια όπως στη διάδοση ρωγμών ή από μη χημική ενέργεια όπως στο μετασχηματισμό φάσεων.

Πηγές ακουστικής εκπομπής οι οποίες δημιουργούν κύματα έντασης στο υλικό περιλαμβάνουν τοπικές δυναμικές κινήσεις όπως είναι η έναρξη και η προώθηση των ρωγμών, η συστροφή, η ολίσθηση, ο ξαφνικός αναπροσανατολισμός στα όρια των κόκκων, η δημιουργία μπουρμπουλήθρων κατά τη διάρκεια του βρασμού ή ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Οι τάσεις σε ένα μεταλλικό σύστημα ίσως είναι καλά κάτω από τα ελαστικά σχεδιαστικά όρια αλλά η περιοχή κοντά σε μια ατέλεια ή στην άκρη μιας ρωγμής ίσως να υποβληθεί σε πλαστική παραμόρφωση και θραύση από τοπικά υψηλές τάσεις και τελικά να καταλήξει σε πρόωρη ή καταστροφική αστοχία κάτω από συνθήκες λειτουργίας.

Η ακουστικό-εκπομπή επιθεώρηση προσδιορίζει και αναλύει πολύ μικρά ακουστικά σήματα που δημιουργούνται από ασυνέχειες στα υλικά κάτω από την εφαρμογή τάσης. Κατάλληλη ανάλυση αυτών των σημάτων μπορεί να δώσει πληροφορίες όσον αφορά την τοποθεσία και τη δομική σημασία των ασυνεχειών που προσδιορίζονται.

Κάποιες από τις σημαντικότερες εφαρμογές της μεθόδου είναι:

- Η συνεχή επιτήρηση των δοχείων πίεσης και τα πυρηνικά πρωταρχικά όρια πίεσης για τον προσδιορισμό και την τοποθεσία των ενεργών ατελειών
- Ο προσδιορισμός της αρχόμενης θραύσης κόπωσης στις αεροπορικές κατασκευές
- Η παρακολούθηση και της σύντηξης και της αντίστασης των συγκολλήσεων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και της ψύξης
- Ο προσδιορισμός της έναρξης της δημιουργίας ρωγμών από τη διάβρωση και τη φθορά από το υδρογόνο στις επιρρεπείς κατασκευές
- Η χρήση της σαν εργαλείο μελέτης για την έρευνα των μηχανισμών της θραύσης και της συμπεριφοράς των υλικών
- Η περιοδική επιθεώρηση των δεξαμενών και των οργάνων πλεύσης τα οποία είναι κατασκευασμένα συνθετικά υλικά

**Η πειραματική ανάλυση τάσεων** μπορεί να γίνει με πολλές μεθόδους οι οποίες μπορεί να είναι πολύτιμες στον προσδιορισμό μηχανικών φορτίων και τάσεων των τμημάτων που μπορούν να προκαλέσουν αστοχίες. Το φάσμα των τάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τον εντοπισμό μικρών περιοχών υψηλών τάσεων, προσδιορίζοντας τις διευθύνσεις των κύριων τάσεων και μετρώντας το ακριβές μέγεθος των εφελκυστικών και καμπτικών τάσεων. Ειδικά όργανα μέτρησης μπορούν να τοποθετηθούν στις περιοχές υψηλών τάσεων και στις κύριες κατευθύνσεις των τάσεων για να μετρήσουν την τάση με ακρίβεια σε μετρητικά μεγέθη 0.5 έως 150mm. Αν και υπάρχουν πολλές μηχανολογικές, οπτικές και ηλεκτρικές συσκευές ικανές για ακριβείς μετρήσεις των τάσεων η δύο στρωμάτων ηλεκτρική αντιστάσεως συσκευή μέτρησης τάσεων έχει γίνει το εργαλείο για εργαστηριακή και γενικότερη χρήση.

Τα φωτοελαστικά στρώματα χρησιμοποιούνται επίσης για εργαστηριακές μετρήσεις τάσεων. Για αυτή την τεχνική, ένα στρώμα ανάκλασης δέσμης ελεγχόμενου πάχους τοποθετείται με τη μορφή δύο στρωμάτων στο δοκίμιο με μια ανακλαστική κόλλα. Η οπτική ανάλυση είναι παρεμφερής με τη συμβατική αλλά απαιτεί ειδικό εξοπλισμό. Η ανάλυση μπορεί να καταγραφεί σε χρωματιστό φιλμ με μονό πλαίσιο ή με κάμερα.



Η διάθλαση των ακτίνων X είναι η μόνη διαθέσιμη μέθοδος για απευθείας μη καταστροφική μέτρηση των επιφανειακών παραμένουσων τάσεων στα κρυσταλλικά υλικά. Οι τάσεις καθορίζονται μετρώντας τη γωνία με την οποία ο κρύσταλλος υπό τάση του υλικού διαθλά την ακτίνα X.

## **1.6 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ**

Ο έλεγχος σκληρότητας είναι το πιο απλό μηχανολογικό τεστ και είναι συχνά ένα εργαλείο πολλαπλών εφαρμογών για το αναλυτή αστοχιών. Μεταξύ των πολλών εφαρμογών του, το τεστ σκληρότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στην αποτίμηση της θερμικής κατεργασίας (συγκρίνοντας τη σκληρότητα του αστοχούντος τμήματος με αυτή της προδιαγραφής), για να παρέχει μια προσέγγιση της δύναμης εφελκυσμού του χάλυβα, και να εντοπίζει εργοσκληρυνση ή να εντοπίζει μαλάκυνση ή σκλήρυνση προκαλούμενη από υπερθέρμανση, εξανθράκωση ή από αύξηση του άνθρακα ή του αζώτου. Το τεστ σκληρότητας είναι γενικά μη καταστρεπτικό εκτός από την περίπτωση που απαιτείται προετοιμασία ενός ειδικού τεστ σκληρότητας όπως είναι ο έλεγχος μικροσκληρότητας.

Άλλα μηχανικά τεστ είναι χρήσιμα για την επιβεβαίωση ότι το εξάρτημα που έχει αστοχήσει συμμορφώνεται στην προδιαγραφή ή στο να αποτιμήσει τις επιδράσεις των επιφανειακών συνθηκών στις μηχανικές ιδιότητες. Όπου κατάλληλα τεστ εφελκυσμού, κοπώσεως ή κρούσης πρέπει να διεξάγονται παρέχοντας επαρκές υλικό το οποίο είναι διαθέσιμο για την κατασκευή των δοκιμίων. Ίσως είναι επίσης αναγκαίο να πραγματοποιηθούν κάποια τεστ είτε σε ελαφρώς ανεβασμένες ή σε χαμηλές θερμοκρασίες ώστε να γίνει προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας. Επίσης θα μπορούσε να είναι χρήσιμο για τα δοκίμια αφότου έχουν υποβληθεί σε συγκεκριμένες θερμικές μεταχειρίσεις οι οποίες προσομοιώνουν τη θερμική μεταχείριση του αστοχούντος εξαρτήματος σε λειτουργία να προσδιοριστεί πως αυτή η μεταχείριση έχει τροποποιήσει τις μηχανικές ιδιότητες.

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ο αναλυτής της αστοχίας θα πρέπει να δείξει ιδιαίτερη προσοχή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μηχανικών τεστ. Θα πρέπει επίσης να γίνει κατανοητό ότι τα εργαστηριακά τεστ σε μικρά δοκίμια ίσως να μην παρουσιάζουν επαρκώς την συμπεριφορά μιας πολύ πιο μεγάλης κατασκευής ή εξαρτήματος σε λειτουργία.

### **1.6.1 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΑ ΤΕΣΤ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ**

Στις περισσότερες διερευνήσεις αστοχίας κατά τη λειτουργία, το τεστ εφελκυσμού δεν παρέχει πολλές χρήσιμες πληροφορίες επειδή σχετικά λίγες αστοχίες απορρέουν από τη χρήση υλικού το οποίο είναι ελλιπές σε δύναμη εφελκυσμού ή από ένα φορτίο εφελκυσμού το οποίο εφαρμόζεται μέχρι να εμφανιστεί η ρωγμή. Επιπλέον τα δείγματα που έχουν κοπεί από εξαρτήματα που έχουν αστοχήσει με ένα ψαθυρό τρόπο γενικά δείχνουν επαρκή ελατότητα κάτω από τις συνθήκες που επιβάλλονται κατά τη διάρκεια ενός τεστ εφελκυσμού.

Τα τεστ εφελκυσμού είναι ουσιαστικά κατά τη διάρκεια της παραγωγής ώστε να εξακριβωθεί αν το υλικό συμμορφώνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Υπάρχουν επίσης κάποιες δικαιολογίες για τα τεστ εφελκυσμού των εξαρτημάτων που έχουν αστοχήσει σε λειτουργία ώστε να εξαλειφθεί σαν πιθανή αιτία αστοχίας το φτωχές ποιότητας υλικό.

Η προετοιμασία των δοκιμίων για τα τεστ εφελκυσμού είναι ακριβή και απαιτεί πολύ χρόνο. Η ποσότητα του υλικού που είναι διαθέσιμο μπορεί επίσης να είναι ανεπαρκές ακόμη και αν τα δοκίμια ετοιμάζονται για υποτυπώδη τεστ. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στον προσδιορισμό της θέσης και της διεύθυνσης από την οποία

έχουν παρθεί τα δοκίμια. Η αλλαγή των ιδιοτήτων του δοκιμίου από υπερβολική θερμότητα κατά τη διάρκεια της κοπής και της κατεργασίας θα πρέπει να αποφεύγεται.

Ένα απλό τεστ κάμψης συνήθως δείχνει αν ή όχι το υλικό έχει επαρκή ελατότητα. Το πόσο ελατό είναι ένα υλικό, όπως φαίνεται από την επιμήκυνση που προκύπτει από το τεστ εφελκυσμού, δεν σχετίζεται απευθείας με τη συμπεριφορά των μετάλλων σε λειτουργία.

Είναι συνήθως επαρκές κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων μιας διερεύνησης να καθορισθεί αν το υλικό είναι ελατό ή ψαθυρό και αυτό μπορεί να εξακριβωθεί από ένα απλό τεστ κάμψεως. Η μείωση της περιοχής, η οποία θεωρείται από κάποιους ότι σχετίζεται με την ικανότητα του υλικού να παραμορφωθεί πλαστικά σε μια εγκόπη και έτσι να απελευθερώσει την ένταση των τάσεων, δίνει μια πολύ πιο ρεαλιστική μέτρηση της ελατότητας αλλά συνήθως αυτή η μέτρηση παραλείπεται από το τεστ εφελκυσμού.

Τα αποτελέσματα των τεστ εφελκυσμού σε δοκίμια από εξαρτήματα που έχουν αστοχήσει κατά τη λειτουργία μερικές φορές δείχνουν ότι το υλικό είναι ελαφρώς κατώτερο σε δύναμη και ελατότητα συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των τεστ έγκρισης που πραγματοποιούνται όταν τα εξαρτήματα κατασκευάζονται. Ωστόσο τα τεστ έγκρισης τα οποία συχνά πραγματοποιούνται σε δοκίμια που παρέχονται ειδικά για αυτό το σκοπό. Συνεπώς, κάποια διαφορά είναι αναμενόμενη εξαιτίας των διαφορών στη σφυρηλάτηση ή στην ψυχρή κατεργασία στην οποία ένα εξάρτημα και τα δοκίμια έχουν υποβληθεί κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ή εξαιτίας κάποιας διαφοράς στο πάχος έχουν καταλήξει σε μεταβολές στο ρυθμό ψύξης είτε κατά τη διάρκεια της χύτευσης ή κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας. Για αυτό τέτοιες ανομοιότητες στα αποτελέσματα θα πρέπει απαραίτητως να διερμηνεύονται σαν μια ένδειξη ότι συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού έχουν φθαρεί στη λειτουργία. Ο ρόλος της κατευθυντικότητας στο τεστ εφελκυσμού θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη. Τα δείγματα που κόβονται εγκάρσια στο διαμήκη άξονα ενός εξαρτήματος όπως είναι ένας άξονας θα πρέπει να αναμένεται να δώσει χαμηλότερες τιμές επιμήκυνσης από αυτές που θα προέκυπταν εάν τα δοκίμια είναι κοπεί κατά μήκος του διαμήκη άξονα εξαιτίας της σημειωμένης κατευθυντικότητας και την απορρέουσα ανισοτροπία που παράγεται κατά τη διάρκεια της έλασης ή της σφυρηλάτησης.

## **1.7 Η ΕΠΙΛΟΓΗ, Η ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ Ο ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ**

Η κατάλληλη επιλογή, συντήρηση και καθαρισμός των επιφανειών θραύσης είναι ουσιώδεις για την αποφυγή καταστροφής ή απόκρυψης σημαντικών αποδείξεων. Οι επιφάνειες θραύσης μπορεί να υποστούν μηχανική ή χημική βλάβη. Η μηχανική βλάβη μπορεί να προκύψει από διάφορες πηγές συμπεριλαμβανομένου του χτυπήματος των επιφανειών από άλλα αντικείμενα. Αυτό μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια πραγματικής θραύσης κατά τη λειτουργία ή κατά την αφαίρεση ή τη μεταφορά ενός σπασμένου τμήματος για ανάλυση.

Η χημική (διάβρωση) βλάβη σε ένα σπασμένο δοκίμιο μπορεί να αποφευχθεί με διάφορους τρόπους. Οποτε είναι δυνατό το πλύσιμο της επιφάνειας θραύσης με νερό θα πρέπει να αποφεύγεται. Ωστόσο, δοκίμια προσβεβλημένα με θαλασσινό νερό ή με προϊόντα απόσβεσης απαιτούν σχολαστικό πλύσιμο, συνήθως με νερό, ακολουθούμενο από ξέπλυμα με ακετόνη ή οινόπνευμα πριν την αποθήκευση σε ξηρό μέρος ή την επικάλυψη με ένα ξηραντικό.



**ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ.** Οι επιφάνειες θραύσης θα πρέπει να καθαρίζονται μόνο όταν είναι απαραίτητο. Η διαδικασία καθαρισμού περιλαμβάνει τη χρήση ξηρού αέρα ή ενός σεσουάρ, τη μεταχείριση με ανόργανα διαλυτικά μέσα με απορρόφηση ή έκχυση, τη μεταχείριση με ήπιο οξύ ή αλκαλικά διαλύματα τα οποία θα προσβάλλουν τα κατάλοιπα αλλά στα οποία το μέταλλο είναι ουσιαστικά αδρανές. Επίσης έχουμε υπερηχητικό καθαρισμό και εφαρμογή και απογύμνωση από πλαστικά αντίγραφα.

**ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ.** Επειδή τα όργανα εξέτασης, συμπεριλαμβανομένων των μετρητών σκληρότητας και τα οπτικά και ηλεκτρονικά μικροσκόπια, είναι περιορισμένα όσον αφορά το μέγεθος των δοκιμίων που μπορούν να δεχτούν, είναι συχνά απαραίτητο να αφαιρεθεί από το εξάρτημα που έχει αστοχήσει ένα τμήμα της θραύσης ώστε να είναι το μέγεθος ικανό για μεταχείριση και εξέταση. Είναι σημαντικό ότι αρχεία, είτε σκαριφήματα είτε φωτογραφίες κρατιούνται για να δείξουν τις τοποθεσίες των κοψιμάτων που έγιναν κατά τη διάρκεια της τμηματοποίησης.

Πριν την κοπή ή την τμηματοποίηση η περιοχή της θραύσης θα πρέπει να προστατεύονται προσεκτικά. Όλη η κοπή θα πρέπει να γίνει έτσι ώστε οι επιφάνειες θραύσης και οι περιοχές που είναι κοντά σε αυτές να μην καταστρέφονται ή να αλλάζουν αυτό περιλαμβάνει τη διατήρηση της επιφάνειας θραύσης στεγνή όποτε είναι δυνατό. Για μεγάλα τμήματα η κοινή μέθοδος για την αφαίρεση δοκιμίων είναι η κοπή με φλόγα. Η κοπή πρέπει να γίνει σε ικανοποιητική απόσταση από τη θέση της θραύσης ώστε να αποφευχθεί η αλλαγή της μικροδομής του μετάλλου κάτω από την επιφάνεια της θραύσης από τη θερμότητα της φλόγας και να αποφευχθεί η ιζηματοποίηση του λιωμένου μετάλλου από την κοπή με φλόγα πάνω στην επιφάνεια της θραύσης.

**ΑΝΟΙΓΟΝΤΑΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΡΩΓΜΕΣ.** Όταν η πρωταρχική θραύση έχει καταστραφεί ή διαβρωθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε οι περισσότερες πληροφορίες όσον αφορά την αιτία της θραύσης έχουν εξαλειφθεί είναι επιθυμητό να ανοιχθούν δευτερεύουσες ρωγμές και να εκτεθούν οι επιφάνειες θραύσης τους για εξέταση και μελέτη. Αυτές οι ρωγμές ίσως να προσφέρουν περισσότερες πληροφορίες από την πρωταρχική θραύση.

Κατά το άνοιγμα των ρωγμών για εξέταση θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφευχθεί η βλάβη, κυρίως μηχανική, στην επιφάνεια της θραύσης.

## **1.8 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ**

Η λεπτομερής εξέταση των επιφανειών θραύσης σε μεγεθύνσεις κυμαίνεται από 1 έως 100x μπορεί να γίνει με απλό μάτι, με φακούς ή με ένα χαμηλής ισχύος οπτικό μικροσκόπιο. Ενίοτε, μπορεί να είναι επωφελής η χρήση ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σε χαμηλές μεγεθύνσεις.

Συχνά, ένα δοκίμιο μπορεί να είναι πολύ μεγάλο ή πολύ βαρύ για το στάδιο της μεταλλογραφίας και η κοπή ή η τμηματοποίηση του δοκιμίου να είναι δύσκολη ή ανεπιθύμητη. Σε αυτές τις περιπτώσεις πολύ καλά αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με εξέταση και όπου είναι απαραίτητο με φωτογράφιση των αντιγράφων που γίνονται με τη μέθοδο καθαρισμού των θραύσεων.

Η ποσότητα των πληροφοριών που προκύπτει από την εξέταση των επιφανειών θραύσης σε χαμηλής ισχύος μεγέθυνση είναι εκπληκτικά εκτεταμένη. Η μελέτη της διαμόρφωσης των επιφανειών θραύσης μπορεί να δώσει μια ένδειξη του συστήματος των τάσεων που προκάλεσε την αστοχία

### **1.9 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ**

Η μικροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης μπορεί να διεξαχθεί με τη χρήση ενός οπτικού μικροσκοπίου, ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μετάδοσης ή ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

### **1.10 Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑΣ**

Η μεταλλογραφική εξέταση των γυαλισμένων και εγχαραγμένα με οξύ τμήματα με οπτική μικροσκοπία και ηλεκτρονικές τεχνικές είναι ζωτικό κομμάτι της ανάλυσης αστοχίας και θα πρέπει να διεξάγεται σαν μια διαδικασία ρουτίνας. Η ανάλυση μεταλλογραφίας δίνει στον εξεταστή μια καλή ένδειξη για την κατηγορία του υλικού που συμμετέχει και αν έχει την επιθυμητή δομή.

Όσον αφορά την καλύτερη τοποθεσία από την οποία μπορεί ο αναλυτής να πάρει δοκίμια για μικροσκοπική εξέταση μόνο γενικές κατευθύνσεις μπορούν να δοθούν και αυτό επειδή κάθε αστοχία έχει τα δικά της ξεχωριστά χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Παρόλα αυτά στις περισσότερες μελέτες πρέπει να καθορίζεται η δομή του δοκιμίου που λαμβάνεται από διπλανή περιοχή από την επιφάνεια θραύσης στην οποία έχει αναπτυχθεί ένα λειτουργικό ελάττωμα και είναι αντιπροσωπευτικό του εξαρτήματος σαν σύνολο. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με εξέταση των δοκιμίων που παίρνονται από διαφορετικές τοποθεσίες και γενικά συνιστάται ότι ο αριθμός που επιλέγονται για εξέταση πρέπει να είναι μεγάλος.

Οι πολυτιμότερες πληροφορίες από την μικροσκοπική εξέταση των ρωγμών μπορούν να κερδισθούν από τη μελέτη των δοκιμίων που περιλαμβάνουν τα άκρα των ρωγμών.

Στην εξέταση των ρωγμών κόπωσης είναι καλύτερο να λαμβάνονται δοκίμια από την περιοχή που ξεκίνησε η θραύση για να εξακριβωθεί αν η αρχική ανάπτυξη σχετίζεται με ανωμαλία όπως ένα ελάττωμα συγκόλλησης, μια εξανθρακωμένη επιφάνεια, μια ζώνη πλούσια σε εγκλείσματα ή απορρίμματα, μια εξαιρετικά πορώδης ζώνη.

### **1.11 ΕΞΕΤΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ**

Η εξέταση των μεταλλογραφικών τμημάτων με ένα μικροσκόπιο είναι η καθιερωμένη διαδικασία στις περισσότερες μελέτες αστοχίας εξαιτίας της αξιοσημείωτης ικανότητας του μικροσκοπίου να αποκαλύπτει ατέλειες του υλικού που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και να προσδιορίζει τα αποτελέσματα σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και περιβάλλοντα τα οποία μπορεί να έχουν συμβάλει στην αστοχία. Εγκλείσματα, μικροδομικός διαχωρισμός, εξανθράκωση, μεγάλη ποσότητα άνθρακα, ακατάλληλη θερμική κατεργασία και διάβρωση είναι μερικές από τις πολλές μεταλλουργικές ατέλειες και ανεπιθύμητες συνθήκες που μπορούν να προσδιοριστούν και να αναλυθούν με μικροσκοπική εξέταση των μεταλλογραφικών τμημάτων.

Ακόμη και στην απουσία μιας συγκεκριμένης μεταλλουργικής ατέλειας η εξέταση των δοκιμίων μεταλλογραφίας είναι πολύτιμη στον ερευνητή στην μέτρηση των παραμέτρων όπως το πάχος της επιμεταλλώσεως, το μέγεθος των κόκκων και η θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη που μπορεί να αποτελούν ενδείξεις για την αιτία της αστοχίας. Τα δοκίμια μεταλλογραφίας είναι επίσης χρήσιμα όταν ποσοτικές μεταλλογραφικές τεχνικές ή ηλεκτρονική μικροανάλυση χρησιμοποιείται στην ανάλυση της αστοχίας.

### **1.12 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΘΡΑΥΣΗΣ**

Για να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες που αποκτήθηκαν από την εξέταση της περιοχής της αστοχίας, τις επιφάνειες θραύσης και των δοκιμών μεταλλογραφίας ώστε να προσδιοριστεί η αιτία της θραύσης είναι συνήθως απαραίτητο να προσδιοριστεί ο τύπος της θραύσης. Εντούτοις μια λογική ταξινόμηση των αστοχιών συμπεριλαμβανομένης και της θραύσης δεν υπάρχει.

### **1.13 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

Στη μελέτη αστοχίας η χημική ανάλυση είναι ανάλυση ρουτίνας που πραγματοποιείται για να επιβεβαιώσει ότι το υλικό είναι αυτό που έχει προσδιοριστεί. Μικρές αποκλίσεις από την προκαθορισμένη σύσταση δεν θεωρούνται μεγάλης σημασίας στην ανάλυση αστοχίας. Στην πραγματικότητα επειδή ένας μικρός αριθμός αστοχιών κατά τη λειτουργία προέρχονται από ακατάλληλο ή ελαττωματικό υλικό τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης σπάνια αποκαλύπτουν την αιτία της αστοχίας. Σε συγκεκριμένες μελέτες, ειδικά όπου διάβρωση είναι παρούσα η χημική ανάλυση κάθε ιζήματος, κατάλοιπου ή προϊόντος διάβρωσης ή του μέσου με το οποίο το επηρεαζόμενο υλικό είναι σε επαφή απαιτείται ώστε να βοηθήσει στην επαλήθευση της πρωταρχικής αιτίας της αστοχίας.

### **1.14 ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ**

Η έκθεση της μελέτης αστοχίας θα πρέπει να γράφεται κατανοητά και λιτά. Ένας πεπειραμένος μελετητής έχει προτείνει το διαχωρισμό της έκθεσης στα παρακάτω τμήματα:

- Περιγραφή του αστοχούντος εξαρτήματος
- Συνθήκες λειτουργίας κατά την αστοχία
- Ιστορικό λειτουργίας
- Ιστορικό κατεργασίας και επεξεργασίας του εξαρτήματος
- Μηχανική και μεταλλουργική μελέτη της αστοχίας
- Μεταλλουργική αποτίμηση της ποιότητας
- Περίληψη των μηχανισμών που προκάλεσαν αστοχία
- Συστάσεις για την αποφυγή παρόμοιων αστοχιών ή διόρθωση παρόμοιων εξαρτημάτων σε λειτουργία

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΛΕΤΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

### 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει μια περίληψη των μελετών αστοχιών που έχει πραγματοποιήσει το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

#### 2.1 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ανατέθηκε η διερεύνηση της αστοχίας τμήματος χαλύβδινου αγωγού που λειτουργούσε σε εγκατάσταση. Ο αγωγός διαμέτρου 8'' 5/8 αποτελούσε τμήμα της σωληνογραμμής η οποία χρησιμοποιείται για την εκφόρτωση δεξαμενόπλοιων. Τα προϊόντα που διακινήθηκαν είναι βενζίνες και πετρέλαιο ντίζελ ενώ μετά από κάθε εκφόρτωση το δεξαμενόπλοιο αποστέλλει και γεμίζει τον αγωγό με θαλασσινό νερό.

Ο αγωγός που αστόχησε είναι τοποθετημένος πάνω σε μεταλλικά στηρίγματα μέσα σε όρυγμα από σκυρόδεμα καλυμμένο κατά το μεγαλύτερο τμήμα της διαδρομής του με πλάκες από το ίδιο υλικό. Η θέση της αστοχίας ευρίσκεται στην άνω γενέτειρα του αγωγού. Η αστοχία έχει τη μορφή οπής εσωτερικής διαμέτρου ~ 20mm και εξωτερικής ~ 8 mm.

Το υλικό των σωλήνων είναι χάλυβας κατά API 5L Gr. B.

Στο Εργαστήριο Υλικών παραδόθηκε με την ανάθεση της μελέτης

- Το τμήμα του σωλήνα που παρουσίασε την αστοχία.
- Πιστοποιητικά ιδιοτήτων του υλικού από την κατασκευάστρια εταιρεία
- Πιστοποιητικά ποιοτικού ελέγχου από το πεδίο της κατασκευής της σωληνογραμμής

Το αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι:

- Σύγκριση των ιδιοτήτων του υλικού με τις προδιαγραφές
- Ο προσδιορισμός της αιτίας της αστοχίας

Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται οι πειραματικές διαδικασίες που εφαρμόστηκαν.

##### 2.1.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Από το τεμάχιο του αγωγού που παρελήφθη εξήχθησαν δοκίμια για οπτικό έλεγχο, χημική ανάλυση, δοκιμές εφελκυσμού και μεταλλογραφικό έλεγχο.

**Οπτικός έλεγχος:** Πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος με στερεοσκόπιο Leitz Aristomet σε μεγεθύνσεις 6.5-40X τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού.

**Χημικές αναλύσεις κραμάτων:** Πραγματοποιήθηκε σε ένα δείγμα με τη μέθοδο φασματοσκοπίας εκπομπής.



**Δοκιμές εφελκυσμού:** Έγιναν δύο δοκιμές εφελκυσμού ακολουθώντας τις προδιαγραφές API 5L (δειγματοληψία και κατασκευή δοκιμίων) και ASTM A370 (εκτέλεση δοκιμής εφελκυσμού).

**Μεταλλογραφικές αναλύσεις:** Πραγματοποιήθηκαν σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές τόσο στην περιοχή της αστοχίας όσο και σε άλλες περιοχές του υλικού. Η προετοιμασία των δοκιμίων περιέλαβε κοπή με λεπτοτόμο Struers Accutom 2, εγκιβωτισμό των δοκιμίων σε ρητίνη, λείανση με χαρτιά 400, 600 και 1000 grit και στίλβωση με αιώρημα διαμαντόπαστας κοκκομετρίας 3μm. Η χημική προσβολή των δοκιμίων έγινε με αντιδραστήριο Nital. Η παρατήρηση και φωτογράφιση έγινε στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Leitz σε μεγεθύνσεις 50 – 1000X.

**Έλεγχος επιφανειών και εγκάρσιων τομών διάβρωσης:** Πραγματοποιήθηκε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) του Εργαστηρίου Υλικών σε μεγεθύνσεις έως 5000X.

**Μικροσκοπική χημική ανάλυση:** Πραγματοποιήθηκε με αναλυτή EDAX (Energy Dispersive Analysis with X-rays) προσαρμοσμένο στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

**Μικροσκληρομέτρηση:** Πραγματοποιήθηκε στην κλίμακα Vickers φορτίο 200gr στο μικροσκληρόμετρο Shimadzu.

## **2.1.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **Σχετικά με το υλικό:**

Οι εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι το υλικό καλύπτει γενικά τις απαιτήσεις της προδιαγραφής API 5L Gr.B με κάποιες διαφοροποιήσεις. Η χημική σύσταση είναι εντός προδιαγραφών με εξαίρεση μία μικρή υπέρβαση στο Μαγγάνιο που κρίνεται αμελητέα. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, το όριο διαρροής και η τάση θραύσης είναι μεν εντός της προδιαγραφής, αλλά οι συγκεκριμένες τιμές είναι υψηλές με συνέπεια ο λόγος YS/TS να είναι οριακός. Επίσης η επιμήκυνση στο δοκίμιο No.2 είναι μικρότερη κατά μία μονάδα από αυτή που ορίζει η προδιαγραφή. Τα δεδομένα αυτά σημαίνουν ότι ο συγκεκριμένος χάλυβας παρουσιάζει υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού (YS & TS) από αυτή που απαιτεί η συγκεκριμένη χρήση. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής είναι πιο επιρρεπείς σε τοπική διάβρωση (localized corrosion) που μπορεί να εμφανιστεί με διάφορες μορφές π.χ. pitting, hydrogen embrittlement, stress corrosion.

Οι εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν επίσης ότι το υλικό εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις με τις τιμές που αναγράφονται στα πιστοποιητικά του κατασκευαστή όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες. Όλες οι τιμές (YS, TS, YS/TS, Elongation) παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις.

### **Σχετικά με τη διάβρωση:**

Οι μεταλλογραφικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι η διάτρηση του αγωγού οφείλεται σε έντονη τοπική διαβρωτική δράση μορφής pitting. Το pitting αποτελεί την πιο κοινή αιτία αστοχίας από διάβρωση στους χάλυβες που εκτίθενται σε θαλασσινό νερό με ταχύτητα 10-1000 φορές μεγαλύτερη από τη ταχύτητα της ομοιόμορφης διάβρωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η διέλευση υγρών καυσίμων από τον αγωγό επιφέρει σχηματισμό επικαθήσεων. Οι επικαθίσεις αυτές δημιουργούν το φαινόμενο του crevice corrosion διότι αποκλείοντας την περιοχή από οξυγόνο δρουν ως τοπικές άνοδοι σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή που καθίσταται κάθοδος. Ο λόγος επιφάνειας ανόδου/καθόδου είναι πολύ μεγάλος και το γεγονός αυτό επιταχύνει την διάβρωση. Οποιοσδήποτε παράγοντας απομακρύνει τα προϊόντα διάβρωσης επιταχύνει τη διαβρωτική δράση. Η τυρβώδης ροή του υγρού καυσίμου συντείνει στην κατεύθυνση

αυτή. Το φαινόμενο υποβοηθείται και επιταχύνεται από την παρουσία θείου και χλωρίου στα σύνορα των κόκκων του χάλυβα γεγονός που παρατηρήθηκε με τον χαρακτήρα της περικρυσταλλικής διάβρωσης. Τα παραπάνω φαινόμενα είναι δυνατόν να έχουν επιταχυνθεί από την παρουσία μικροοργανισμών με μορφή βακτηριδίων (bacteria) και μυκήτων (fungi) που προκαλούν Μικροβιακή διάβρωση (microbiologically influenced corrosion, MIC). Στην αιτία αυτή αποδίδεται το 20-30% των αστοχιών από διάβρωση παγκοσμίως σε αυτές τις κατηγορίες αγωγών.

Η συγκεκριμένη αστοχία είναι αρκετά σπάνια όσον αφορά το σύντομο χρονικό διάστημα στο οποίο εκδηλώθηκε καθώς και τη θέση στην οποία εντοπίστηκε (άνω γενέτειρα). Το γεγονός αυτό οδηγεί στις παρακάτω πιθανότητες:

(α) στην πιθανότητα κάποιας τοπικής μηχανικής καταπόνησης στα συγκεκριμένα σημεία. Η πιθανότητα αυτή δεν ήταν δυνατόν να ελεγχθεί εργαστηριακά λόγω της διάβρωσης του υλικού.

(β) στην πιθανότητα εγκλωβισμού αέρα/οξυγόνου/CO<sub>2</sub> στα συγκεκριμένα σημεία λόγω της όδευσης του αγωγού

Τα **συμπεράσματα** της παρούσας μελέτης είναι τα εξής:

Η αιτία αστοχίας (διάτρηση αγωγού) οφείλεται σε διάβρωση pitting από την έκθεση στο θαλασσινό νερό, που ξεκίνησε με τη μορφή crevice corrosion λόγω επικαθήσεων του υγρού καυσίμου και εξελίχθηκε με την υποβοήθηση της τυρβώδους ροής του καυσίμου και την παρουσία χλωρίου και θείου στα όρια των κόκκων του υλικού. Η υψηλή αντοχή εφελκυσμού του χάλυβα συνέτεινε στη γρήγορη εξέλιξη του φαινομένου.

## 2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Στο Εργαστήριο Υλικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Ε.Υ.Π.Θ.) ανατέθηκε η διερεύνηση της αστοχίας τμήματος υποθαλάσσιου χαλύβδινου αγωγού. Επιπλέον, στο Ε.Υ.Π.Θ. παραδόθηκε και ένα δεύτερο τμήμα αγωγού της ίδιας σωληνογραμμής, το οποίο δεν είχε υποστεί αστοχία, με σκοπό τη σύγκριση των δύο τμημάτων. Τα δύο τμήματα, διαμέτρου 20" και πάχους τοιχώματος 12,7 mm, αποτελούσαν μέρος σωληνογραμμής, η οποία χρησιμοποιείται για την εκφόρτωση δεξαμενόπλοιων. Τα προϊόντα που διακινήθηκαν είναι βενζίνες και πετρέλαιο diesel, ενώ μετά από κάθε εκφόρτωση το δεξαμενόπλοιο γέμιζε τον αγωγό με θαλασσινό νερό.

Η υποθαλάσσια σωληνογραμμή έχει συνολικό μήκος 1.800 m, ενώ τα δύο προς μελέτη τμήματά της ήταν τοποθετημένα σε απόσταση περίπου 150 m από την ακτή και σε βάθος περίπου 0,80 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η θέση της αστοχίας (διάτρηση) ευρίσκεται στην κάτω γενέτειρα του αγωγού. Η αστοχία στην περιοχή της οπής έχει τη μορφή ελλειπτικού τρήματος με μεγάλο άξονα μήκους ~ 20 mm και μικρό άξονα μήκους ~ 6,5 mm.

Το υλικό των αγωγών είναι χάλυβας Grade B κατά API 5L.

Στο Ε.Υ.Π.Θ. παραδόθηκαν τα παρακάτω:

- Το τμήμα του αγωγού που παρουσίασε την αστοχία και ένα δεύτερο τμήμα αγωγού που δεν είχε αστοχήσει.
- Πιστοποιητικά ιδιοτήτων του υλικού από την κατασκευάστρια εταιρεία

Το αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι:

- Σύγκριση των ιδιοτήτων του υλικού με τις προδιαγραφές.
- Προσδιορισμός της αιτίας αστοχίας του τμήματος του αγωγού που αστόχησε.
- Σύγκριση των δύο τμημάτων του αγωγού.

Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται οι πειραματικές διαδικασίες που εφαρμόστηκαν.

### 2.2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Από τα τμήματα του αγωγού που παρελήφθησαν εξήχθησαν δοκίμια για οπτικό έλεγχο, χημική ανάλυση, δοκιμές εφελκυσμού και μεταλλογραφική ανάλυση μικροδομής.

**Μακροσκοπικός και στερεοσκοπικός οπτικός έλεγχος:** Πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος με στερεοσκόπιο Leitz Aristomet σε μεγεθύνσεις x6.5 - x40, τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού.

**Χημικές αναλύσεις κραμάτων:** Πραγματοποιήθηκε σε ένα δείγμα από κάθε τμήμα του αγωγού, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο φασματοσκοπίας εκπομπής.

**Δοκιμές εφελκυσμού:** Πραγματοποιήθηκαν από δύο δοκιμές εφελκυσμού για κάθε τμήμα του αγωγού, σύμφωνα με τις προβλέψεις των προδιαγραφών API 5L (δειγματοληψία και κατασκευή δοκιμίων) και ASTM A370 (εκτέλεση δοκιμής εφελκυσμού).

**Μεταλλογραφικές αναλύσεις:** Πραγματοποιήθηκαν σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές τόσο στην περιοχή της αστοχίας όσο και σε άλλες περιοχές του υλικού. Η προετοιμασία των δοκιμίων περιέλαβε κοπή με λεπτοτόμο Struers Accutom 2, εγκιβωτισμό των δοκιμίων σε ρητίνη, λείανση με χαρτιά 120, 320, 500 και 1000 grit και στίλβωση με αιώρημα διαμαντόπαστας κοκκομετρίας 1 μm. Η χημική προσβολή των δοκιμίων έγινε

με αντιδραστήρια Nital 2% και 6%. Η παρατήρηση και φωτογράφιση έγινε σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Leitz σε μεγεθύνσεις x50 – x1000.

**Μικροσκοπική χημική ανάλυση:** Πραγματοποιήθηκε με αναλυτή EDAX (Energy Dispersive Analysis with X-rays), προσαρμοσμένο σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

### **2.2.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η αιτία αστοχίας (διάτρηση αγωγού) οφείλεται σε εκτριβή - διάβρωση (erosion – corrosion) από την έκθεση στο θαλασσινό νερό. Η διάβρωση προκλήθηκε από την ύπαρξη τοπικού γαλβανικού στοιχείου στην περιοχή της αστοχίας, λόγω διαφοροποίησης της μικροδομής. Η διάβρωση υποβοηθήθηκε λόγω επικαθήσεων από τα υγρά καύσιμα και επιταχύνθηκε λόγω της εκτριβής από φερτά υλικά και την παρουσία θαλασσινού νερού (ιόντα Cl). Οι διαφοροποιήσεις στη μικροδομή καθώς και η υψηλή αντοχή εφελκυσμού του χάλυβα του τμήματος 1 συνέτεινε στην ταχύτερη εξέλιξη του φαινομένου σε σχέση με το τμήμα 2 και, επομένως, στην τελική του αστοχία. Η έκταση της διάβρωσης στο τμήμα 2 του αγωγού κρίνεται φυσιολογική, δεδομένου του χρόνου λειτουργίας του αγωγού (άνω των 10 ετών). Οι πρόσθετες μεταλλογραφικές παρατηρήσεις στο τμήμα 3 ενισχύουν τα προαναφερθέντα αίτια της αστοχίας.



### 2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (INCONEL 601) ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας η μελέτη αστοχίας για τη διευκρίνιση αιτιών θραύσης υλικού κατασκευής καυστήρα. Το υλικό υπέστη θραύση κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης.

Στο Εργαστήριο Υλικών παραδόθηκαν:

- Τεμάχιο του κράματος από την περιοχή της αστοχίας
- Ένα μη χρησιμοποιηθέν τεμάχιο

#### 2.3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Η χημική σύσταση του κράματος Inconel 601 είναι:

Στοιχείο	Σύσταση (%κ.β.)
Ni	60.5
Cr	23
Al	14
Fe	14.1
Mn	0.5
Si	0.2
C	0.05

Για τη διερεύνηση της αστοχίας πραγματοποιήθηκαν μεταλλογραφικές αναλύσεις και στα δύο τεμάχια του κράματος.

#### 2.3.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το υλικό κατασκευής (Inconel 601) ισχυροποιείται με καθίζηση της  $\gamma$  φάσης  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ . Αν το υλικό εκτεθεί σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας διαλυτοποίησης αυτής της φάσης (περίπου  $1175^\circ\text{C}$ ) τότε η φάση ισχυροποίησης διαλυτοποιείται με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής. Επίσης για θερμοκρασίες υψηλές όμως κάτω της θερμοκρασίας διαλυτοποίησης λαμβάνει χώρα διεύρυνση των σωματιδίων ισχυροποίησης με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής.

## 2.4 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΔΙΕΛΑΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΕ ΠΡΕΣΑ ΔΙΕΛΑΣΗΣ

Στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ανατέθηκε μελέτη αστοχίας του δακτυλίου συγκράτησης ο οποίος υπέστη θραύση κατά τη διάρκεια δοκιμής μεγίστης πίεσης (εν ψυχρώ) της πρέσας διέλασης. Στο Εργαστήριο παραδόθηκε με την ανάθεση της μελέτης δείγμα του υλικού.

Το αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η διευκρίνιση των αιτιών θραύσης δακτυλίου συγκράτησης μήτρας διέλασης αλουμινίου. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται οι πειραματικές διαδικασίες που εφαρμόστηκαν.

### 2.4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

#### Στερεοσκοπική ανάλυση

Με παρατήρηση στο στερεοσκόπιο της επιφάνεια θραύσης, διαπιστώθηκαν τα εξής :

- πρόκειται για ψαθυρή θραύση
- η έναρξη των ρηγμάτων δεν είναι στις διαβαθμίσεις
- Παρουσία λευκής ζώνης στην έναρξη του ρήγματος

#### Χημική Ανάλυση

Στο δείγμα πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση της οποίας τα αποτελέσματα καθώς και η σύσταση κατά DIN με αριθμό υλικού 1.2714 φαίνονται στον πίνακα.

Στοιχείο	DIN-1.2714	Χημική Ανάλυση
C	0,50-0,60	0,497
Cr	1,00-1,20	1,924
Mn	0,65-0,95	0,91
Mo	0,45-0,55	0,323
Ni	1,50-1,80	0,568
P	0,00-0,030	0,010
S	0,00-0,030	0,008
Si	0,10-0,40	0,67
V	0,07-0,12	0,23

Από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης παρατηρούμε ότι η σύσταση του χάλυβα είναι εκτός προδιαγραφών με πολύ χαμηλή σύσταση σε Ni, υψηλότερη σύσταση σε Cr και χαμηλότερη σε Mo.

#### Σκληρομέτρηση

Μετά από κοπή του δείγματος πάρθηκαν δοκίμια στα οποία έγινε μέτρηση της σκληρότητας του υλικού και τα αποτελέσματα είναι τα εξής :

42 HRC	,	411 HV <sub>0.2</sub>
--------	---	-----------------------

#### Μεταλλογραφία

Από το αρχικό δείγμα κόπηκαν δοκίμια τα οποία μετά από κατάλληλη προετοιμασία (λείανση, στύλωση, χημική προσβολή) παρατηρήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο και ελήφθησαν οι κατάλληλες φωτογραφίες.

#### **2.4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η θραύση του δακτυλίου είναι ψαθυρή και οφείλεται στην χαμηλή δυσθραυστότητα του υλικού. Η μειωμένη δυσθραυστότητα οφείλεται : (α) στην χαμηλή περιεκτικότητα του χάλυβα σε Ni και (β) πιθανόν σε κάποιο λάθος στην θερμική κατεργασία.

## 2.5 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΕΡΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ Υ/Β

Στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ανατέθηκε η διερεύνηση της αστοχίας περικοχλίων κοχλιωτών συνδέσμων σωληνώσεων αέρος υψηλής πίεσεως. Οι αστοχίες είχαν τη μορφή ρηγματώσεων και θραύσεων με αντίστοιχες επιπτώσεις στην δομική ακεραιότητα του συστήματος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος είναι τα εξής: Οι σωληνώσεις αέρος είναι Φ20x3mm με ονομαστική πίεση λειτουργίας 250 bar. Το υλικό κατασκευής είναι ανοξείδωτος χάλυβας 1.4301 ( AISI 304). Το υλικό των κωνικών δακτυλίων είναι ανοξείδωτος χάλυβας 1.4571 ( AISI 316 Ti). Το υλικό των περικοχλίων είναι ορείχαλκος 2.0540 / CuZn35Ni2 κατά DIN 17660. Τα περικόχλια έχουν υποστεί επιφανειακή κατεργασία επικαδμίωσης.

Στο Εργαστήριο Υλικών παραδόθηκαν με την ανάθεση της μελέτης:

- Τμήμα θραυσθέντος περικοχλίου
- Τέσσερα (4) μεταχειρισμένα περικόχλια
- Δύο (2) καινούργια περικόχλια
- Τμήμα μεταχειρισμένου σωληνώματος με κωνικό δακτύλιο

Το αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι:

- Ο προσδιορισμός της αιτίας της αστοχίας για το περικόχλιο που υπέστη θραύση
- Εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας των μεταχειρισμένων περικοχλίων

### 2.5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Τα περικόχλια που παραλήφθηκαν περιγράφονται στον πίνακα

Αριθμός	Περιγραφή Περικοχλίου
Π1	Καινούργιο
Π2	Καινούργιο
Π3	Μεταχειρισμένο 250>50
Π4	Μεταχειρισμένο (No.2) ΠΜ
Π5	Μεταχειρισμένο 250>50
Π6	Μεταχειρισμένο (No.3) ΠΡ
Π7	Τμήμα θραυσθέντος περικοχλίου
Σ8	Τμήμα σωλήνα με κωνικό δακτύλιο

**Οπτικός έλεγχος:** Στα παραληφθέντα περικόχλια πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος με στερεοσκόπιο Leitz Aristomet σε μεγεθύνσεις 6.5-40X.

**Μη – καταστρεπτικός έλεγχος:** Στα περικόχλια πραγματοποιήθηκε ραδιογραφικός έλεγχος.

**Χημικές αναλύσεις κραμάτων:** Πραγματοποιήθηκαν στα περικόχλια Π2, Π3 και Π7 με τη μέθοδο φασματοσκοπίας εκπομπής.

**Σκληρομετρήσεις:** πραγματοποιήθηκαν σε σκληρόμετρο FRANK στην κλίμακα Brinel με φορτίο 613N και σφαίρα διαμέτρου 2.5mm.

**Έλεγχος επικαδμίσωσης:** Πραγματοποιήθηκε με οπτικό, στερεοσκοπικό και μεταλλογραφικό έλεγχο τόσο για το πάχος όσο και για την ομοιομορφία της επικάλυψης.

**Μεταλλογραφικές αναλύσεις:** Πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες τομές (διαμήκεις και εγκάρσιες). Η προετοιμασία των δοκιμών περιέλαβε κοπή με λεπτοτόμο Struers Accutom 2, εγκιβωτισμό των δοκιμών σε ρητίνη, λείανση με χαρτιά 400, 600 και 1000 grit και στίλβωση με αιώρημα διαμαντόπαστας κοκκομετρίας 3μm. Η χημική προσβολή των δοκιμών των περικοχλίων έγινε με αντιδραστήριο HCl/FeCl<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O ενώ του σωλήνα με αντιδραστήριο Marble's.

Η παρατήρηση και φωτογράφιση έγινε στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Leitz σε μεγεθύνσεις 50 – 1000X.

**Έλεγχος επιφανειών θραύσης:** πραγματοποιήθηκε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) του Εργαστηρίου Υλικών σε μεγεθύνσεις έως 3000X.

**Μικροσκοπική χημική ανάλυση:** Πραγματοποιήθηκε με αναλυτή EDAX ( Energy Dispersive Analysis with X-rays) προσαρμοσμένο στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

## 2.5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η αιτία αστοχίας του περικοχλίου Π7 είναι ρηγμάτωση, η οποία οφείλεται στη επιλεκτική διάβρωση (αποψευδαργύρωση), που ενεργοποιήθηκε λόγω γαλβανικής διάβρωσης από την επαφή του ορειχάλκινου περικοχλίου με τον ανοξείδωτο σωλήνα/κωνικό δακτύλιο.  
Η επικάλυψη της επικαδμίσωσης στο περικόχλιο Π7 δεν παρείχε ικανοποιητική προστασία έναντι της γαλβανικής διάβρωσης. Το Π7 ανήκει στο δίκτυο εκδίδωσης θαλασσερμάτων με συχνή χρήση που επιφέρει συμπύκνωση υγρασίας παρέχοντας τον αναγκαίο ηλεκτρολύτη για την γαλβανική διάβρωση.
- Τα μεταχειρισμένα περικόχλια Π4 και Π6 (από το δίκτυο εκδίδωσης θαλασσερμάτων, όπως το Π7) ευρίσκονται σε αρχικά στάδια διάβρωσης και η επικαδμίσωση έχει διαλυθεί.
- Τα μεταχειρισμένα περικόχλια Π3 και Π5 (από το δίκτυο κατανομής 250>50 ) δεν εμφανίζουν προβλήματα διάβρωσης, παρ'ότι η επικαδμίσωση έχει ήδη διαλυθεί. Η χρήση του δικτύου αυτού δεν είναι συχνή και επομένως δεν υπάρχει συνεχής παρουσία υγρασίας/ηλεκτρολύτη για γαλβανική διάβρωση.
- Ο σωλήνας και ο κωνικός δακτύλιος δεν εμφανίζουν προβλήματα διάβρωσης.

## **2.6 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΡΟΔΕΛΕΣ ΕΠΑΦΩΝ ΑΠΟΖΕΥΚΤΗ 420KV**

Στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ανατέθηκε η διερεύνηση της αστοχίας ανοξειδωτων ροδελών επαφών αποζεύκτη 420kV. Οι αστοχίες είχαν τη μορφή τριμματικής διάβρωσης που κατέληγε σε περικρυσταλλική. Το υλικό κατασκευής είναι ο ανοξειδωτος χάλυβας ποιότητας 420 κατά AISI.

Στο Εργαστήριο Υλικών παραδόθηκαν ροδέλες που αστόχησαν κατά τη λειτουργία τους καθώς επίσης και ροδέλες ίδιας ποιότητας(ss 420) οι οποίες είχαν εμφανίσει διάβρωση στην επιφάνειά τους- χωρίς να έχουν χρησιμοποιηθεί- έπειτα από παραμονή στο περιβάλλον της βιομηχανικής περιοχής Βόλου για διάστημα 1 έτους. Σημειώνεται ότι οι ροδέλες έχουν υποστεί κατάλληλη διαμόρφωση πριν από τη χρήση τους.

### **2.6.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ**

Για τη διερεύνηση της αιτίας αστοχίας των ροδελών έγιναν οι παρακάτω έλεγχοι:

- ◆ Χημική ανάλυση
- ◆ Οπτική μεταλλογραφία
- ◆ Σκληρομέτρηση
- ◆ Βιβλιογραφική αναζήτηση του φαινομένου

### **2.6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων οδηγεί στα εξής συμπεράσματα:

Η αστοχία οφείλεται σε εργοδιάβρωση (Stress Corrosion Cracking) η οποία προκλήθηκε από το γεγονός ότι:

- ❖ Το υλικό έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και εμφανίζει μεγάλη σκληρότητα.
- ❖ Η περιεκτικότητα σε Cr και Ni είναι χαμηλές σε σχέση με αντίστοιχα υλικά που λειτουργούν σε παρόμοιες συνθήκες.
- ❖ Υπάρχει παρουσία παραμενουσών τάσεων από την κατεργασία της διαμόρφωσης.



## **2.7 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΜΙΝ ΚΛUCHEVSKAYA SOPKA (EX MAZURI)**

Στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας η διερεύνηση αστοχίας οδοντωτού τροχού. Οι αστοχίες είχαν τη μορφή αποφλοιώσης και μικρορηγμάτωσης στην υποεπιφάνεια. Στο Εργαστήριο Υλικών παραδόθηκαν με την ανάθεση της μελέτης εφτά (7) σπασμένα τμήματα.

### **2.7.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ**

Για την διερεύνηση της αστοχίας του οδοντωτού τροχού έγιναν οι παρακάτω έλεγχοι:

- ◆ Θραυσεογραφική Επιθεώρηση
- ◆ Μεταλλογραφική Ανάλυση

### **2.7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η αποφλοιώση των επιφανειών των δοντιών του οδοντωτού τροχού συχνά προκαλείται από δύο λόγους: (α) καταστρεπτική σημειακή διάβρωση και (β) υπερφόρτιση. Κατά την μελέτη δεν παρουσιάστηκαν σημάδια ανάπτυξης σημειακής διάβρωσης στις επιφάνειες των τμημάτων των δοντιών του οδοντωτού τροχού. Σε αντίθεση η παρουσία μικρορωγμών στην υποεπιφάνεια δηλώνει ότι η αποφλοιώση προκλήθηκε από υπερφόρτιση κατά τη διάρκεια λειτουργίας του οδοντωτού τροχού. Αυτό το αποτέλεσμα ενισχύεται και από τη δυναμική ανάλυση του κύριου προωθητικού συστήματος που έγινε από το Εργαστήριο Μηχανικής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δηλώνοντας σημαντική υπερφόρτιση λόγω επαφής του διχτύου ψαρέματος με την προπέλα. Αυτή η υπερφόρτιση προκάλεσε και την τελική γρήγορη θραύση των δοντιών του τροχού.

Η αστοχία τελικά των δοντιών του τροχού επιτεύχθηκε από υπερφόρτιση κατά τη λειτουργία. Αυτό το αποτέλεσμα υποστηρίζεται από την αποφλοιώση/ ρηγμάτωση της υποεπιφάνειας που παρατηρήθηκαν στα σπασμένα τεμάχια των δοντιών.

## **2.8 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΖΥΓΚΙΩΝ ΑΝΑΒΑΤΟΡΩΝ (Ν.Ρ.Κ)**

Στο Εργαστήριο Υλικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Ε.Υ.Π.Θ.) δύο (2) ζυγκιά αναβατόρων (Ν.Ρ.Κ.), τα οποία είχαν αστοχήσει λόγω θραύσης, με σκοπό την εξακρίβωση των αιτίων της αστοχίας τους.

### **2.8.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ**

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξακρίβωση των αιτίων αστοχίας των ζυγκιών, περιελάμβανε τους παρακάτω εργαστηριακούς ελέγχους:

- εξωτερικός οπτικός έλεγχος των ζυγκιών
- χημική ανάλυση του υλικού
- στερεοσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης
- μεταλλογραφική ανάλυση για τον καθορισμό της μικροδομής του υλικού

### **2.8.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Λαμβάνοντας υπόψη την συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών ελέγχων, μπορούν να διατυπωθούν τα παρακάτω συμπεράσματα, που αιτιολογούν την αστοχία των ζυγκιών σε θραύση:

- i) Η θραύση των ζυγκιών προήλθε από *κόπωση*. Δεδομένης, μάλιστα, της απουσίας πλαστικών παραμορφώσεων στα ζυγκιά, το πιθανότερο είναι ότι πρόκειται για *πολυκυκλική κόπωση* (high-cycle fatigue). Κατά την πολυκυκλική κόπωση τα επαναλαμβανόμενα φορτία που καταπονούν το υλικό δεν υπερβαίνουν το όριο διαρροής, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται γενικευμένη πλαστικότητα στο υλικό.
- ii) Το μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας ζωής ενός υλικού που υφίσταται πολυκυκλική κόπωση αναλύσκεται στην *πυρήνωση* του αρχικού ρήγματος. Η πυρήνωση των ρηγμάτων λαμβάνει χώρα σε ευνοϊκές για τον σκοπό αυτό θέσεις της εξωτερικής επιφάνειας του υλικού (*ενδολίσθησεις* και *εξολίσθησεις*). Στα ζυγκιά οι θέσεις αυτές προσφέρονται από τη *ζώνη υψηλής τραχύτητας* (τρόχισμα), η οποία διατρέχει την εξωτερική επιφάνειά τους.



- iii) Διαπιστώθηκε ότι πράγματι το αρχικό ρήγμα πυρηνώθηκε ακριβώς επάνω στη ζώνη υψηλής τραχύτητας και στη συνέχεια προωθήθηκε σταδιακά, σε κάθε κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης του ζυγκιού. Τελικά, το μέγεθος του ρήγματος αναπτύχθηκε τόσο, ώστε η εναπομείνασα διατομή του οριζόντιου τμήματος του ζυγκιού δεν ήταν ικανή να αντέξει το επιβαλλόμενο φορτίο, με αποτέλεσμα την απότομη θραύση του.
- iv) Η θέση του αρχικού ρήγματος βρίσκεται στην επιφάνεια που έρχεται σε άμεση επαφή με το φορτίο και κοντά στην καμπυλότητα. Στα σημεία αυτά οι τάσεις είναι εφελκυστικές και πιθανότατα αρκετά υψηλές, καθώς η ύπαρξη της καμπυλότητας λειτουργεί σαν σημείο συγκέντρωσης των τάσεων. Η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στην περιοχή αυτή αποτελεί πρόσθετο παράγοντα, που ευνοεί την πυρήνωση και διάδοση ενός ρήγματος κόπωσης.
- v) Η χημική ανάλυση και η ανάλυση της μικροδομής του υλικού δεν έδειξαν ουσιαστικές αποκλίσεις από τις προδιαγραφές, γεγονός που ελαχιστοποιεί την πιθανότητα να ευθύνεται η σύσταση ή η θερμική κατεργασία του υλικού για την αστοχία.

## **2.9 ΜΕΛΕΤΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΠΕΙΡΟΥ**

Στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ανατέθηκε μελέτη αστοχίας για την διερεύνηση αιτιών θραύσης πείρων συγκράτησης στεφάνης κύλισης επικλινούς ξηραντήρα λιπασμάτων. Παραδόθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών 3 πείροι εκ των οποίων :

- Η επιφάνεια θραύσης των πείρων 1 και 3 είχε υποστεί εκτεταμένη φθορά λόγω μεγάλης χρονικά έκθεσης της στο περιβάλλον, μετά την θραύση. Οι επιφάνειες θραύσης ήταν έντονα οξειδωμένες και υπήρχαν εμφανή σημάδια παραμόρφωσης από χτυπήματα. Ως αποτέλεσμα η μελέτη των επιφανειών τους ήταν εξαιρετικά δύσκολη.
- Ο πείρος Νο 2 δεν παρουσίαζε εμφανή σημάδια φθοράς ή ρηγμάτωσης

### **2.9.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ**

Η πειραματική διαδικασία για την διερεύνηση των αιτιών θραύσης του πείρου περιελάμβανε τις εξής εργασίες:

- Χημική ανάλυση του υλικού και αντιστοίχιση σύμφωνα με τις προδιαγραφές AFNOR και DIN.
- Μικροσκληρομετρήσεις
- Στερεοσκοπική εξέταση της επιφάνειας θραύσης
- Εξέταση της επιφάνειας θραύσης με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)
- Φωτογράφιση της επιφάνειας θραύσης
- Μεταλλογραφική εξέταση του δοκιμίου (εγκιβωτισμός, λείανση, στίλβωση, χημική προσβολή με Nital 2% και φωτογράφιση)

### **2.9.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα :

1. Η αιτία αστοχίας του πείρου είναι πολυκυκλική κόπωση (High Cycle Fatigue). Το ρήγμα της κόπωσης ξεκίνησε από την επιφάνεια του πείρου διαδόθηκε προς το

εσωτερικό του. Το μήκος του ρήγματος κόπωσης καταλαμβάνει περίπου το 1/6 της διαμέτρου του πείρου.

2. Η φόρτιση του πείρου δεν ήταν αποκλειστικά καμπτική αλλά υπήρξε και στρεπτική συνιστώσα.

## **2.10 ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ**

Σε μια προσπάθεια ομαδοποίησης των μελετών που έχουν διεξαχθεί από το Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας παρατηρείται ότι από τις εννέα μελέτες αστοχίας οι τρεις οφείλονται σε διάβρωση η οποία είναι αποτέλεσμα του περιβάλλοντος λειτουργίας και δύο είναι αποτέλεσμα κόπωσης. Μια άλλη ομάδα αποτελούν οι αστοχίες που οφείλονται σε συνθήκες λειτουργίας μη κατάλληλες για το υλικό όπως είναι η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες ή η υπερφόρτιση. Στην τελευταία ομάδα ανήκουν οι μελέτες που αφορούν σε ατέλειες του υλικού στα οποία οφείλεται και η εργοδιάβρωση.

Τα παραπάνω αίτια αποτελούν και τις βασικές αιτίες αστοχίας όπως αυτές συζητήθηκαν και παραπάνω. Βασικός παράγοντας είναι το περιβάλλον λειτουργίας, οι ατέλειες του υλικού όπως και οι μη κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας αλλά και ο μηχανισμός της κόπωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ

### 3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στη μελέτη, παρουσίαση των εργαστηριακών ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν καθώς και ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών των ελέγχων.

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η παρούσα μελέτη αφορά στη μελέτη παλαιού χάλυβα κατασκευής σιδηροδρομικών γεφυρών. Στα πλαίσια αυτής ελήφθησαν δείγματα από δύο σιδηροδρομικές γέφυρες, Δίμηκος και Εύηνος, καθώς και δείγματα από ήλους, αφού πρόκειται για ηλωτές γέφυρες, με σκοπό την ταυτοποίηση της ποιότητας του υλικού και την αντιστοίχισή του με σύγχρονες προδιαγραφές. Έτσι από τα δείγματα που παρελήφθησαν εξήχθησαν δοκίμια για τους εργαστηριακούς ελέγχους οι οποίοι περιελάμβαναν μακροσκοπικό και στερεοσκοπικό οπτικό έλεγχο, χημική ανάλυση, δοκιμές εφελκυσμού, δοκιμές κρούσης, μεταλλογραφική ανάλυση μικροδομής, μικροσκληρομερτήσεις και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.

Επίσης μελετήθηκε η συμπεριφορά του χάλυβα σε κόπωση η οποία χωρίζεται σε τρία στάδια αυτό της πυρήνωσης των ρηγμάτων, της ανάπτυξης τους και την τελική αστοχία. Για να εμφανιστεί μια αστοχία από κόπωση απαιτούνται α) μια αρκετά υψηλή εφελκυστική τάση β) μια αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία και γ) ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης. Από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης προέκυψε ότι η χημική σύσταση των ελασμάτων είναι τέτοια που δεν οδηγεί σε αντιστοίχιση του χάλυβα με κάποιον χάλυβα σύγχρονων προδιαγραφών.

Η μικροδομή του χάλυβα αποτελείται από φερρίτη και εγκλείσματα τα οποία έχουν κυρίως επιμήκη μορφολογία και διατάσσονται παράλληλα προς τη διεύθυνση έλασης. Σε μικρότερο ποσοστό εμφανίζονται και ως σωματίδια σφαιρικού σχήματος. Γενικά η μικροδομή παρουσιάζει έντονη διαστρωμάτωση σαν αποτέλεσμα της κατεργασίας έλασης.

Η μικροσκληρομέτρηση έδειξε για το έλασμα από το Δίμηκο ότι η τιμή της σκληρότητας στο φερρίτη είναι 170 HV<sub>0.2</sub> ενώ στα εγκλείσματα έδειξε 425 HV<sub>0.2</sub>. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον Εύηνο είναι 150 HV<sub>0.2</sub> και 420 HV<sub>0.2</sub>.

Πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές κρούσης (Charpy V-notch test). Από κάθε έλασμα εξήχθησαν τρία δοκίμια κρούσης, τα οποία υπεβλήθησαν σε δοκιμή κρούσης Charpy σε σχήμα εγκοπής V, σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 10045-1.

Το τεστ κρούσης είναι ένας απλός τρόπος για να προσδιοριστεί η κλίση του υλικού για ψαθυρή συμπεριφορά. Ένα κοινώς χρησιμοποιούμενο τεστ είναι το Charpy V-notch test. Πρόκειται για ένα σφυρί που λειτουργεί σαν εκκρεμές και απελευθερώνεται από καθορισμένο ύψος χτυπώντας το δοκίμιο με μεγάλη ταχύτητα και ανυψώνεται σε ύψος μικρότερο από το αρχικό. Η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται από την εγκοπή μπορεί να υπολογιστεί από το μέγιστο ύψος που ανυψώνεται το σφυρί μετά το σπάσιμο του δοκιμίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το τεστ διεξάγεται σε μια μεγάλη κλίμακα θερμοκρασιών για αξιόπιστα αποτελέσματα.

Με σκοπό τον προσδιορισμό του βαθμού διάβρωσης των ήλων προετοιμάστηκαν κατάλληλα μεταλλογραφικά δοκίμια. Από τους εργαστηριακούς ελέγχους προέκυψε ότι οι μικροδομές των ήλων που παρελήφθησαν από τις δύο γέφυρες είναι διαφορετικές. Η μικροδομή του ήλου από τον Εύηνο αποτελείται από φερρίτη και εγκλείσματα και προσομοιάζει την μικροδομή του αντίστοιχου ελάσματος ενώ η

Παρατηρήθηκε επίσης διάβρωση στα όρια των κόκκων η οποία είναι αναμενόμενη από τη χρήση.

### 3.2 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Από κάθε έλασμα εξετάστηκε ένα δοκίμιο χημικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	C	Mn	Si	Al	P	S	N	Cu
Γέφυρα Δίμηκου	0.05	0.08	3.71	0.09	>0.17	>0.12	>0.08	<0.01
Γέφυρα Ευήνου	0.02	0.25	3.87	0.02	>0.17	>0.12	0.04	<0.01

Παρατηρήθηκε μεγάλη διακύμανση των τιμών στην περιεκτικότητα σε Si και C και αυτό αποδίδεται στην ανομοιομορφία των δειγμάτων από την κατασκευή τους. Επίσης η περιεκτικότητα σε Si, P, S και N είναι ιδιαίτερα υψηλή και εκτός σύγχρονων προδιαγραφών.

### 3.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΡΟΥΣΗΣ

Τα αποτελέσματα των δοκιμών κρούσης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

	1 <sup>ο</sup> δοκίμιο (J)	2 <sup>ο</sup> δοκίμιο (J)	3 <sup>ο</sup> δοκίμιο (J)	Μέσος όρος (J)
Γέφυρα Δίμηκου	6	6	7	6
Γέφυρα Ευήνου	13	14	13	13

### 3.4 ΔΙΜΗΚΟΣ

Πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακοί έλεγχοι που περιλαμβάνουν: Δοκιμές εφελκυσμού και δοκιμές κόπωσης και Μεταλλογραφία δοκιμίων κόπωσης και Θραυστογραφία δοκιμίων κόπωσης . Οι εργαστηριακοί έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια.

Τα κύρια αποτελέσματα είναι τα εξής:

#### 3.4.1 Χημική ανάλυση/Αναγνώριση Υλικού

- Μεγάλες διακυμάνσεις χημικής σύστασης (κυρίως C και Si)
- Υψηλό ποσοστό Si ( 3.7%)
- Υψηλά ποσοστά P,S και N
- Χαμηλό ποσοστό Mn
- Χαμηλός λόγος Mn/S

Η χημική ανάλυση είναι τέτοια ώστε να μην είναι δυνατή η αντιστοίχιση με κάποιο χάλυβα σύγχρονων προδιαγραφών.

#### 3.4.2 Μικροδομή

- Φερριτική με έντονη διαστρωμάτωση ( banding ) και υψηλό ποσοστό διαμήκων εγκλεισμάτων παράλληλων με την διεύθυνση έλασης
- Μικρορωγμές σε επιφανειακό στρώμα διάβρωσης και απολήξεις εγκλεισμάτων στην επιφάνεια.

### 3.4.3 Μηχανική συμπεριφορά σε Εφέλκυσμό

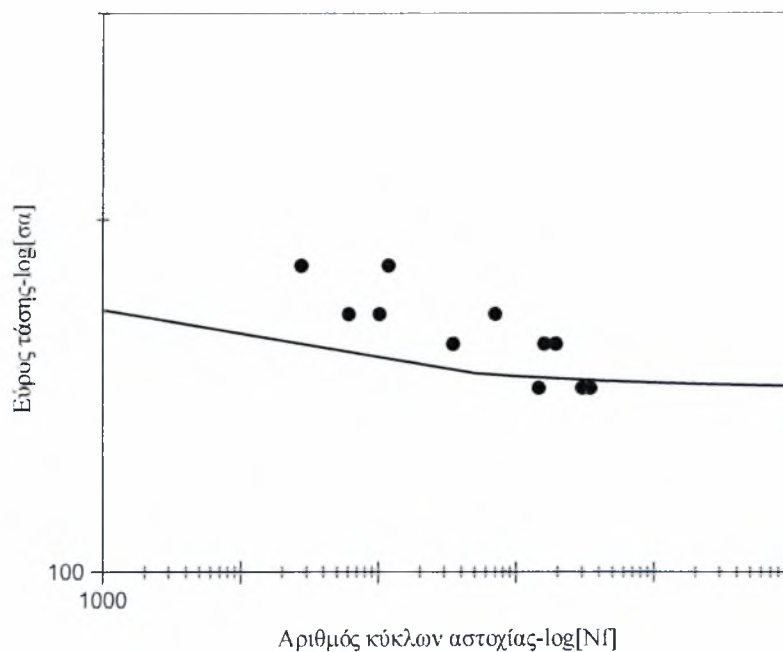
Το υλικό παρουσιάζει όριο διαρροής 246-275MPa και όριο αντοχής 261-316MPa ανάλογα με το σημείο δειγματοληψίας. Το υλικό έχει χαμηλή ολκιμότητα πράγμα που φαίνεται από:

- Χαμηλή επιμήκυνση ( της τάξης του 2%)
- Χαμηλές τιμές δυσθραυστότητας Charpy (6J)

### 3.4.4 Μηχανική Συμπεριφορά σε Κόπωση

Το όριο διαρκούς αντοχής προσδιορίστηκε στα 143 Mpa με τη βοήθεια της καμπύλης Woehler η οποία παρουσιάζεται στο γράφημα που ακολουθεί. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε αποτίμηση των πειραμάτων κόπωσης σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 3. Η αποτίμηση των πειραμάτων κόπωσης, στηρίχτηκε σε πλήθος 11 δοκιμών.

Γράφημα 3.1: Καμπύλη Woehler για τη γέφυρα του Δίμηκου



### 3.4.5 Μεταλλογραφικές Παρατηρήσεις δοκιμών κόπωσης

- Επιφανειακές ατέλειες με την μορφή οξειδώσεων, μικρορηγματώσεων και αποκολλήσεων τύπου exfoliation λόγω του έντονου banding και των διαμήκων ψαθυρών εγκλεισμάτων
- Μικρορωγμές που ξεκινούν από την επιφάνεια και με όδευση προς το εσωτερικό του δοκιμίου
- Εσωτερικές ρηγματώσεις στο εσωτερικό που σχετίζονται με την παρουσία των εγκλεισμάτων (συνδέουν μεταξύ τους τα εγκλείσματα)



### 3.4.6 Θραυστογραφία δοκιμίων κόπωσης

- Έντονη παρουσία γραμμώσεων (striations). Αποτυπώματα προώθησης ρωγμής σε κόπωση (striations) μόνο στα δοκίμια με μεγάλη διάρκεια ζωής ( $1 \times 10^6$  κύκλους και άνω). Οι περιοχές ομαλής ανάπτυξης του ρήγματος κόπωσης διακόπτεται από ψαθυρές περιοχές όπου υπάρχει είτε καθαρή διάσχιση του υλικού (cleavage) είτε θραύση των εγκλεισμάτων. Η διαδικασία αυτή επιταχύνει την ανάπτυξη του ρήγματος κόπωσης. Παρουσία επιφανειακής ζώνη έντονης περικρυσταλλικής θραύσης (συνδυασμός διάβρωσης και υψηλής περιεκτικότητας σε P και S).
- Απουσία striations σε δοκίμια με μικρή διάρκεια ζωής. Παρουσία ψαθυρών περιοχών όπως και παραπάνω.

## 3.5 ΕΥΗΝΟΣ

Πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακοί έλεγχοι που περιλαμβάνουν: Δοκιμές εφελκυσμού και Δοκιμές κόπωσης και Μεταλλογραφία δοκιμίων κόπωσης και Θραυστογραφία δοκιμίων κόπωσης. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια.

Τα κύρια αποτελέσματα είναι τα εξής:

### 3.5.1 Χημική ανάλυση/Αναγνώριση Υλικού

- Μεγάλες διακυμάνσεις χημικής σύστασης (κυρίως C και Si)
- Υψηλό ποσοστό Si ( 3.5%)
- Υψηλά ποσοστά P,S και N
- Χαμηλό ποσοστό Mn
- Χαμηλός λόγος Mn/S

Η χημική ανάλυση είναι τέτοια ώστε να μην είναι δυνατή η αντιστοίχιση με κάποιο χάλυβα σύγχρονων προδιαγραφών.

### 3.5.2 Μικροδομή

- Φερριτική με έντονη διαστρωμάτωση ( banding ) και υψηλό ποσοστό διαμήκων εγκλεισμάτων παράλληλων με την διεύθυνση έλασης
- Μικρορωγμές σε επιφανειακό στρώμα διάβρωσης

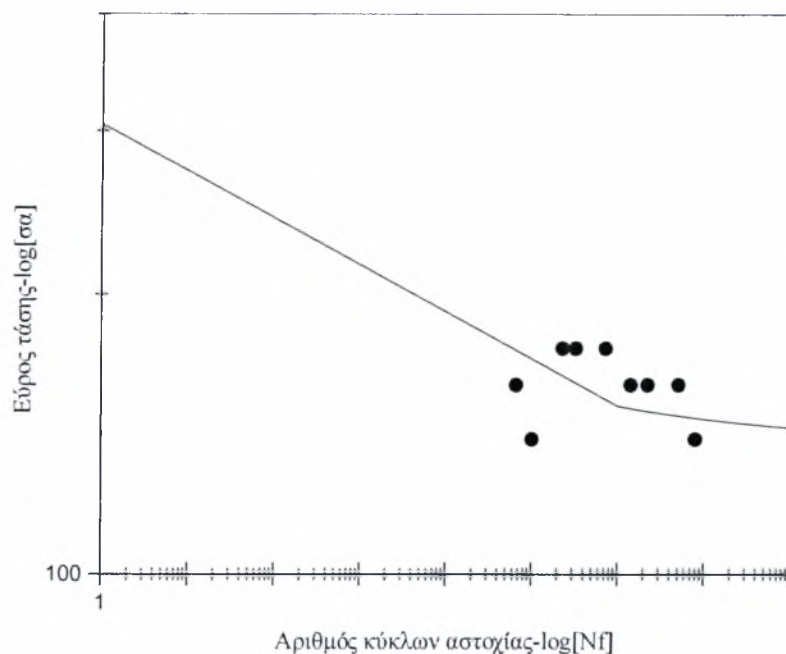
### 3.5.3 Μηχανική συμπεριφορά σε Εφελκυσμό

Το υλικό παρουσιάζει όριο διαρροής 246-257Mpa και όριο αντοχής 285-319Mpa ανάλογα με το σημείο δειγματοληψίας. Το υλικό έχει χαμηλή ολκιμότητα πράγμα που φαίνεται από:

- Χαμηλή επιμήκυνση ( της τάξης του 3%)
- Χαμηλές τιμές δυσθραυστότητας Charpy (13J)

### 3.5.4 Μηχανική Συμπεριφορά σε Κόπωση

Το όριο διαρκούς αντοχής προσδιορίστηκε στα 138Mpa με τη βοήθεια της καμπύλης Woehler. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε αποτίμηση των πειραμάτων κόπωσης σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 3. Η αποτίμηση των πειραμάτων κόπωσης, στηρίχτηκε σε πλήθος 9 δοκιμίων.



Γράφημα 3.2: Καμπύλη Woehler για τη γέφυρα του Εύηνου

### 3.5.5 Μεταλλογραφικές Παρατηρήσεις δοκιμών κόπωσης

- Επιφανειακές ατέλειες με την μορφή οξειδώσεων, μικρορηγματώσεων και αποκολλήσεων τύπου exfoliation λόγω του έντονου banding και των διαμήκων ψαθυρών εγκλεισμάτων
- Μικρορωγμές που ξεκινούν από την επιφάνεια και με όδευση προς το εσωτερικό του δοκιμίου
- Εσωτερικές ρηγματώσεις στο εσωτερικό που σχετίζονται με την παρουσία των εγκλεισμάτων (συνδέουν μεταξύ τους τα εγκλείσματα)

### 3.5.6 Θραυστογραφία δοκιμών κόπωσης

- Έντονη παρουσία striations (αποτυπώματα προώθησης ρωγμής σε κόπωση) μόνο στα δοκίμια με μεγάλη διάρκεια ζωής ( $1 \times 10^6$  κύκλους και άνω). Οι περιοχές ομαλής ανάπτυξης του ρήγματος κόπωσης διακόπτεται από ψαθυρές περιοχές όπου υπάρχει είτε καθαρή διάσχιση του υλικού (cleavage) είτε θραύση των εγκλεισμάτων. Η διαδικασία αυτή επιταχύνει την ανάπτυξη του ρήγματος κόπωσης.
- Απουσία striations σε δοκίμια με μικρή διάρκεια ζωής. Παρουσία επιφανειακής ζώνη έντονης περικρυσταλλικής θραύσης (συνδυασμός διάβρωσης και υψηλής περιεκτικότητας σε P και S). Παρουσία ψαθυρών περιοχών όπως και παραπάνω.



### 3.6 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ- ΓΕΦΥΡΑ ΔΙΜΗΚΟΥ

Από τα δείγματα που παρελήφθησαν, εξήχθησαν δοκίμια για τους απαραίτητους εργαστηριακούς ελέγχους που περιελάμβαναν δοκιμές εφελκυσμού, δοκιμές κόπωσης, μεταλλογραφική ανάλυση δοκιμίων κόπωσης, και θραυστογραφία δοκιμίων κόπωσης.

**Δοκιμές εφελκυσμού:** Πραγματοποιήθηκαν οκτώ δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή E8m-94a κατά ASTM. Χρησιμοποιήθηκε η μηχανή MTS 250 kN.

**Δοκιμές κόπωσης:** Πραγματοποιήθηκαν δώδεκα δοκιμές κόπωσης σύμφωνα με την προδιαγραφή E466 κατά ASTM. Χρησιμοποιήθηκε η μηχανή MTS 100 kN.

**Μεταλλογραφικές αναλύσεις:** Πραγματοποιήθηκαν σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές των δοκιμίων κόπωσης. Η προετοιμασία των μεταλλογραφικών δοκιμίων περιέλαβε κοπή με λεπτοτόμο Struers “Accutom 2”, εγκιβωτισμό των δοκιμίων σε ρητίνη, λείανση με χαρτιά 120, 320, 500 και 1000 grit και στίλβωση με αιώρημα διαμαντόπαστας κοκκομετρίας 1  $\mu\text{m}$ . Η χημική προσβολή των δοκιμίων έγινε με αντιδραστήριο Nital 2%. Η παρατήρηση και φωτογράφιση έγινε σε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Leitz “Aristomet” σε μεγεθύνσεις x50 – x1000.

**Θραυστογραφία:** Πραγματοποιήθηκε στις επιφάνειες θράυσης των δοκιμίων κόπωσης σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) JEOL JSM-5310 το οποίο είναι ένα από τα πιο εύχρηστα όργανα για την έρευνα της μικροδομής των μεταλλικών υλικών.

### 3.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ- ΓΕΦΥΡΑΣ ΔΙΜΗΚΟΥ

#### 3.7.1 Δοκιμές εφελκυσμού

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από τις δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια που ελήφθησαν από διαφορετικές θέσεις καθώς και οι μέσες τιμές τους. Πραγματοποιήθηκαν 8 δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή E 8M-94a κατά ASTM. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών διατηρήθηκε σταθερός ρυθμός μετατόπισης ίσος με 2mm/min.

Αριθμός δοκιμών	Θέση ελάσματος	Πειραματική δοκιμή
2	Κ.Δ.	Εφελκυσμός
3	Άνω Πέλμα	Εφελκυσμός
3	Κάτω Πέλμα	Εφελκυσμός

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Θέση ελάσματος	Τεχνητό όριο διαρροής $R_{p0.2}$ [MPa]	Όριο αντοχής $R_m$ [MPa]	Παραμόρφωση θραύσης $A_{25}$ [%]	Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης $W$ [MJ/m <sup>3</sup> ]
Κ.Δ.	253.75	254.75	1.10	2.75
	266.80	267.35	1.20	3.40
<b>Μέση Τιμή</b>	<b>260.275</b>	<b>261.05</b>	<b>1.15</b>	<b>3.075</b>
Άνω Πέλμα	257.30	286.40	1.90	5.25
	236.20	252.55	1.10	2.80
<b>Μέση Τιμή</b>	<b>246.75</b>	<b>269.475</b>	<b>1.50</b>	<b>4.025</b>
Κάτω Πέλμα	275.55	312.85	2.60	7.80
	274.90	318.45	3.05	9.30
<b>Μέση Τιμή</b>	<b>275.225</b>	<b>315.65</b>	<b>2.825</b>	<b>8.55</b>

Σημειώνεται ότι δύο δοκίμια έσπασαν εκτός μήκους μέτρησης

### 3.7.2 Δοκιμές κόπωσης

Πραγματοποιήθηκαν 12 δοκιμές κόπωσης με σταθερό λόγο τάσεων  $R=-1$  και σε σταθερή συχνότητα  $f=20\text{Hz}$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα όπου το εύρος τάσης είναι  $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ .

Θέση ελάσματος	Εύρος τάσης – $\sigma_a$ [MPa]	Κύκλοι αστοχίας – $N_f$ [cycles]
Κ.Δ.	182.55	27510
	166	61189
	156.60	347699
	143.55	3019314
Άνω πέλμα	182.55	Έσπασε μέσα στην πάνω αρπάγη
	166	102348
	143.55	3449913
	156.60	1602873
Κάτω πέλμα	182.55	118800
	166	700140
	156.60	1932177
	143.55	1465250

### 3.7.3 Μεταλλογραφική ανάλυση

Τα δοκίμια στη συνέχεια εξετάστηκαν μεταλλογραφικά τόσο σε οπτικό όσο και σε Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης προκειμένου να συσχετιστεί η συμπεριφορά τους στις δοκιμές κόπωσης με τη μικροδομή τους καθώς και με την επιφανειακή κατάσταση του χάλυβα για κάθε περίπτωση. Στις επιφάνειες θραύσης των δοκιμών παρατηρούνται επιφανειακές ατέλειες με την μορφή οξειδώσεων, μικρορηγματώσεων

και αποκολλήσεων τύπου exfoliation λόγω του έντονου banding και των διαμήκων ψαθυρών εγκλεισμάτων.

Τα δοκίμια που αστόχησαν σε κύκλους μικρότερους από 700.000 παρουσιάζουν συγκριτικά μεγαλύτερο βαθμό επιφανειακής διάβρωσης και εγχοπών γεγονός που ευνοεί την γρήγορη έναρξη δημιουργίας ρήγματος κόπωσης. Το ρήγμα πυρηνώνεται στις επιφανειακές διαβρώσεις και στη συνέχεια διαδίδεται προς το εσωτερικό του υλικού διά μέσου των εγκλεισμάτων.

Το δοκίμιο που έσπασε μέσα στις αρπαγές συγκράτησης της μηχανής εμφανίζει διάβρωση στα συγκεκριμένα σημεία γεγονός που ευνόησε τη γρήγορη ανάπτυξη ρήγματος και την αστοχία.

#### **3.7.4 Θραυστογραφία**

Η επιφάνεια θραύσης των δοκιμίων κόπωσης εξετάστηκε στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM). Παρατηρήθηκε έντονη παρουσία striations (αποτυπώματα προώθησης ρωγμής σε κόπωση) μόνο στα δοκίμια με μεγάλη διάρκεια ζωής ( $1 \times 10^6$  κύκλους και άνω). Οι περιοχές ομαλής ανάπτυξης του ρήγματος κόπωσης διακόπεται από ψαθυρές περιοχές όπου υπάρχει είτε καθαρή διάσχιση του υλικού (cleavage) είτε θραύση των εγκλεισμάτων. Η διαδικασία αυτή επιταχύνει την ανάπτυξη του ρήγματος κόπωσης. Παρατηρήθηκε επιφανειακή ζώνη έντονης περικρυσταλλικής θραύσης (συνδυασμός διάβρωσης και υψηλής περιεκτικότητας σε P και S) στο δοκίμιο με διάρκεια ζωής 3.449.913 κύκλους.

Στα δοκίμια με μικρή διάρκεια ζωής η παρουσία των striations ήταν περιορισμένη. Επίσης παρατηρήθηκαν ψαθυρές.

### **3.8 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ-ΓΕΦΥΡΑ ΕΥΗΝΟΥ**

**Δοκιμές εφελκυσμού:** Πραγματοποιήθηκαν οκτώ δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή E8m-94a κατά ASTM. Χρησιμοποιήθηκε η μηχανή MTS 250 kN.

**Δοκιμές κόπωσης:** Πραγματοποιήθηκαν δώδεκα δοκιμές κόπωσης σύμφωνα με την προδιαγραφή E466 κατά ASTM. Χρησιμοποιήθηκε η μηχανή MTS 100 kN.

**Μεταλλογραφικές αναλύσεις:** Πραγματοποιήθηκαν σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές των δοκιμίων κόπωσης. Η προετοιμασία των μεταλλογραφικών δοκιμίων περιέλαβε κοπή με λεπτοτόμο Struers “Accutom 2”, εγκιβωτισμό των δοκιμίων σε ρητίνη, λείανση με χαρτιά 120, 320, 500 και 1000 grit και στίλβωση με αιώρημα διαμαντόπαστας κοκκομετρίας 1  $\mu\text{m}$ . Η χημική προσβολή των δοκιμίων έγινε με αντιδραστήριο Nital 2%. Η παρατήρηση και φωτογράφιση έγινε σε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Leitz “Aristomet” σε μεγεθύνσεις  $\times 50 - \times 1000$ .

**Θραυστογραφία:** Πραγματοποιήθηκε στις επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων κόπωσης σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) JEOL JSM-5310.

### **3.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ-ΓΕΦΥΡΑ ΕΥΗΝΟΥ**

#### **3.9.1 Δοκιμές εφελκυσμού**

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από τις δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια που ελήφθησαν από διαφορετικές θέσεις καθώς και οι μέσες τιμές τους. Πραγματοποιήθηκαν 8 δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή E 8M-94a κατά ASTM. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών διατηρήθηκε σταθερός ρυθμός μετατόπισης ίσος με 2mm/min.

Αριθμός δοκιμών	Θέση ελάσματος	Πειραματική δοκιμή
3	Κ.Δ.	Εφελκυσμός
3	Άνω Πέλμα	Εφελκυσμός
2	Κάτω Πέλμα	Εφελκυσμός

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού είναι τα παρακάτω:

Θέση ελάσματος	Τεχνητό όριο διαρροής $R_{p0.2}$ [MPa]	Όριο αντοχής $R_m$ [MPa]	Παραμόρφωση θραύσης $A_{25}$ [%]	Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης $W$ [MJ/m <sup>3</sup> ]
Κ.Δ.	249.44	296.13	3.08	8.73
	249.82	341.24	3.80	14.40
<b>Μέση Τιμή</b>	<b>249.63</b>	<b>318.69</b>	<b>3.44</b>	<b>11.57</b>
Άνω Πέλμα	263.15	278.12	2.41	6.27
	252.05	291.39	2.04	5.83
<b>Μέση Τιμή</b>	<b>257.60</b>	<b>284.76</b>	<b>2.23</b>	<b>6.05</b>
Κάτω Πέλμα	245.52	304.89	3.97	11.37
	247.48	294.58	2.83	7.99
<b>Μέση Τιμή</b>	<b>246.50</b>	<b>299.74</b>	<b>3.40</b>	<b>9.68</b>

Σημειώνεται ότι δύο δοκίμια έσπασαν εκτός μήκους μέτρησης

### 3.9.2 Δοκιμές κόπωσης

Πραγματοποιήθηκαν 12 δοκιμές κόπωσης με σταθερό λόγο τάσεων  $R=-1$  και σε σταθερή συχνότητα  $f=20\text{Hz}$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα όπου το εύρος τάσης είναι  $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ .

Θέση ελάσματος	Εύρος τάσης – $\sigma_a$ [MPa]	Κύκλοι αστοχίας – $N_f$ [cycles]
Κ.Δ.	175	325600
	160	65529
	160	5106288
	140	Το σταματήσαμε στα 8000000
Άνω πέλμα	175	228927
	160	1411839
	160	Έσπασε μέσα στην κάτω αρπάγη
	140	Έσπασε μέσα στην πάνω αρπάγη
Κάτω πέλμα	175	721971
	140	Έσπασε μέσα στην πάνω αρπάγη
	160	2227486
	140	101000

### 3.9.3 Μεταλλογραφική ανάλυση

Τα δοκίμια στη συνέχεια εξετάστηκαν μεταλλογραφικά τόσο σε οπτικό όσο και σε Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης προκειμένου να συσχετιστεί η συμπεριφορά τους στις δοκιμές κόπωσης με τη μικροδομή τους καθώς και με την επιφανειακή κατάσταση του χάλυβα.

Στις επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων παρατηρούνται επιφανειακές ατέλειες με την μορφή οξειδώσεων, μικρορηγματώσεων και αποκολλήσεων τύπου exfoliation λόγω του έντονου banding και των διαμήκων ψαθυρών εγκλεισμάτων.

Τα δοκίμια που αστόχησαν σε κύκλους μικρότερους από 1.000.000 παρουσιάζουν συγκριτικά μεγαλύτερο βαθμό επιφανειακής διάβρωσης και εγχοπών γεγονός που ευνοεί την γρήγορη έναρξη δημιουργίας ρήγματος κόπωσης. Το ρήγμα πυρηνώνεται στις επιφανειακές διαβρώσεις και στη συνέχεια διαδίδεται προς το εσωτερικό του υλικού διά μέσου των εγκλεισμάτων.

Τα δοκίμια που έσπασαν μέσα στις αρπαγές συγκράτησης της μηχανής εμφανίζουν διάβρωση στα συγκεκριμένα σημεία γεγονός που ευνόησε τη γρήγορη ανάπτυξη ρήγματος και την αστοχία.

### 3.9.4 Θραυστογραφία

Η επιφάνεια θραύσης των δοκιμίων κόπωσης εξετάστηκε στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM). Παρατηρήθηκε έντονη παρουσία striations (αποτυπώματα προώθησης ρωγμής σε κόπωση) μόνο στα δοκίμια με μεγάλη διάρκεια ζωής ( $1 \times 10^6$  κύκλους και άνω). Οι περιοχές ομαλής ανάπτυξης του ρήγματος κόπωσης διακόπεται από ψαθυρές περιοχές όπου υπάρχει είτε καθαρή διάσχιση του υλικού (cleavage) είτε θραύση των εγκλεισμάτων. Η διαδικασία αυτή επιταχύνει την ανάπτυξη του ρήγματος κόπωσης.

Στα δοκίμια με μικρή διάρκεια ζωής η παρουσία των striations ήταν περιορισμένη. Στα ίδια δοκίμια παρατηρήθηκε επιφανειακή ζώνη έντονης περικρυσταλλικής θραύσης (συνδυασμός διάβρωσης και υψηλής περιεκτικότητας σε P και S). Επίσης παρατηρήθηκαν ψαθυρές περιοχές.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ

### 4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεταλλογραφία των δοκιμίων που ελήφθησαν από τη γέφυρα του Δίμηκου και του Εύηνου.

#### 4.1 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

α) Ακολουθούν οι μεταλλογραφικές παρατηρήσεις που αφορούν τη γέφυρα του Δίμηκου:

Στις φωτογραφίες 1-6 έχουμε την παρουσία διάβρωσης και εγχοπών και την αρχή δημιουργίας μικρορηγματώσεων στην επιφάνεια. Επίσης έχουμε την παρουσία πλαστικής παραμόρφωσης, τη δημιουργία μικρορηγματώσεων και την παρουσία κλιμακωτής μορφολογίας της επιφάνειας θραύσης.

Στις φωτογραφίες 7-10 έχουμε την παρουσία διάβρωσης και την αρχή δημιουργίας ρηγματώσεων που διαδίδεται στο εσωτερικό δια μέσου των εγκλεισμάτων καθώς και την παρουσία κλιμακωτής μορφολογίας επιφάνειας θραύσης.

Στις φωτογραφίες 11-16 παρουσιάζεται η κλιμακωτή μορφολογία επιφάνειας με αποκολλήσεις εγκλεισμάτων, απολήξεις εγκλεισμάτων στην επιφάνεια καθώς και τη μικροδομή του δοκιμίου.

Στις φωτογραφίες 17-22 έχουμε την παρουσία κλιμακωτής μορφολογίας της επιφάνειας θραύσης καθώς και την παρουσία διάβρωσης στην επιφάνεια του δοκιμίου, ανάπτυξη ρηγματώσεων και διάδοση προς το εσωτερικό του δοκιμίου δια μέσου των εγκλεισμάτων και ανάπτυξη network ρωγμών δια μέσου των εγκλεισμάτων στο εσωτερικό του δοκιμίου.

Στις φωτογραφίες 23-25 έχουμε την παρουσία πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια θραύσης, ανάπτυξη μικρορηγματώσεων και κλιμακωτή μορφολογία. Παρουσία έντονης διάβρωσης στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Στις φωτογραφίες 26-32 έχουμε την παρουσία διάβρωσης και εγχοπών στην επιφάνεια του δοκιμίου καθώς και την ανάπτυξη ρηγματώσεων στην επιφάνεια και στην επιφάνεια θραύσης που κατευθύνονται προς το εσωτερικό του δοκιμίου δια μέσου των εγκλεισμάτων. Απουσία πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια θραύσης.

Στις φωτογραφίες 33-36 έχουμε κλιμακωτή μορφολογία επιφάνειας θραύσης και ανάπτυξη ρωγμών στην επιφάνεια θραύσης και στο εσωτερικό του δοκιμίου που αναπτύσσονται δια μέσου των εγκλεισμάτων.

Στις φωτογραφίες 37-40 έχουμε την παρουσία κλιμακωτής επιφάνειας θραύσης και την ανάπτυξη ρηγμάτων.

Στις φωτογραφίες 41-45 έχουμε την παρουσία κλιμακωτής επιφάνειας θραύσης και την ανάπτυξη ρωγμών στο εσωτερικό του δοκιμίου δια μέσου εγκλεισμάτων καθώς και απολήξεις εγκλεισμάτων στην επιφάνεια.

Στις φωτογραφίες 46-50 έχουμε κλιμακωτή επιφάνεια θραύσης καθώς και απολήξεις εγκλεισμάτων και ελαφρά διάβρωση στην επιφάνεια.

Στις φωτογραφίες 51-54 έχουμε κλιμακωτή επιφάνεια θραύσης και ελαφρά διάβρωση στην επιφάνεια καθώς και απολήξεις εγκλεισμάτων.

Στις φωτογραφίες 55-57 έχουμε διάβρωση στην επιφάνεια του δοκιμίου και κλιμακωτή επιφάνεια θραύσης.

β) Ακολουθούν οι μεταλλογραφικές παρατηρήσεις που αφορούν τη γέφυρα του Εύηνου:

Στις φωτογραφίες 1-4 έχουμε ρηγματώσεις στην επιφάνεια θραύσης και διαβρώσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου

Στις φωτογραφίες 5-6 έχουμε την ανάπτυξη μικρορωγμών στον πυθμένα διαβρώσεων και στο εσωτερικό του δοκιμίου

Στις φωτογραφίες 7-12 έχουμε την παρουσία πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια θραύσης και ανάπτυξη ρηγματώσης καθώς και παρουσία διάβρωσης στην επιφάνεια

Στις φωτογραφίες 13-16 έχουμε απουσία πλαστικής παραμόρφωσης και αποκολλήσεις εγκλεισμάτων στην επιφάνεια θραύσης

Στις φωτογραφίες 17-21 έχουμε ρωγμή στο κέντρο της επιφάνειας θραύσης και παρουσία επιφανειακών εγκοπών και διαβρώσεων

Στις φωτογραφίες 22-25 έχουμε μικρορηγματώσεις που αναπτύσσονται στον πυθμένα διαβρώσεων και διαδίδονται στο εσωτερικό του δοκιμίου και αποφλοιώσεις της επιφάνειας θραύσης

Στις φωτογραφίες 26-28 έχουμε την ανάπτυξη ρήγματος στην επιφάνεια και τη διάδοση του προς το εσωτερικό δια μέσου των εγκλεισμάτων και επιφανειακές ατέλειες όπως διαβρώσεις και αποφλοιώσεις

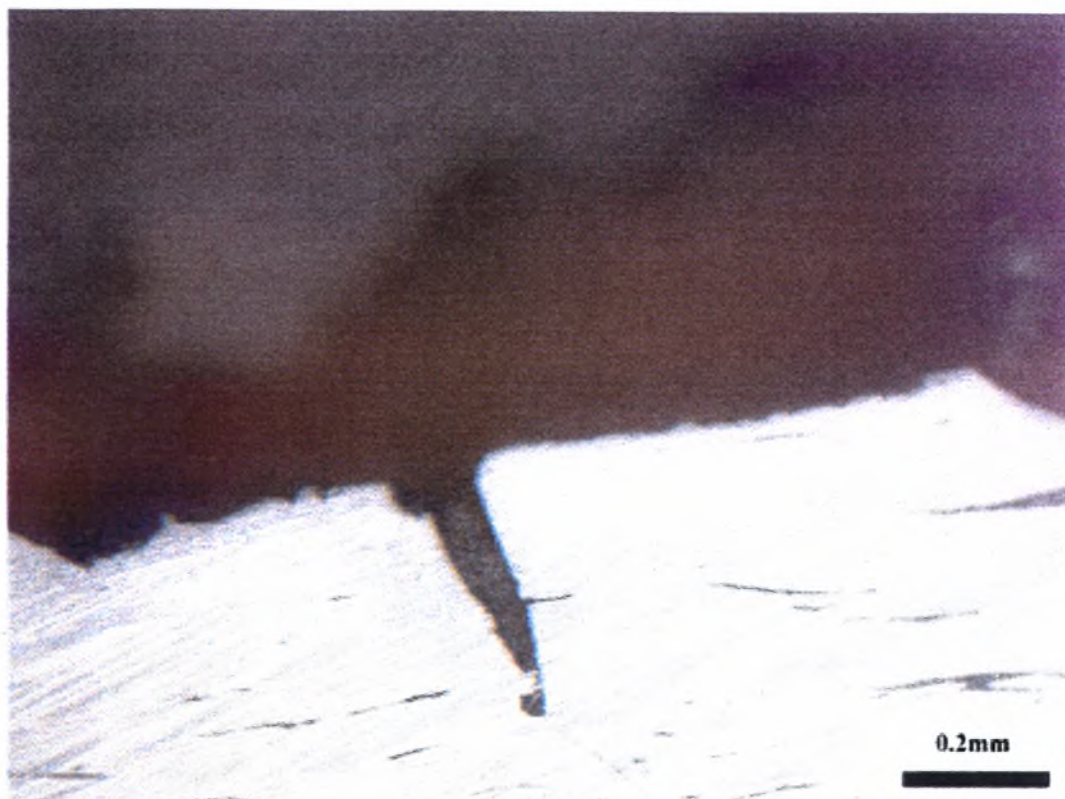
Στις φωτογραφίες 29-31 έχουμε διάσχιση του δοκιμίου από ρωγμή που ξεκινάει από την επιφάνεια θραύσης και καταλήγει στην απέναντι επιφάνεια δείγμα της μικρής ολκιμότητας, εγκλείσματα μεγάλου μεγέθους και παρουσία διάβρωσης στην επιφάνεια

Στις φωτογραφίες 32-33 έχουμε διάδοση της ρωγμής δια μέσου των εγκλεισμάτων στο εσωτερικό του δοκιμίου και ανάπτυξη ρωγμής στην επιφάνεια θραύσης

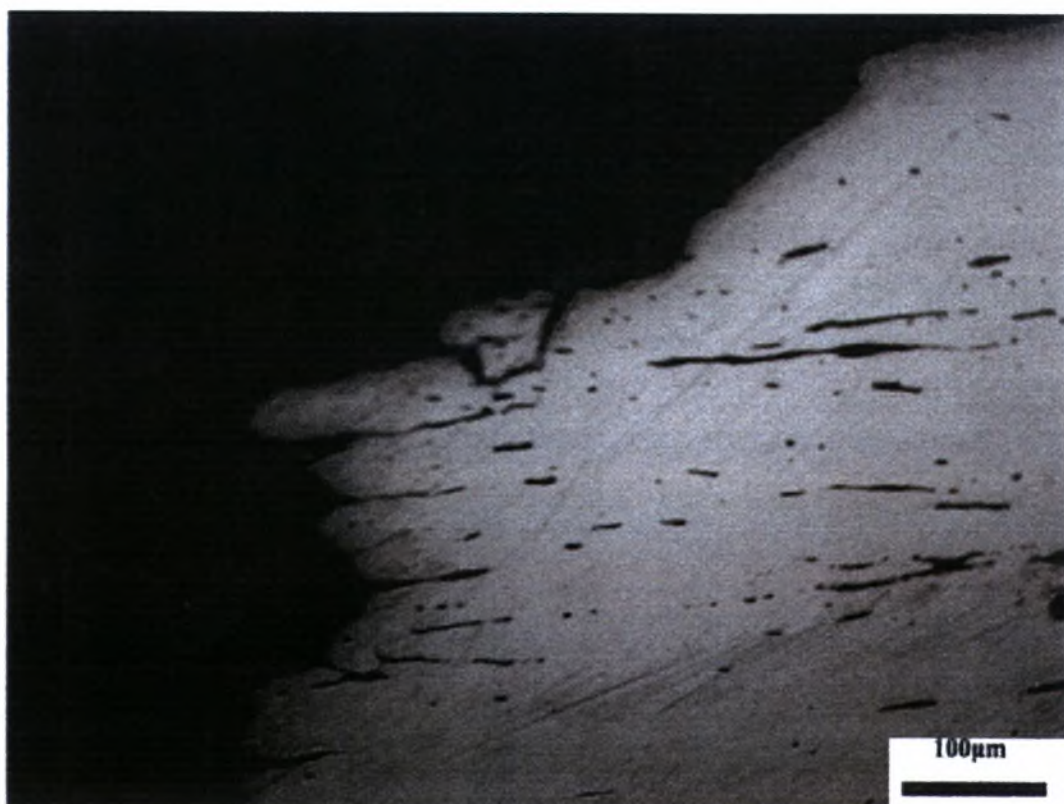
Στη φωτογραφία 34 παρουσιάζεται η μικροδομή του υλικού με παρουσία μεγάλων εγκλεισμάτων και απουσία ρηγματώσεων στο εσωτερικό

Στις φωτογραφίες 35-36 έχουμε την παρουσία έντονης διάβρωσης και ανάπτυξη ρωγμών λόγω διαβρώσεων

Στις φωτογραφίες 37-38 έχουμε την παρουσία διάβρωσης στην επιφάνεια θραύσης και στην επιφάνεια του δοκιμίου και ανάπτυξη μικρορηγματώσεων



1: Δοκίμιο DIM3-1. Διάβρωση στην επιφάνεια του δοκιμίου

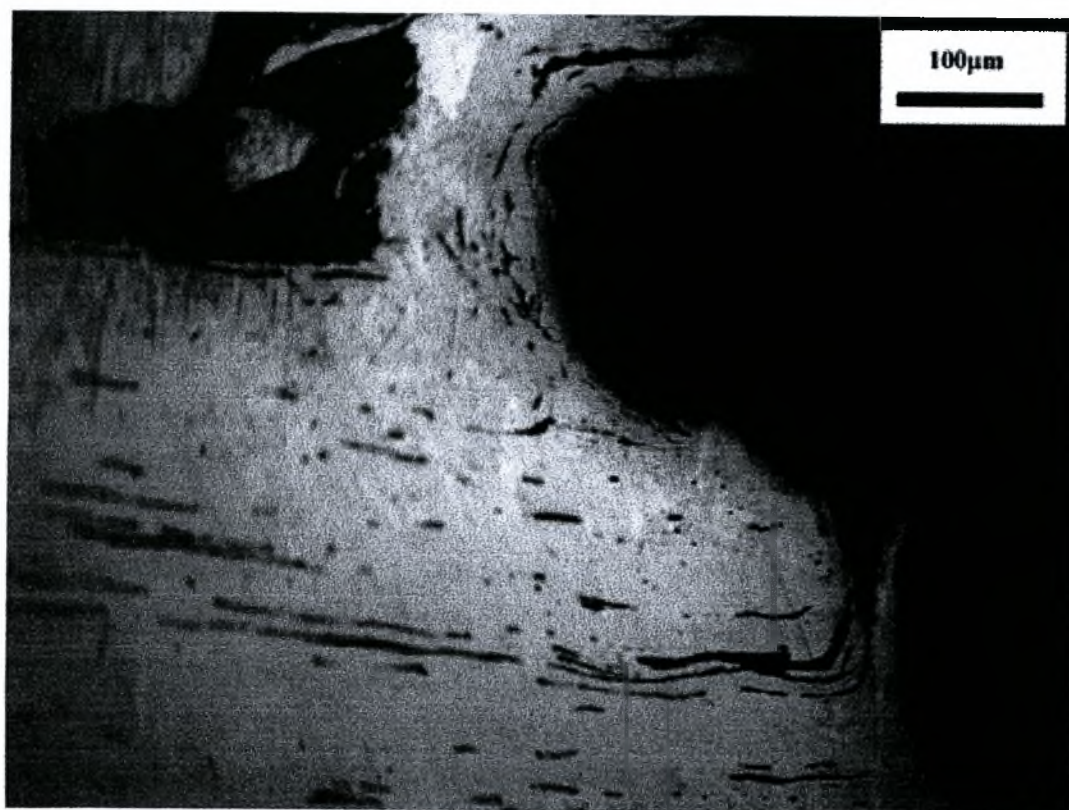


2: Δοκίμιο DIM3-1. Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου

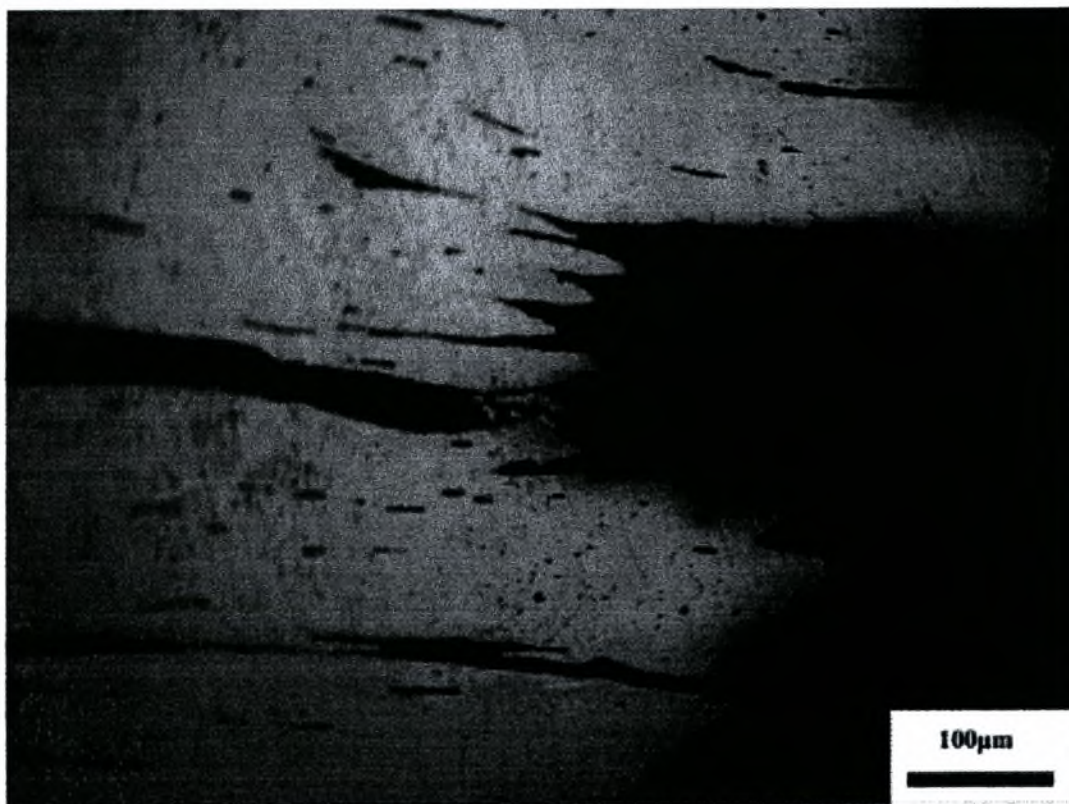




3: Δοκίμιο DIM3-1. Ρηγμάτωση στην επιφάνεια θραύσης



4: Δοκίμιο DIM3-1. Πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια θραύσης



5: Δοκίμιο DIM3-1. Επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου

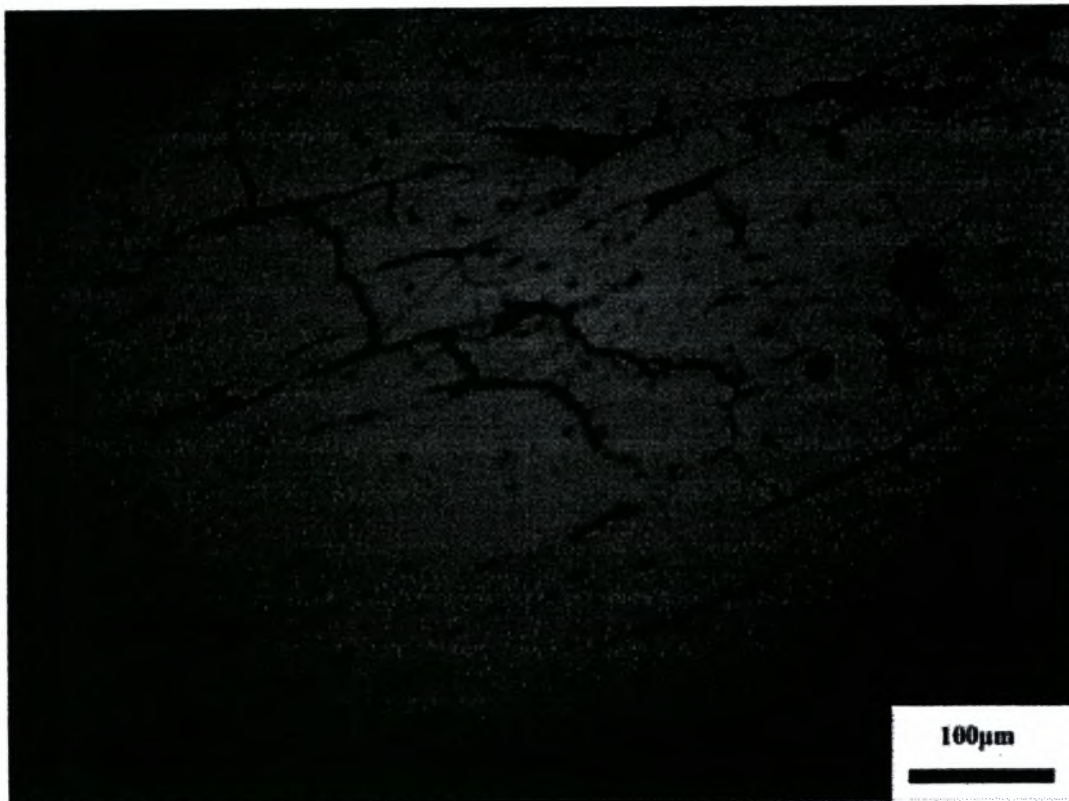


6: Δοκίμιο DIM3-1. Επιφάνεια θραύσης

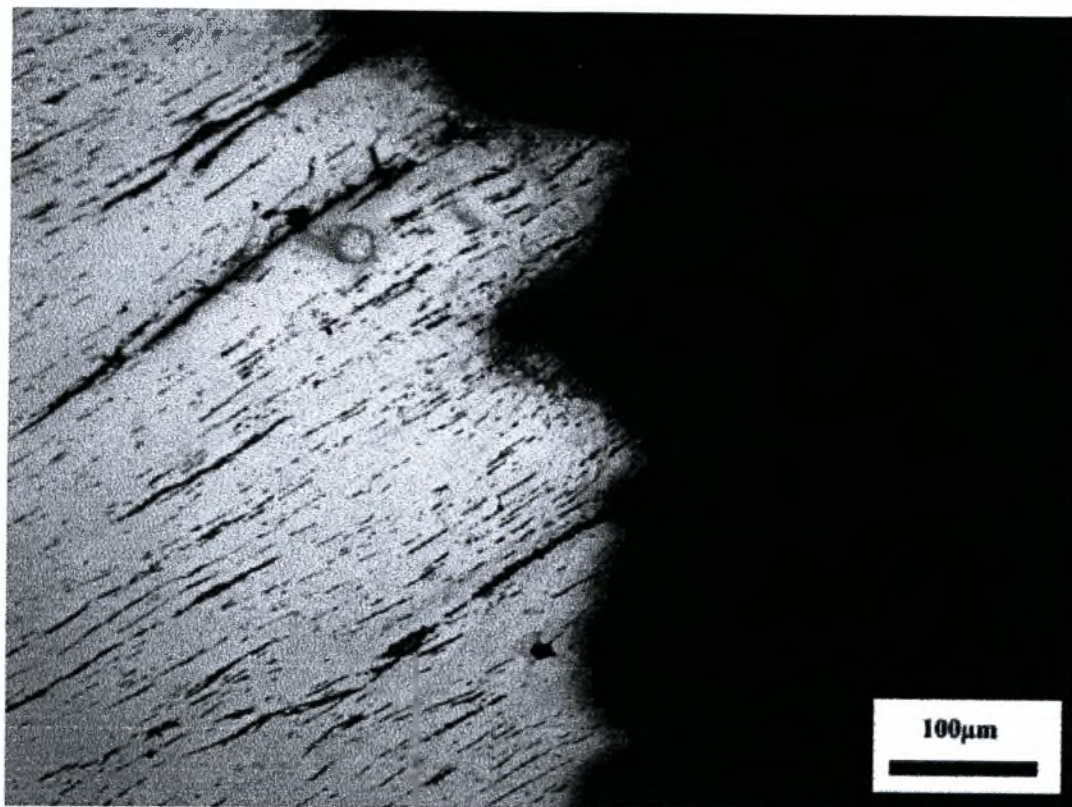




7: Δοκίμιο DIM4-1. Διάβρωση και ανάπτυξη μικρορωγμής στην επιφάνεια του δοκιμίου



8: Δοκίμιο DIM4-1. Ανάπτυξη μικρορωγμής



9: Δοκίμιο DIM4-1. Επιφάνεια θραύσης

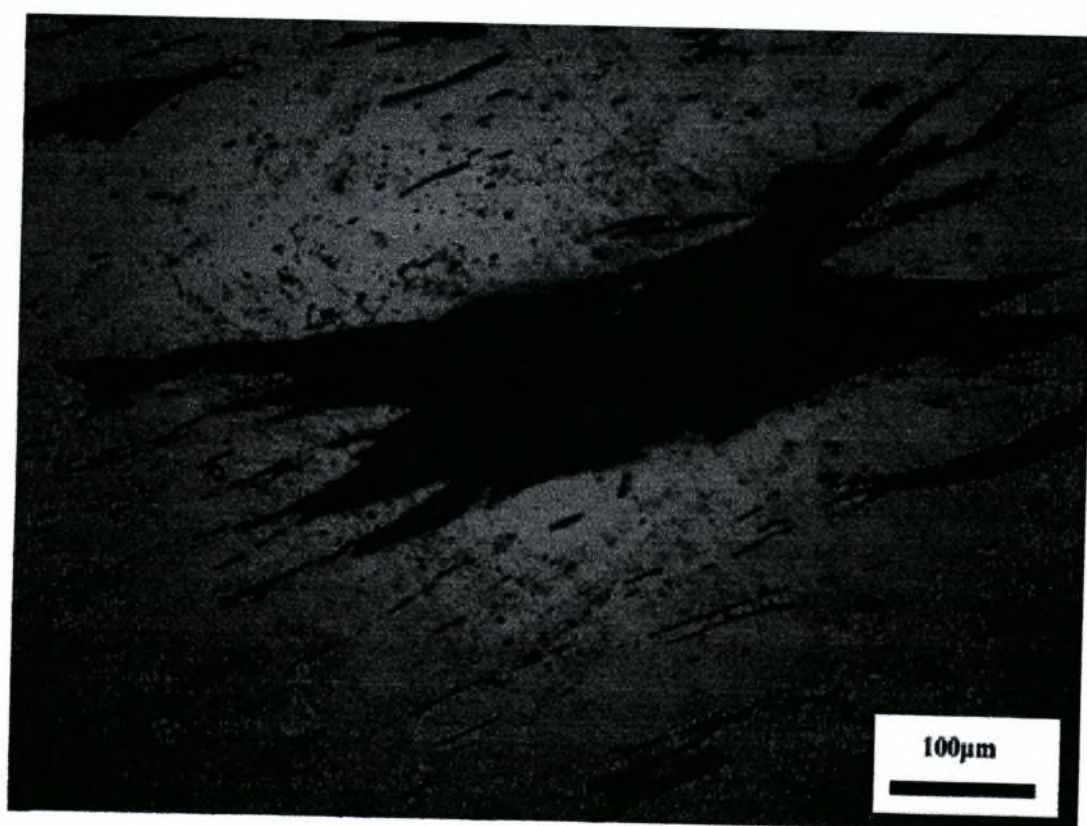


10: Δοκίμιο DIM4-2. Επιφάνεια του δοκιμίου

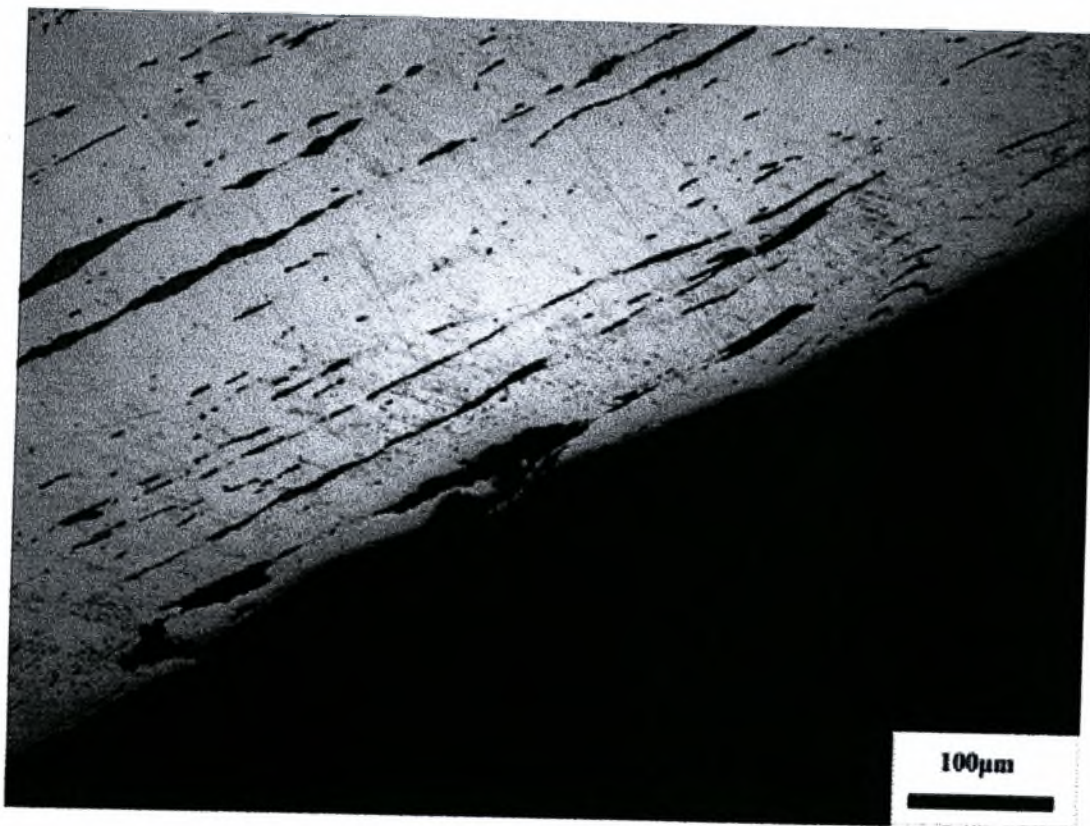




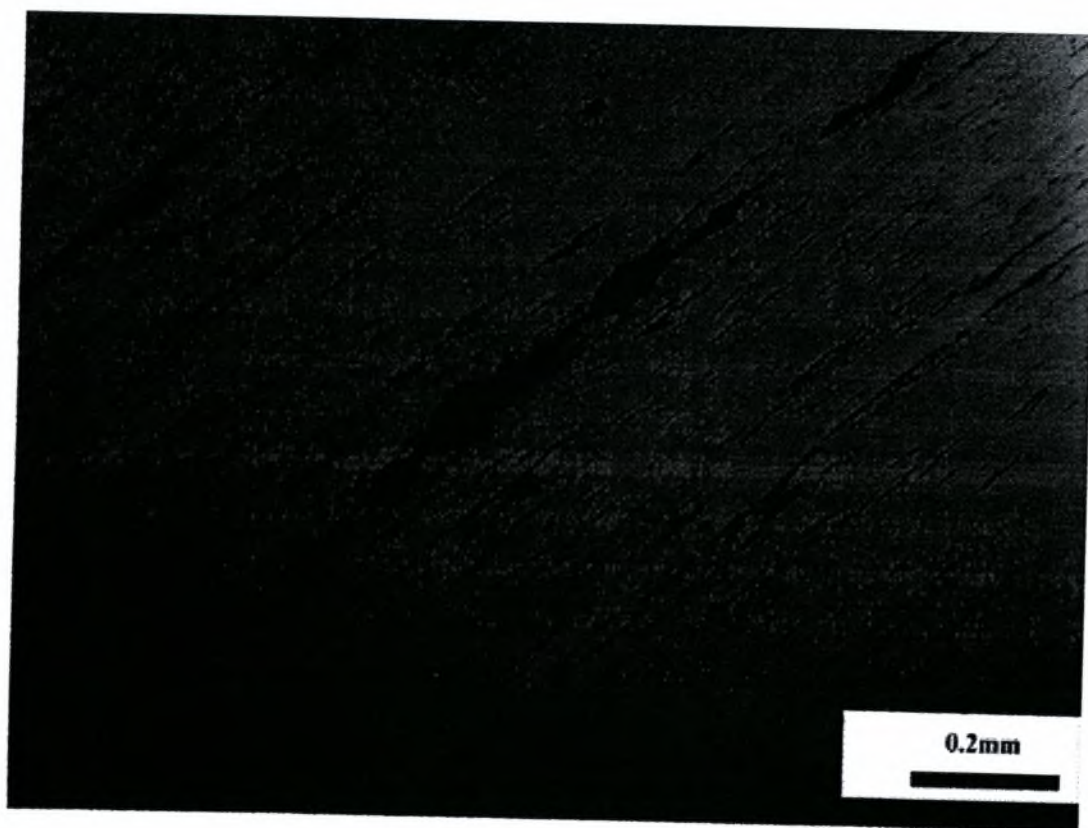
11: Δοκίμιο DIM5-1. Επιφάνεια θραύσης



12: Δοκίμιο DIM5-1. Μικροδομή στο εσωτερικό του δοκιμίου



13: Δοκίμιο DIM5-1. Επιφάνεια του δοκιμίου

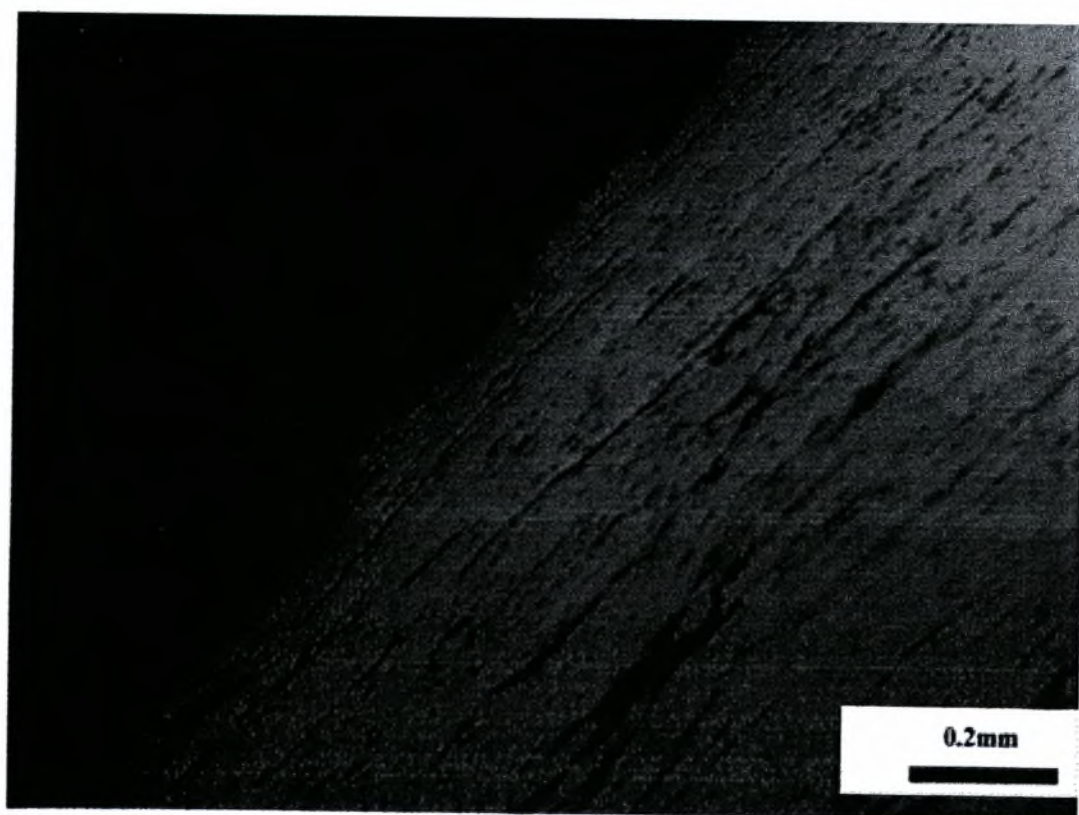


14: Δοκίμιο DIM5-2. Μικροδομή του δοκιμίου





15: Δοκίμιο DIM5-2. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου

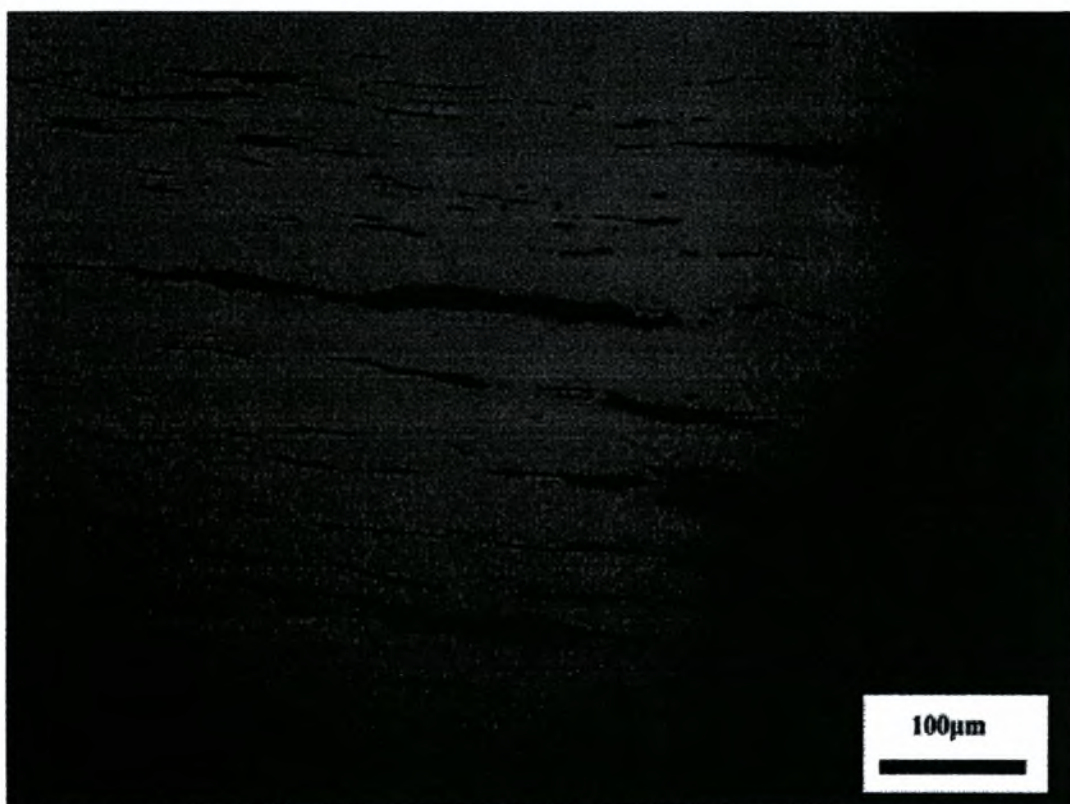


16: Δοκίμιο DIM5-2. Επιφάνεια δοκιμίου

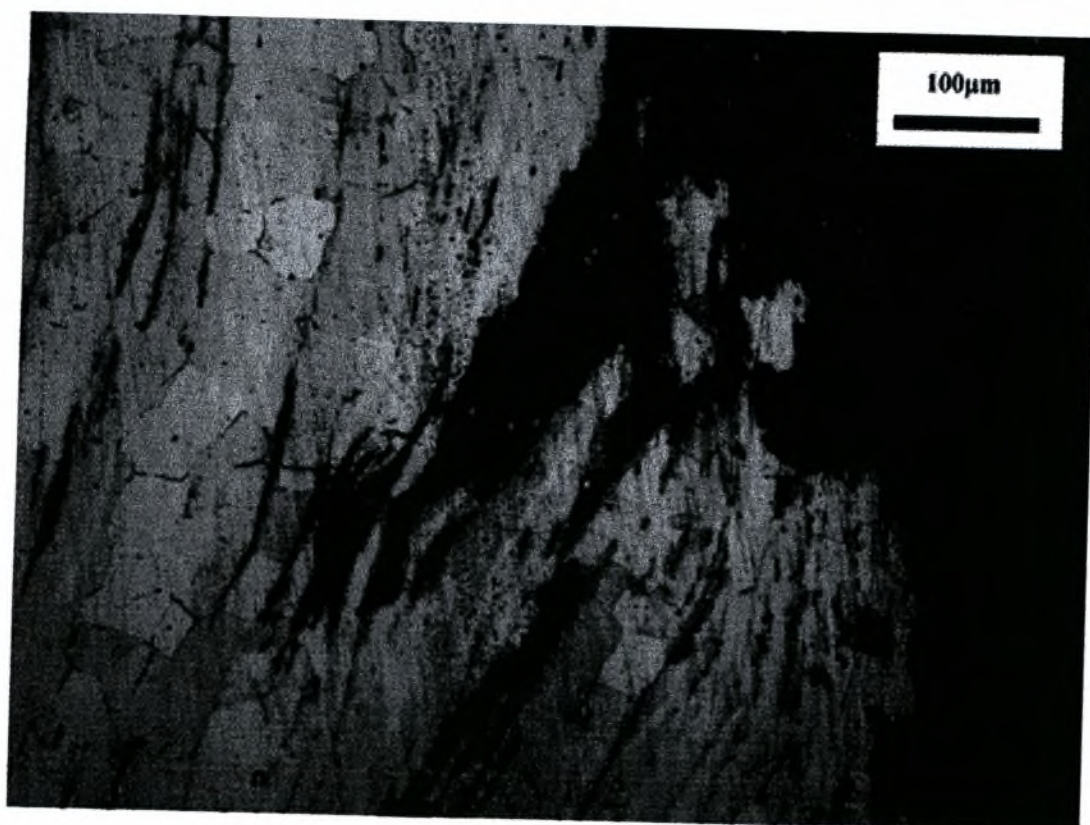




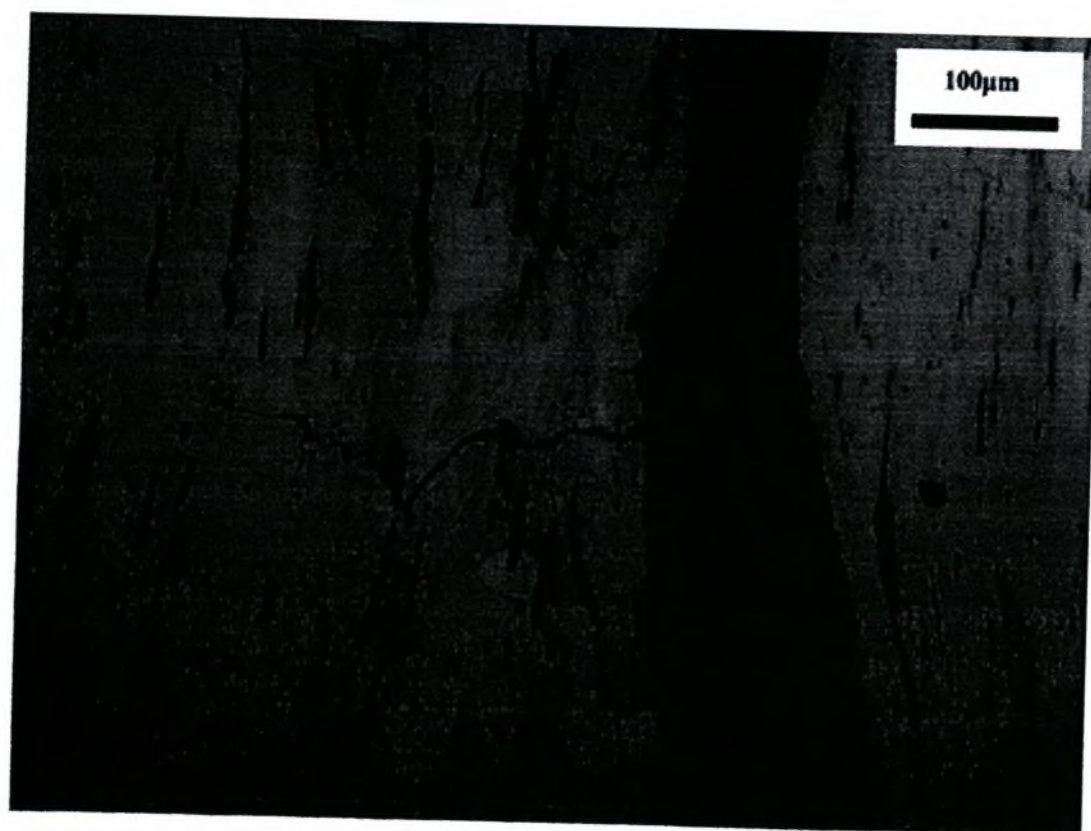
17: Δοκίμιο DIM2-1. Επιφάνεια θραύσης



18: Δοκίμιο DIM2-1. Επιφάνεια θραύσης

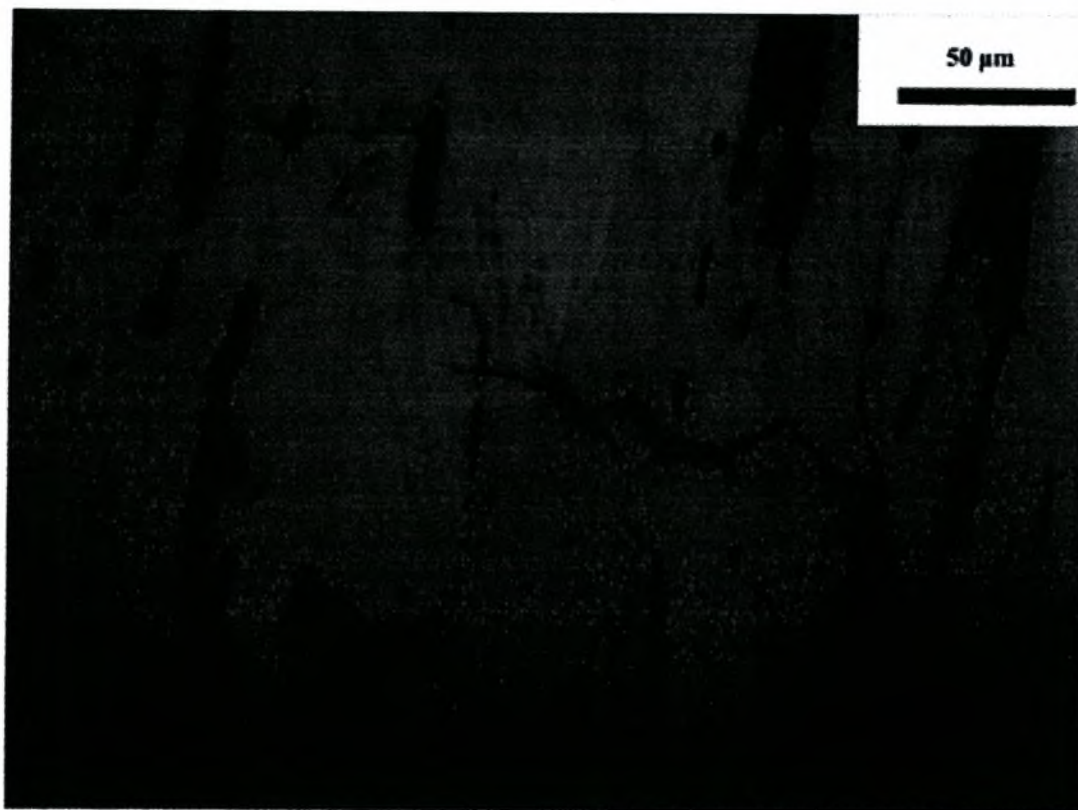


19: Δοκίμιο DIM2-1. Διάβρωση/ ανάπτυξη ρηγματώσης στην επιφάνεια

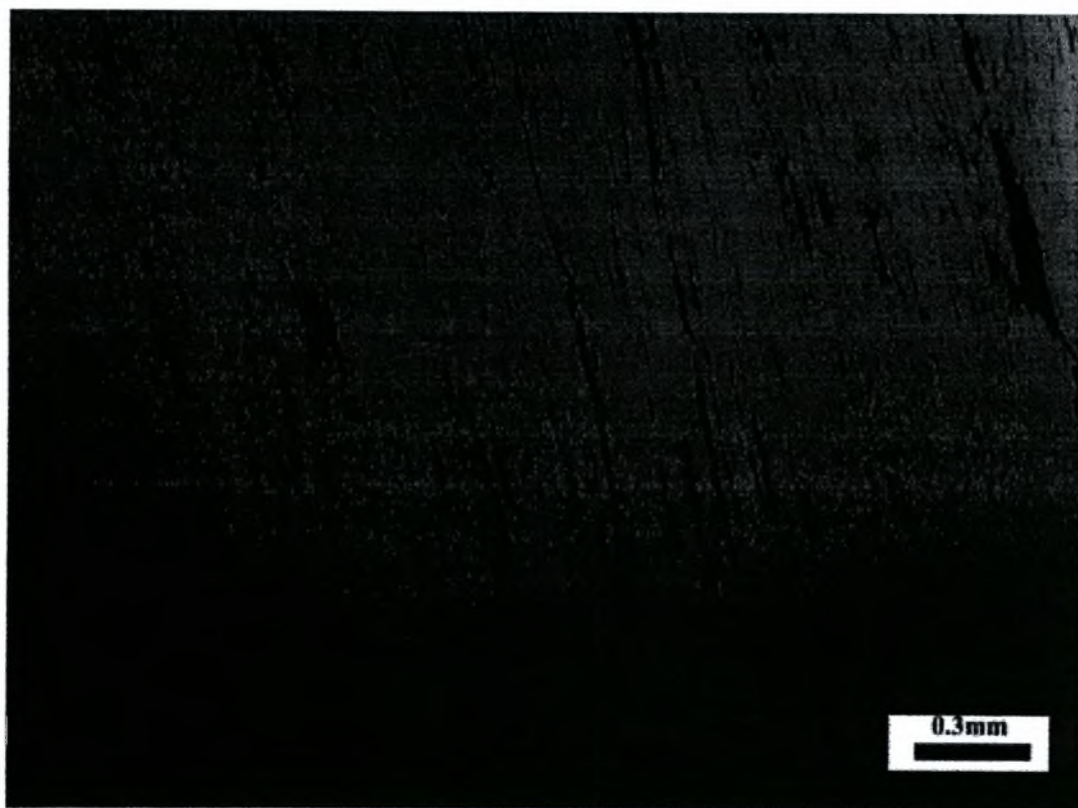


20: Δοκίμιο DIM2-1. Ανάπτυξη network μικρορωγμών μεταξύ των εγκλεισμάτων





21: Δοκίμιο DIM2-1. Ανάπτυξη μικρορωγμών διαμέσου των εγκλεισμάτων



22: Δοκίμιο DIM2-2. Επιφάνεια θραύσης

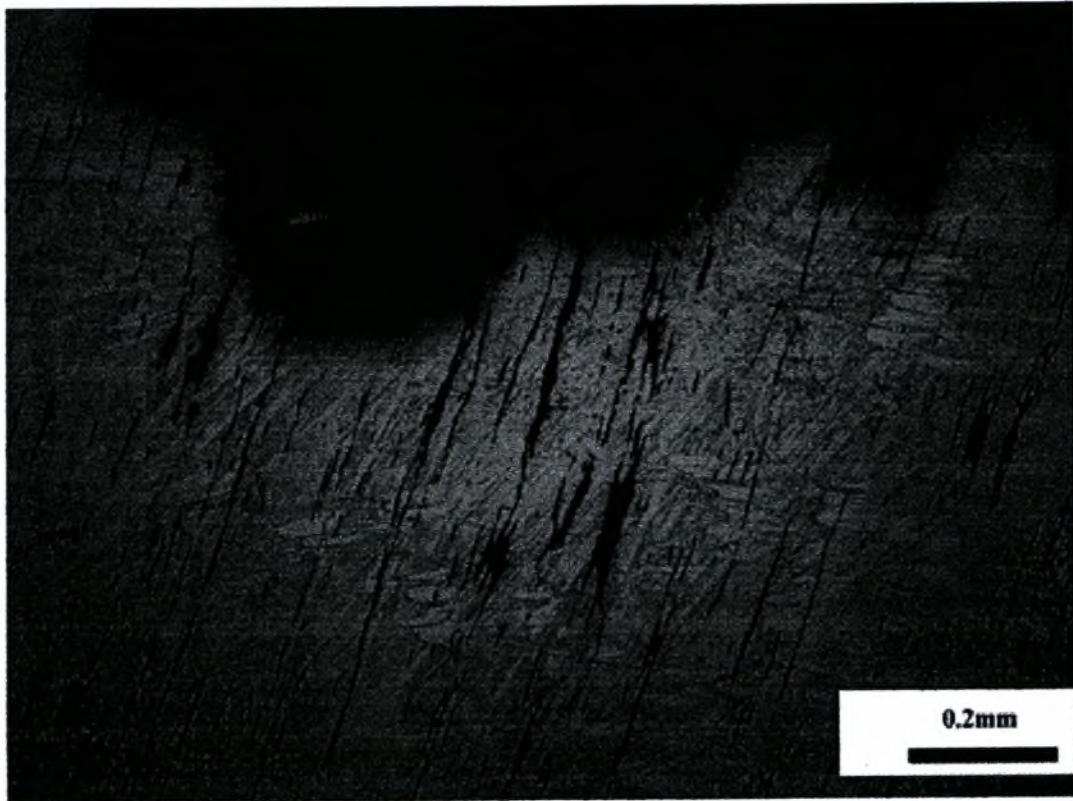


23: Δοκίμιο DIM1-1. Διαβρώσεις/μικρορωγμές στην επιφάνεια

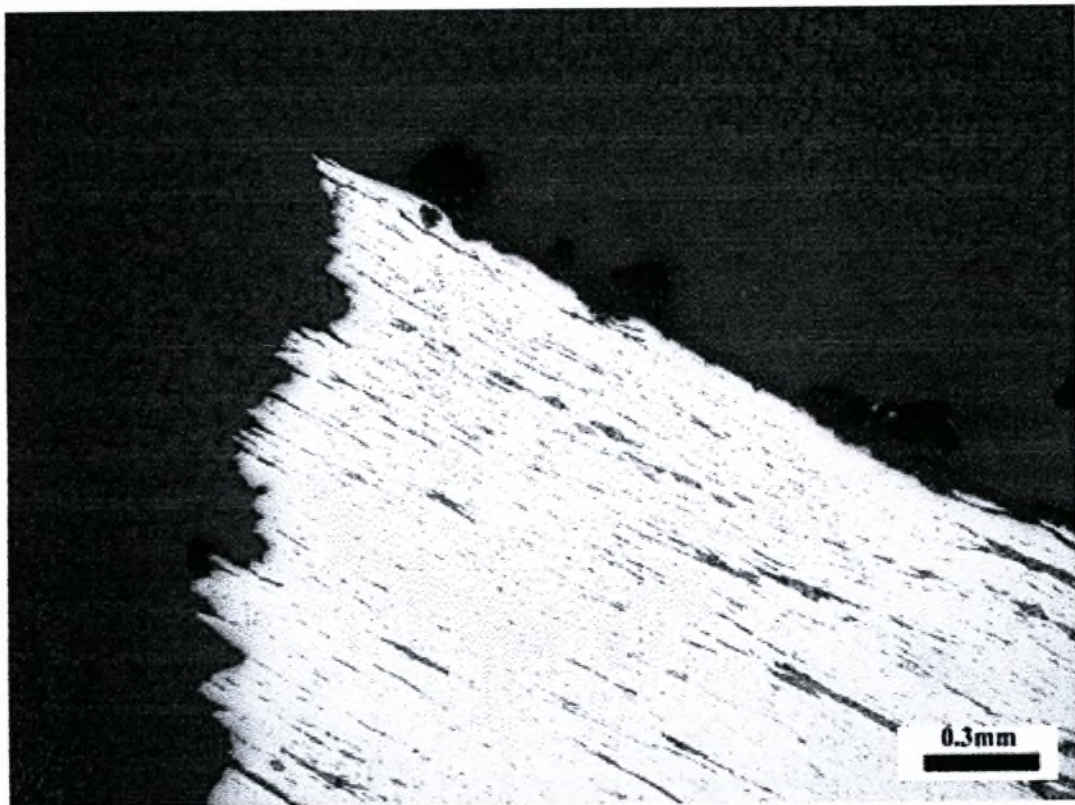


24: Δοκίμιο DIM1-1. Μικρορηγμάτωση στην επιφάνεια θραύσης





25: Δοκίμιο DIM1-2. Επιφάνεια θραύσης

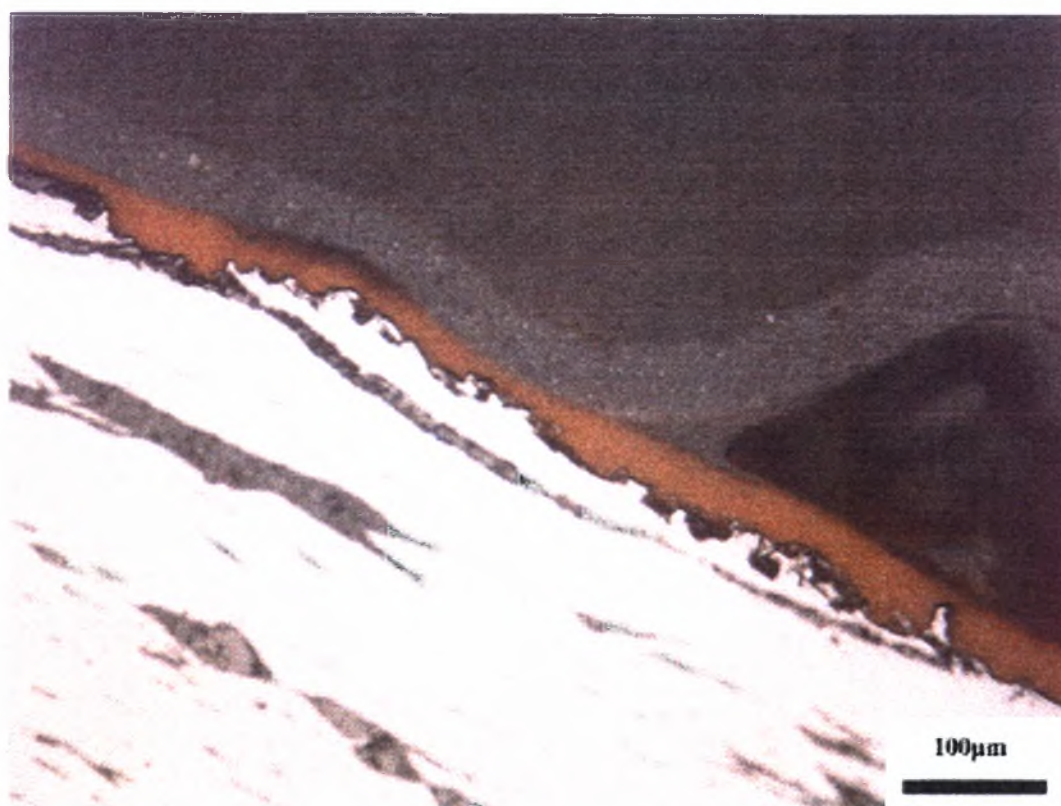


26: Δοκίμιο 12F-1. Επιφάνεια θραύσης και επιφάνεια δοκιμίου

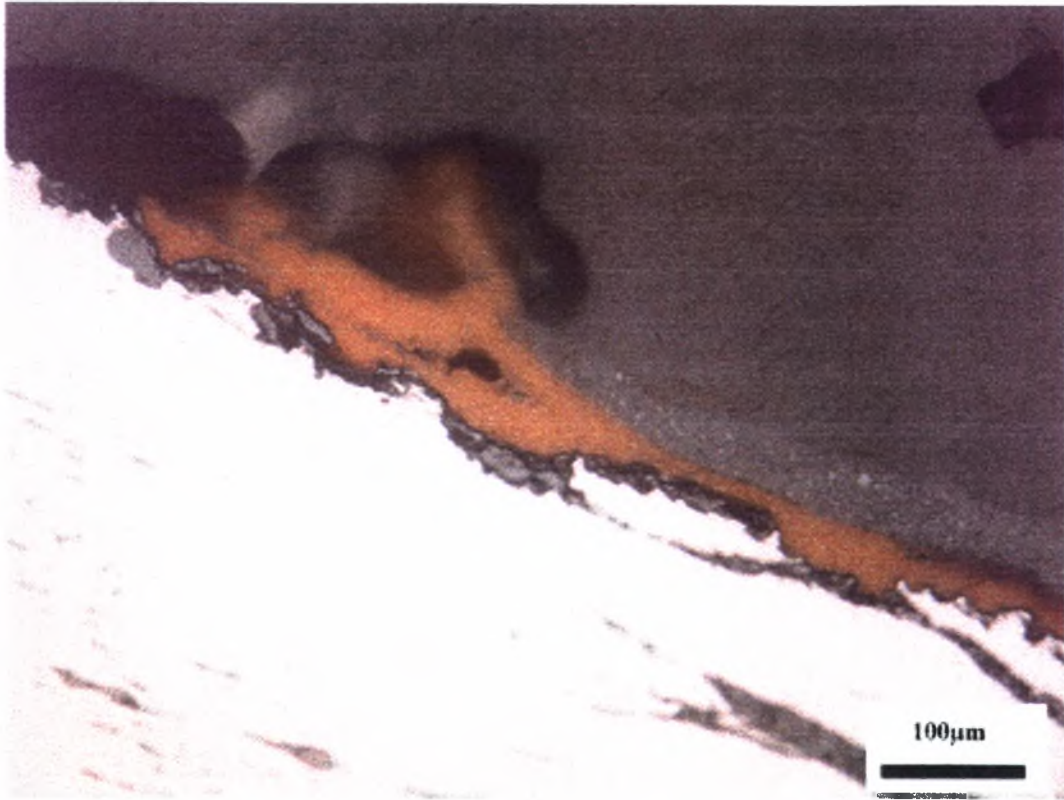




27: Δοκίμιο 12F-1. Επιφάνεια θραύσης



28: Δοκίμιο 12F-1. Διαβρώσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου

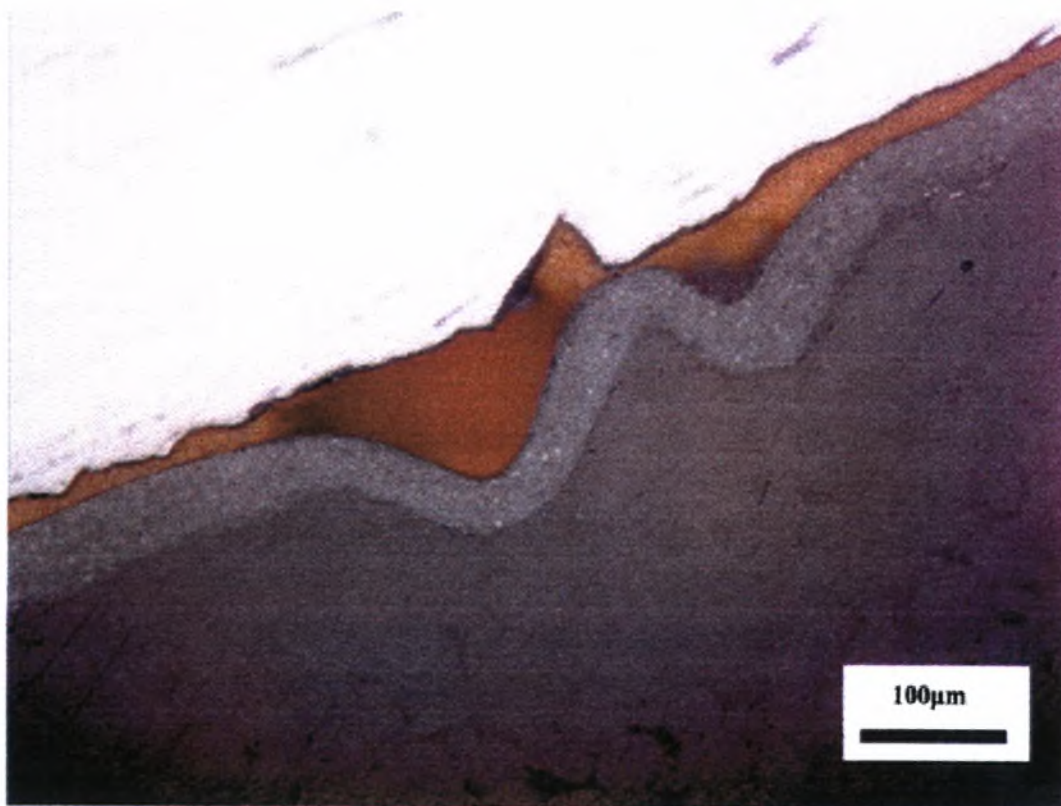


29: Δοκίμιο 12F-1. Διαβρώσεις στην επιφάνεια

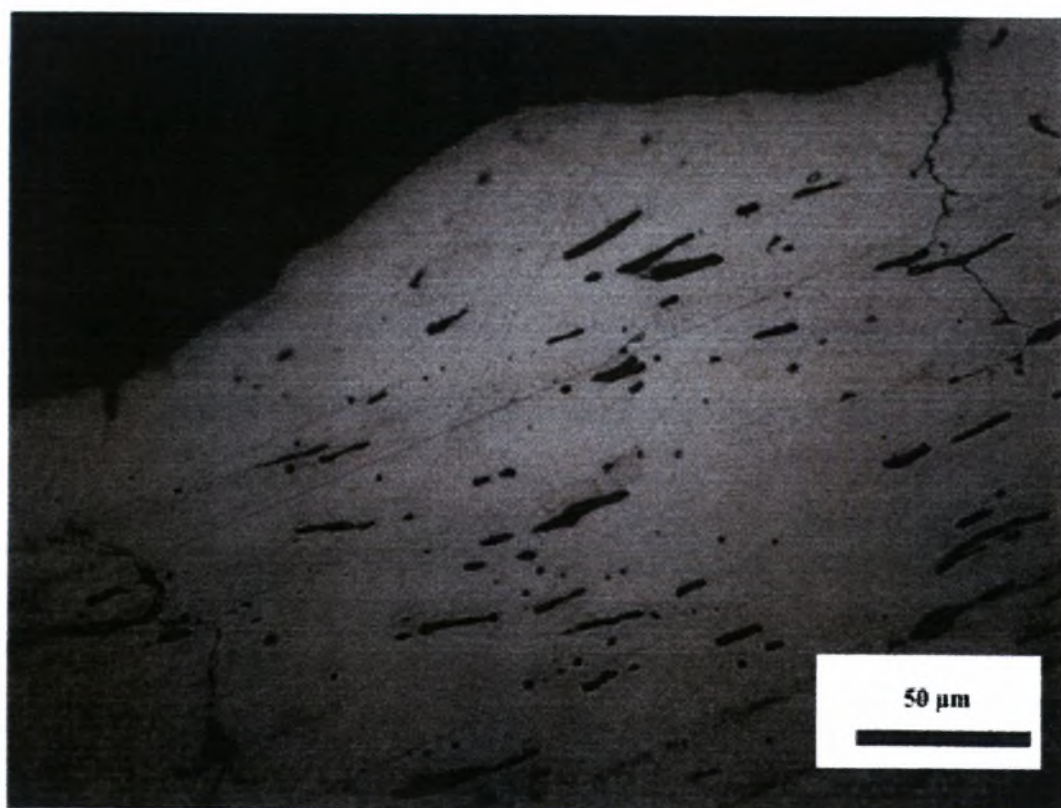


30: Δοκίμιο 12F-2. Επιφάνεια θραύσης





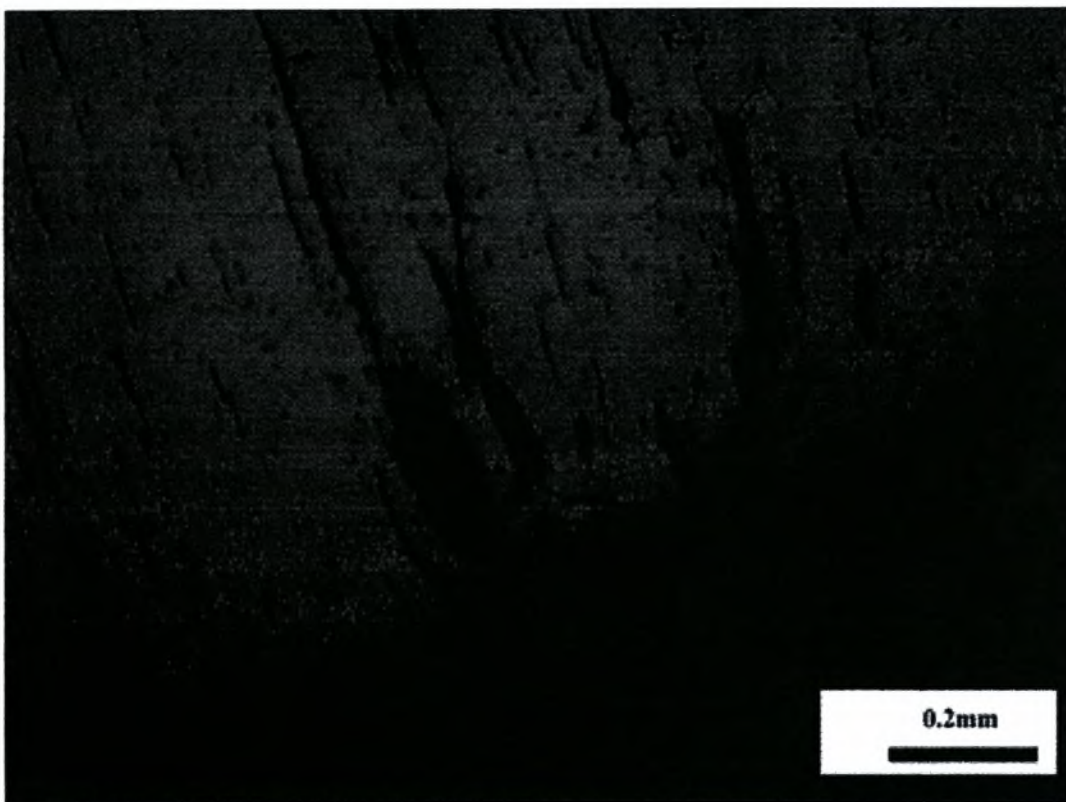
31: Δοκίμιο 12F-2 Διαβρώσεις/ εγχοπές στην επιφάνεια



32: Δοκίμιο 12F-2. Ανάπτυξη ρηγματώσεων

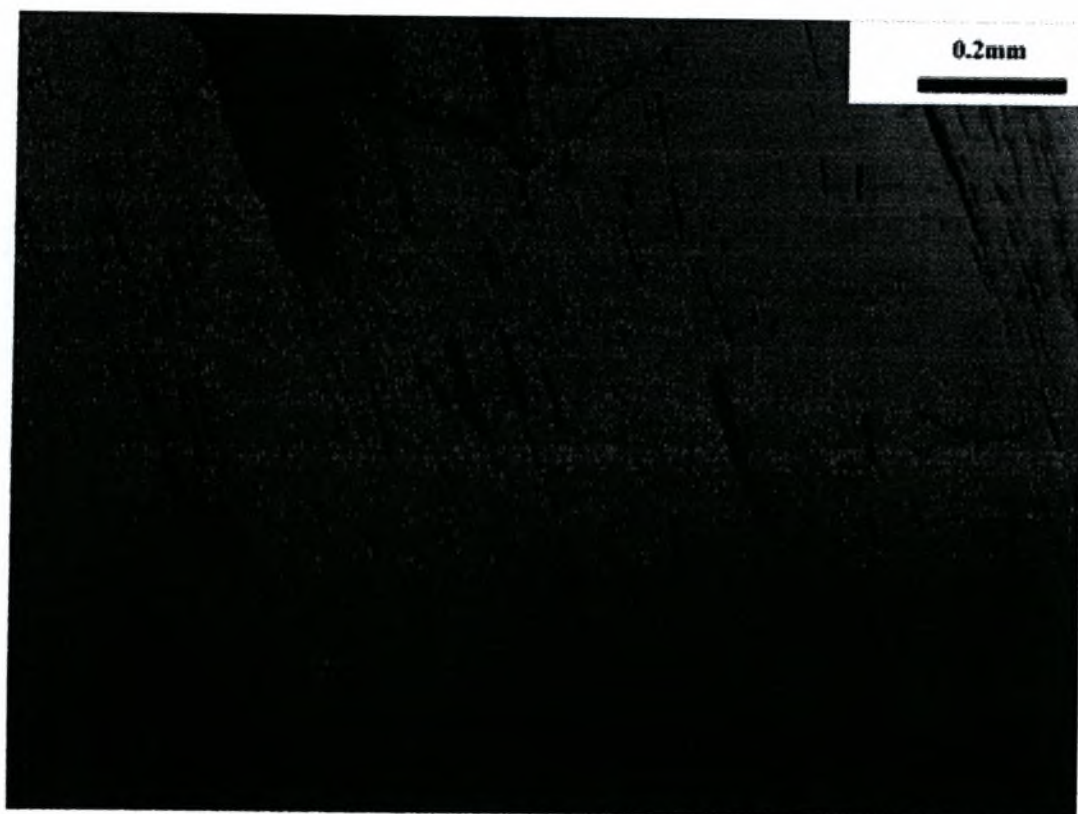


33: Δοκίμιο DIM6-1. Επιφάνεια θραύσης



34: Δοκίμιο DIM6-1. Επιφάνεια θραύσης





35: Δοκίμιο DIM6-1. Διάδοση ρηγματώσεων στο εσωτερικό του δοκιμίου

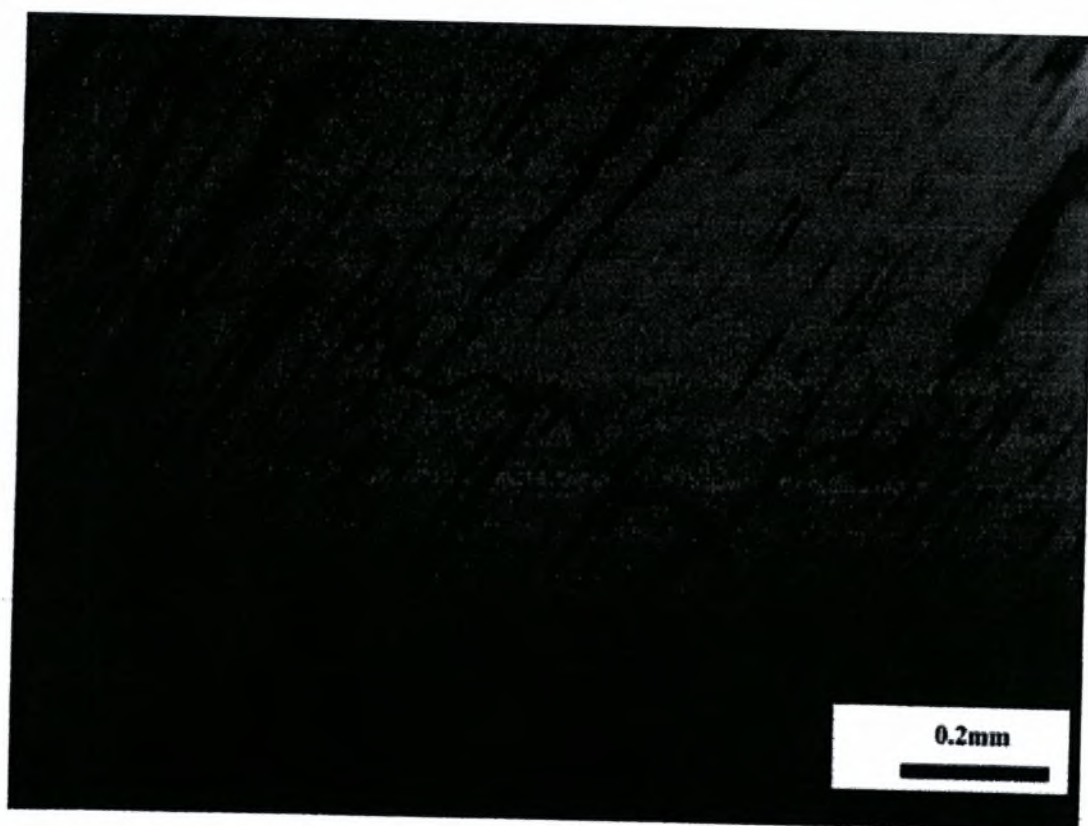


36: Δοκίμιο DIM6-2. Επιφάνεια θραύσης και ανάπτυξη ρωγμής

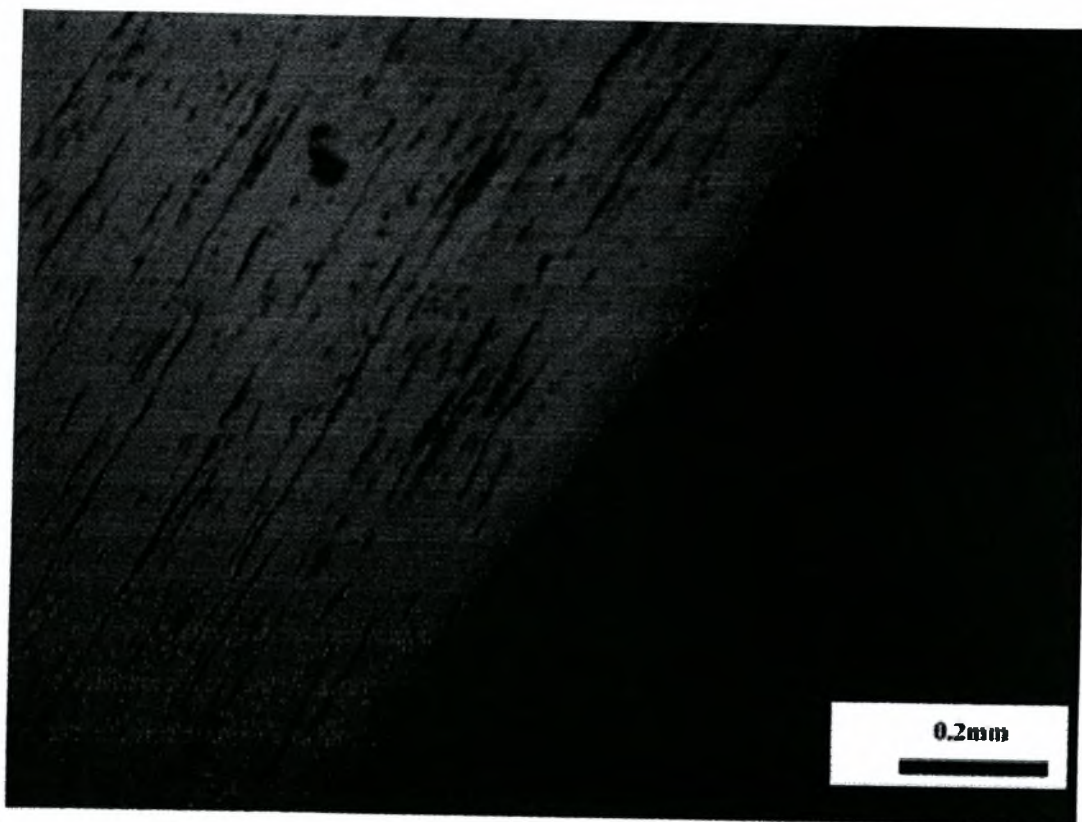




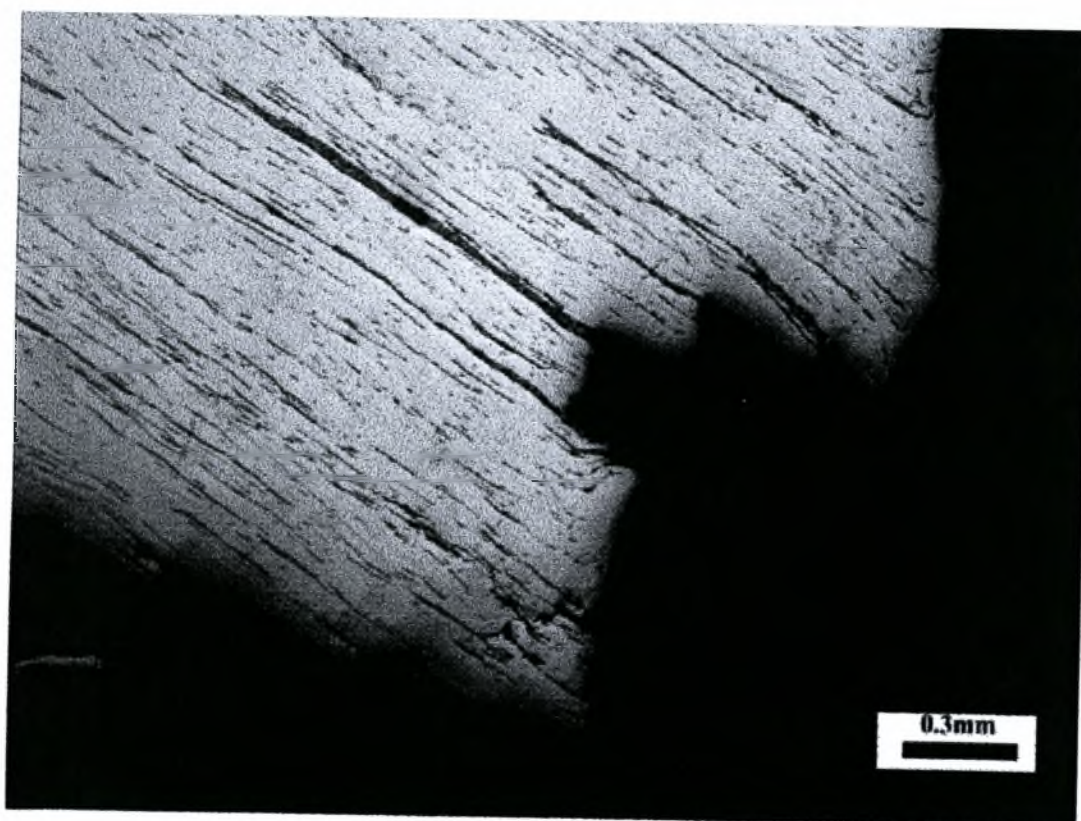
37: Δοκίμιο DIM7-1. Επιφάνεια θραύσης



38: Δοκίμιο DIM7-1. Ανάπτυξη ρηγμάτωσης στο εσωτερικό του δοκιμίου



39: Δοκίμιο DIM7-1. Επιφάνεια του δοκιμίου

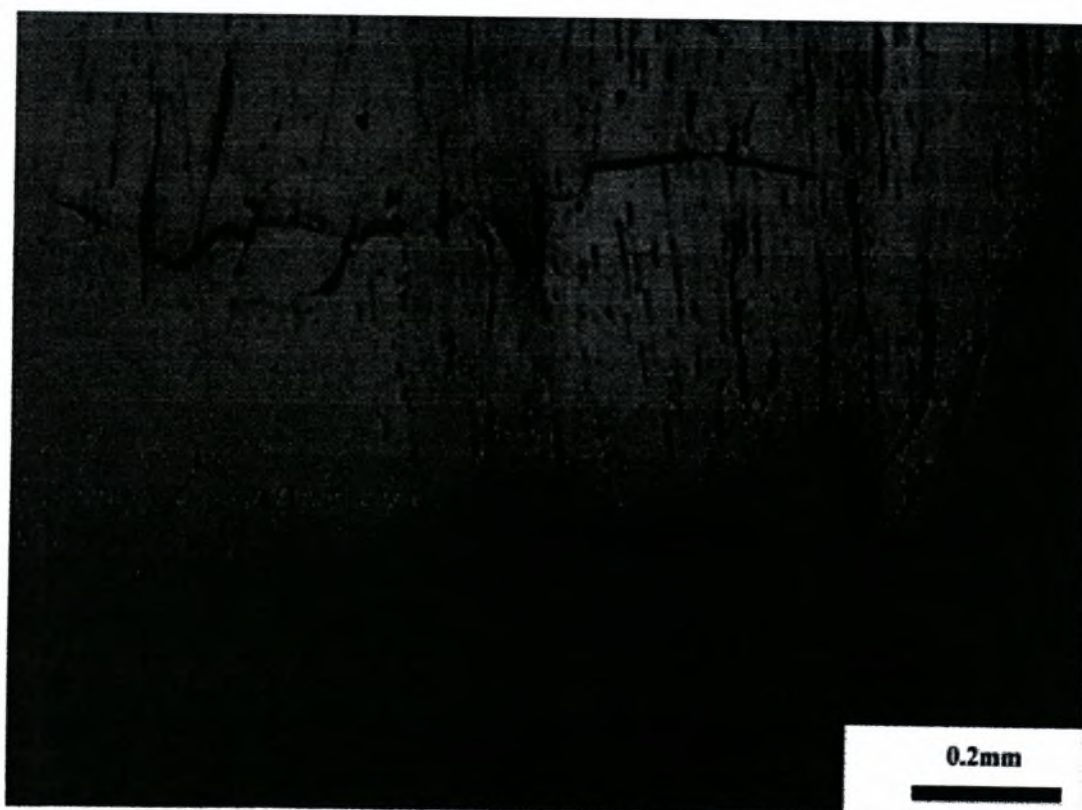


40: Δοκίμιο DIM7-2. Επιφάνεια θραύσης





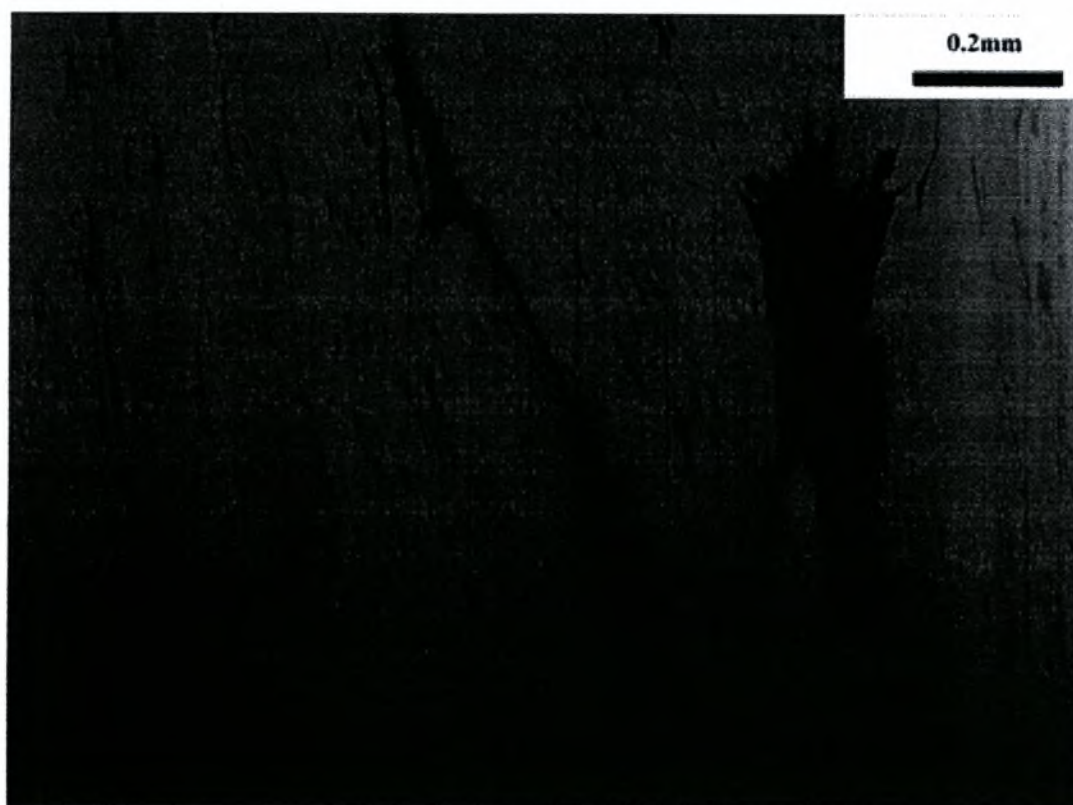
41: Δοκίμιο DIM10-1. Επιφάνεια θραύσης



42: Δοκίμιο DIM10-1. Επιφάνεια θραύσης



43: Δοκίμιο DIM10-2. Επιφάνεια θραύσης

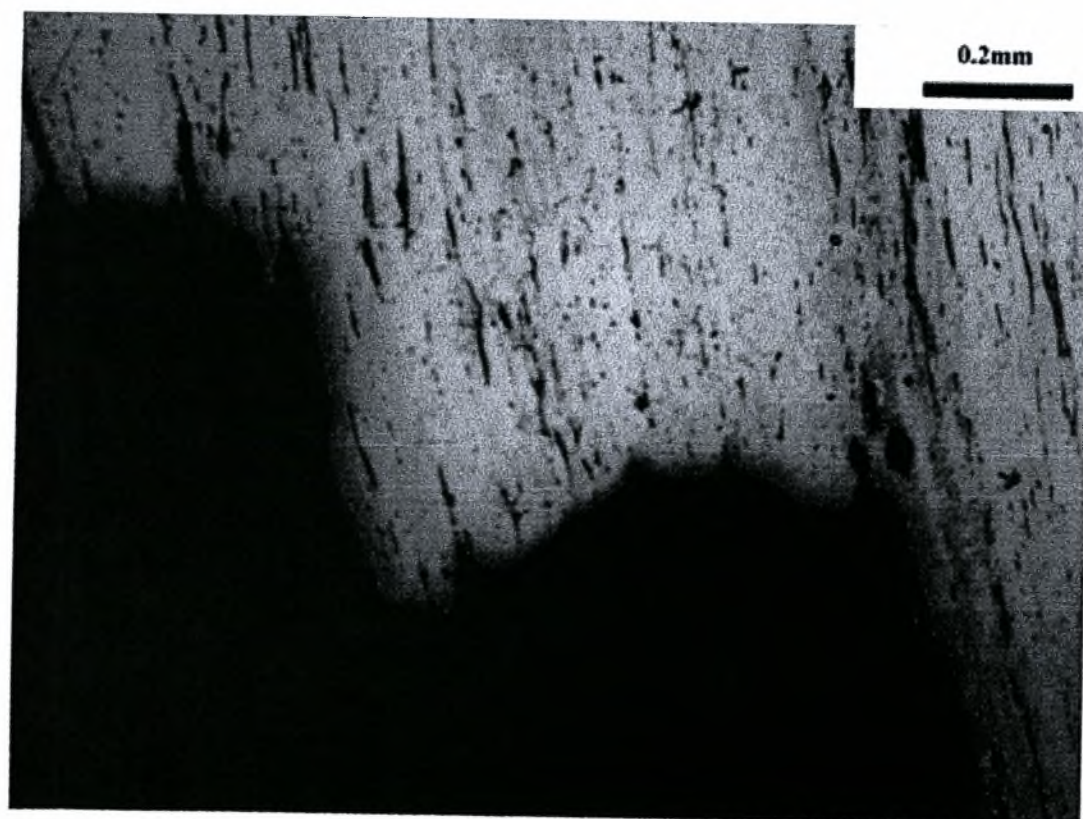


44: Δοκίμιο DIM10-2. Διάδοση ρωγμής διαμέσου εγκλεισμάτων στο εσωτερικό του δοκιμίου

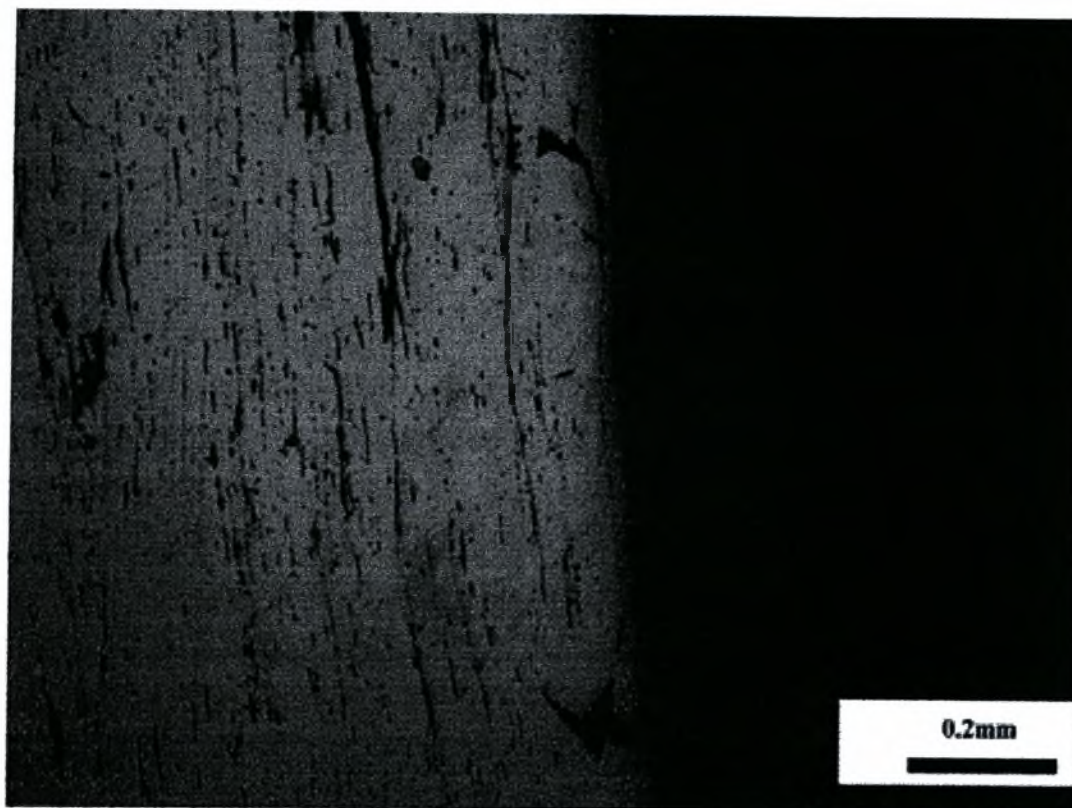




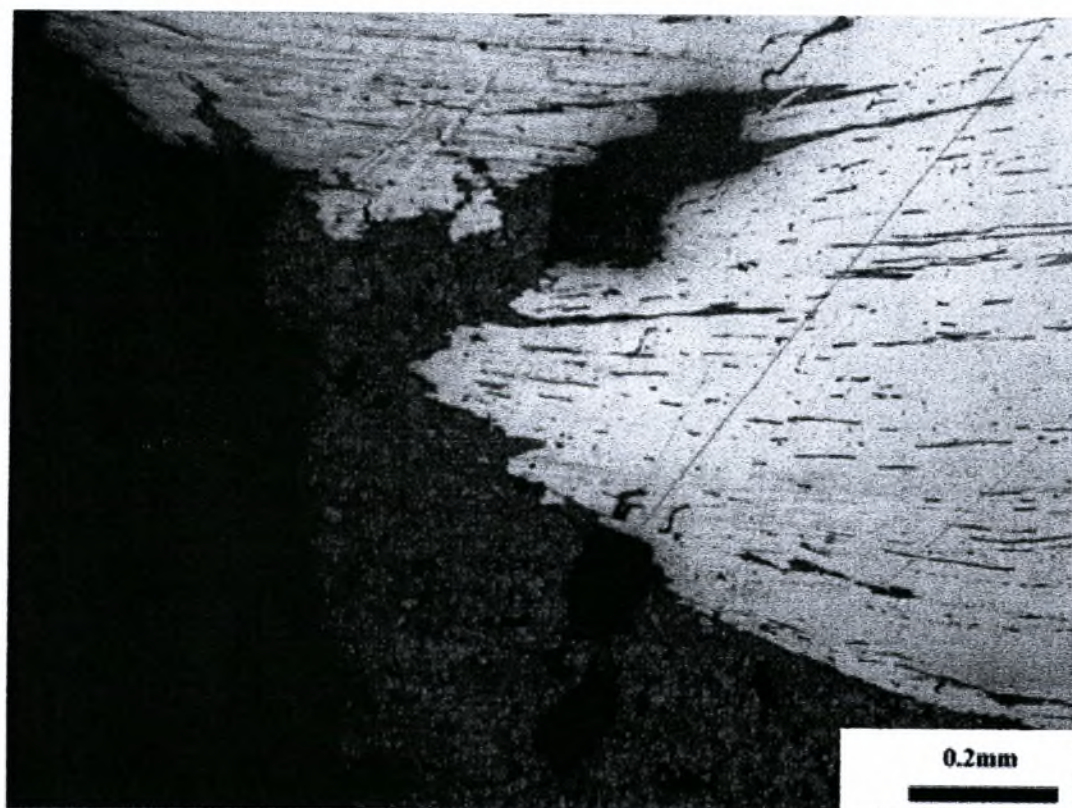
45: Δοκίμιο DIM10-2. Επιφάνεια δοκιμίου



46: Δοκίμιο DIM8-1. Επιφάνεια θραύσης

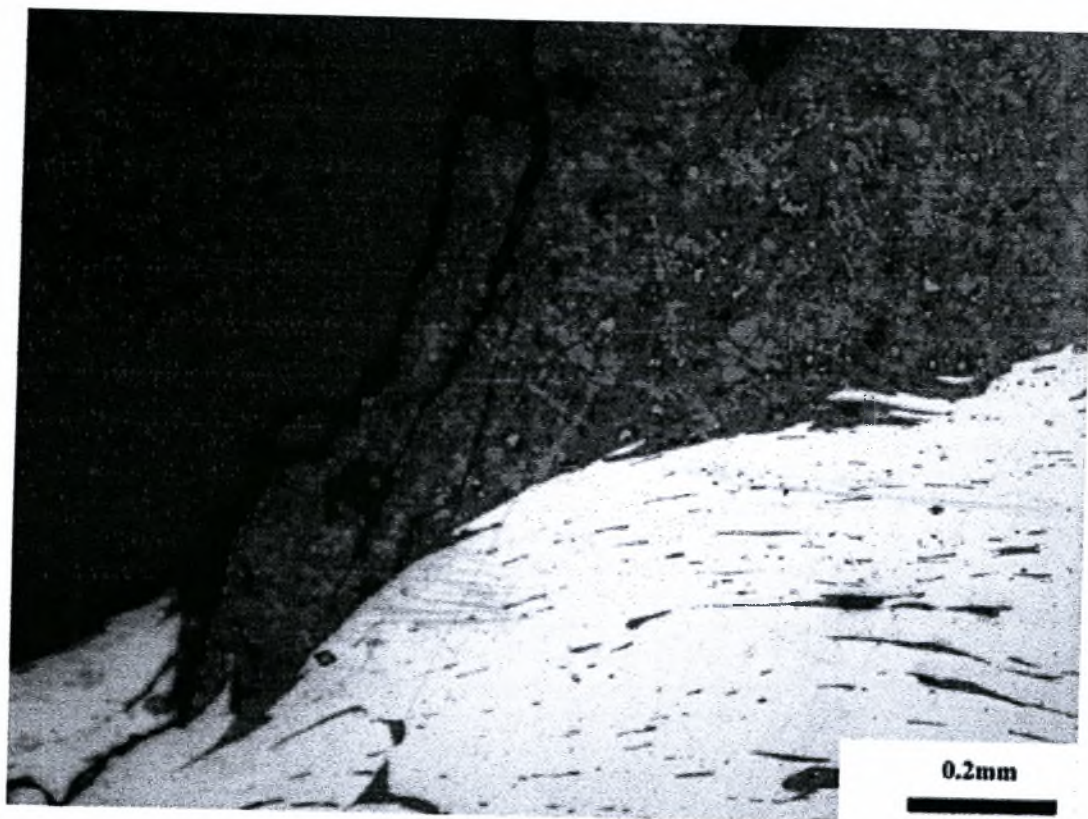


47: Δοκίμιο DIM8-1. Επιφάνεια δοκιμίου

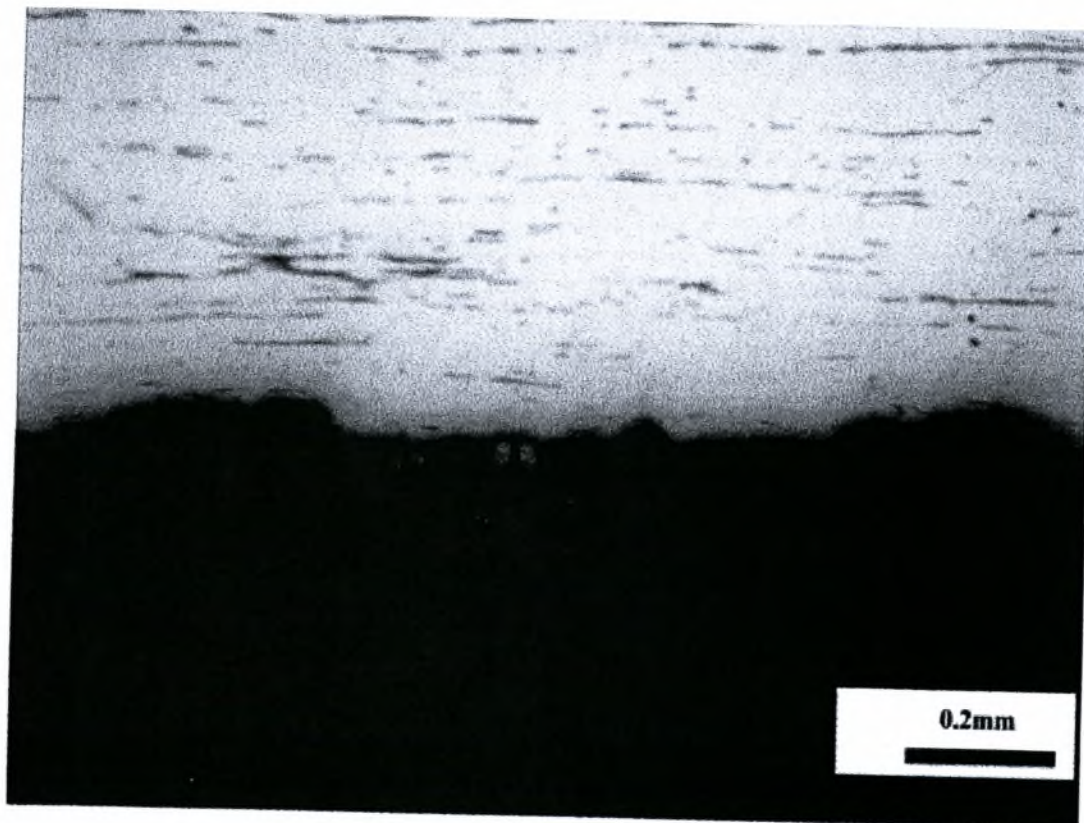


48: Δοκίμιο DIM8-2. Επιφάνεια θραύσης



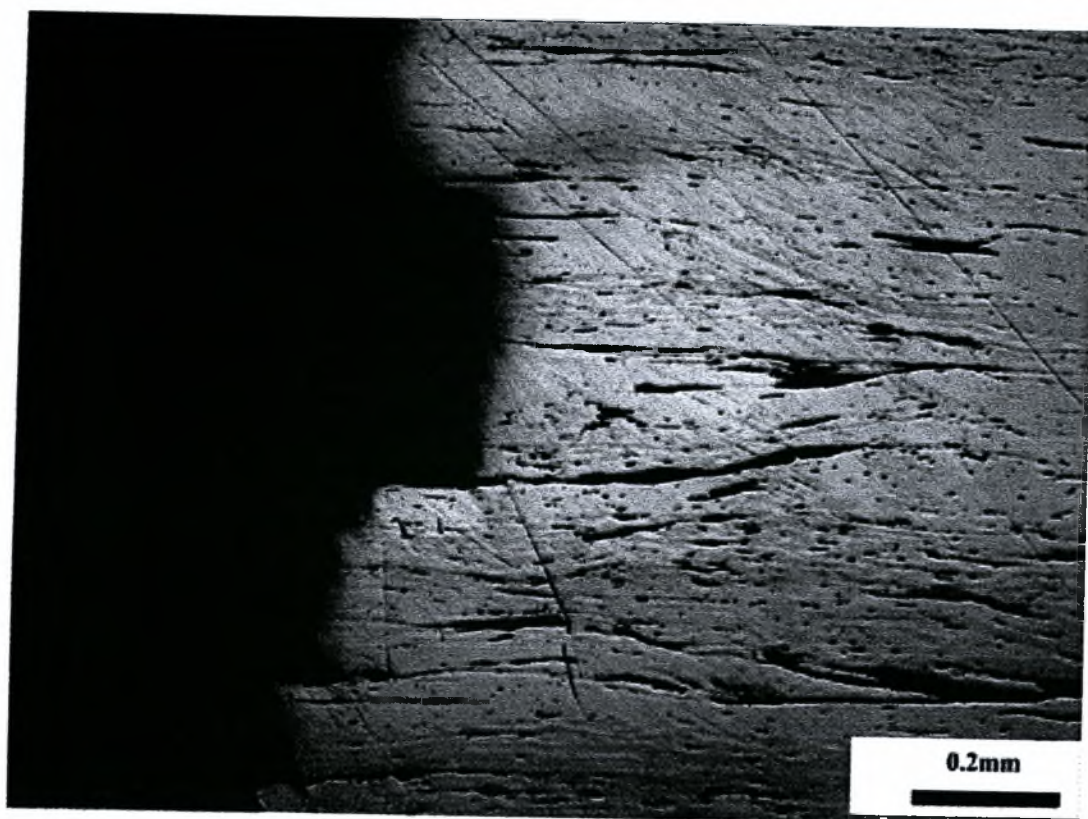


49: Δοκίμιο DIM8-2. Επιφάνεια θραύσης

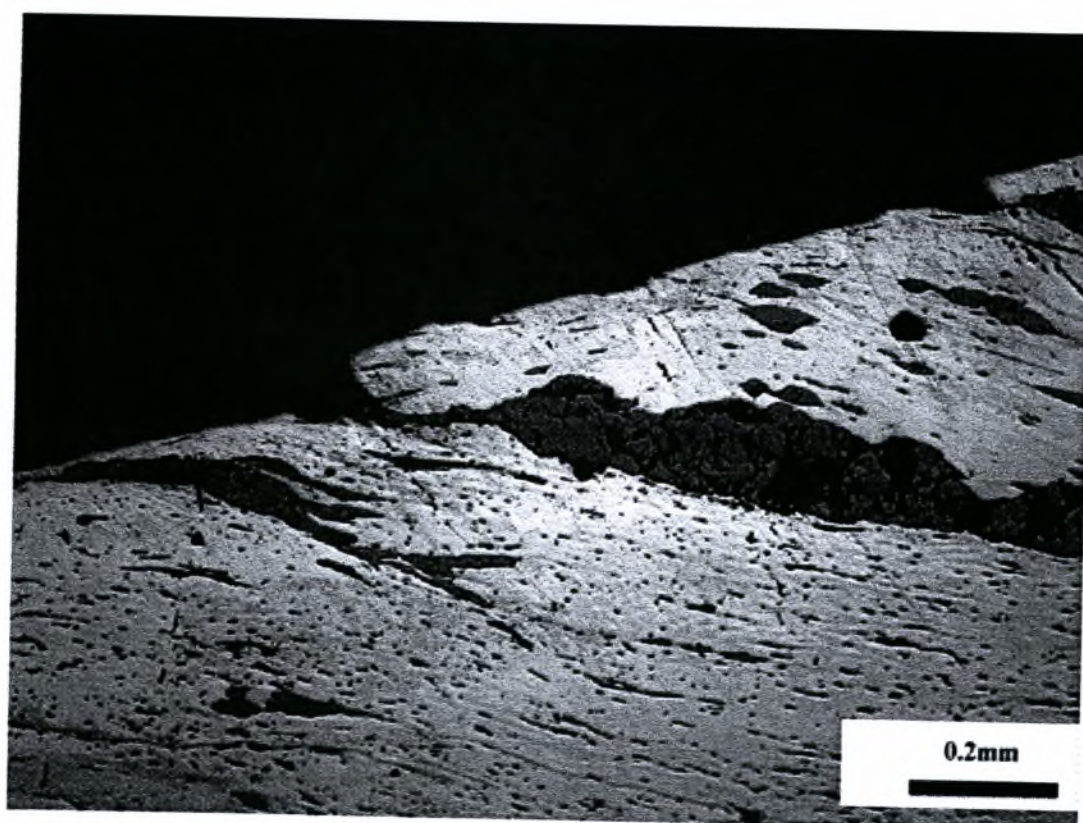


50: Δοκίμιο DIM8-2. Επιφάνεια δοκιμίου



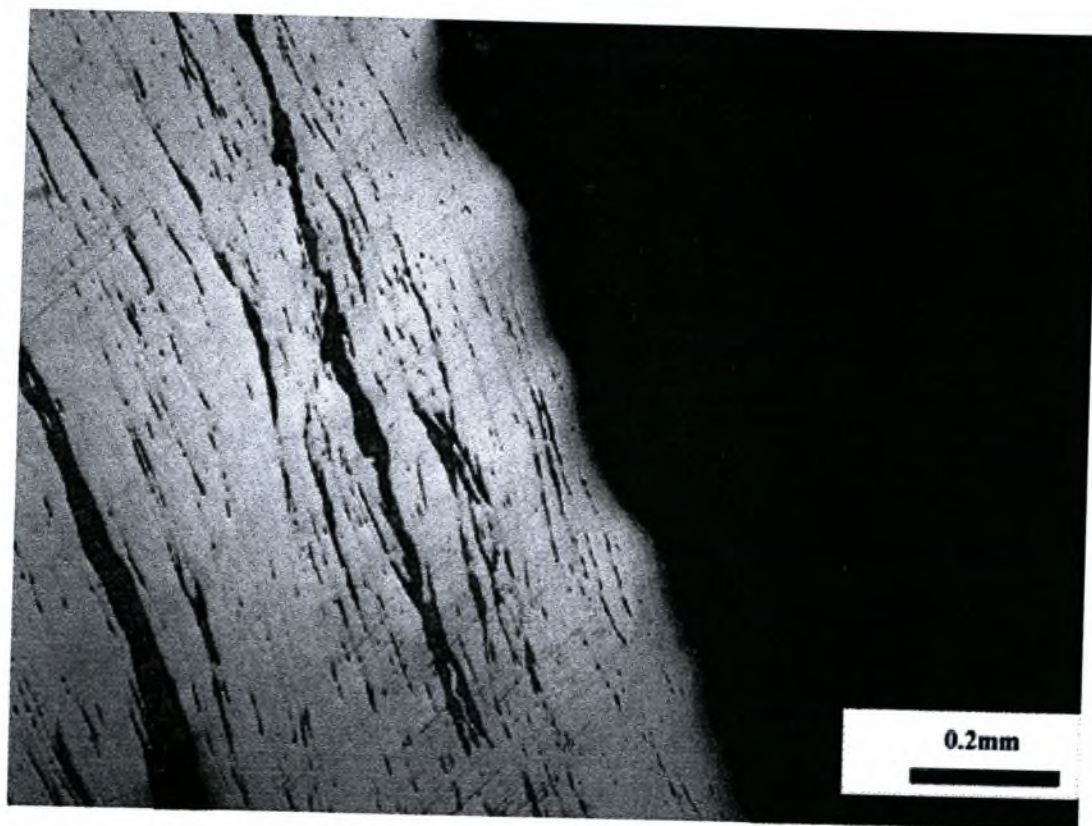


51: Δοκίμιο DIM9-1. Επιφάνεια θραύσης

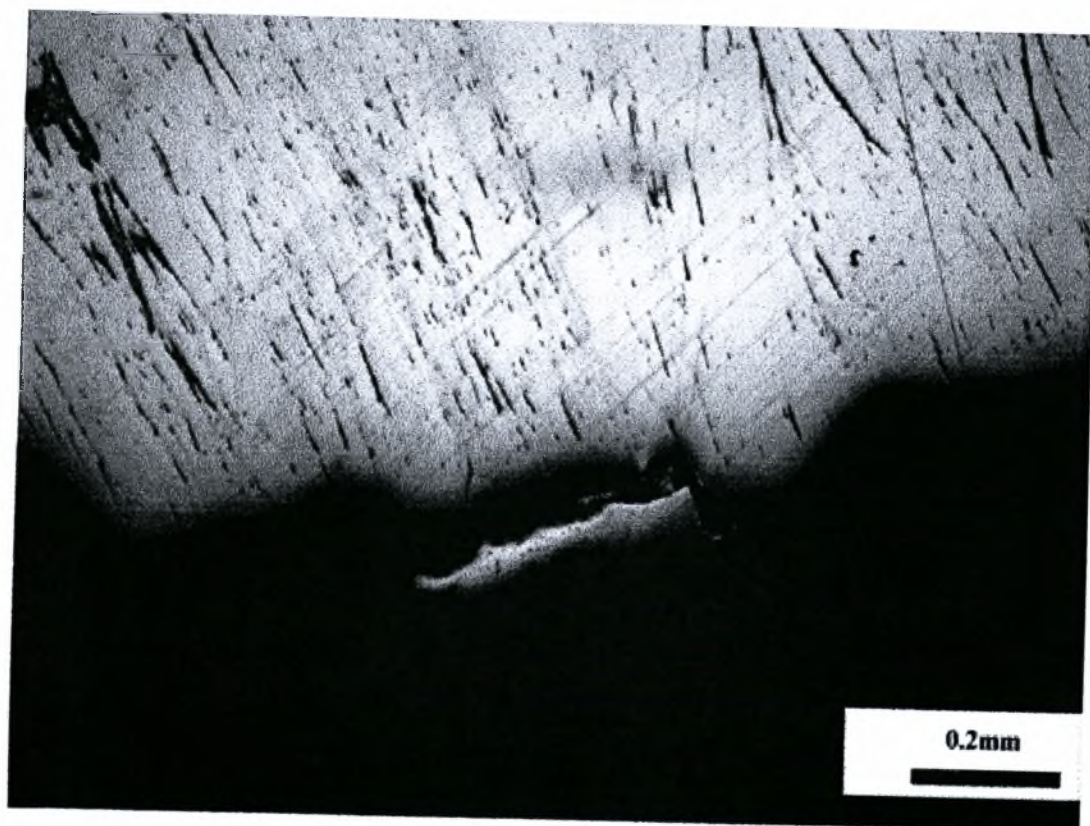


52: Δοκίμιο DIM9-1. Επιφάνεια δοκιμίου

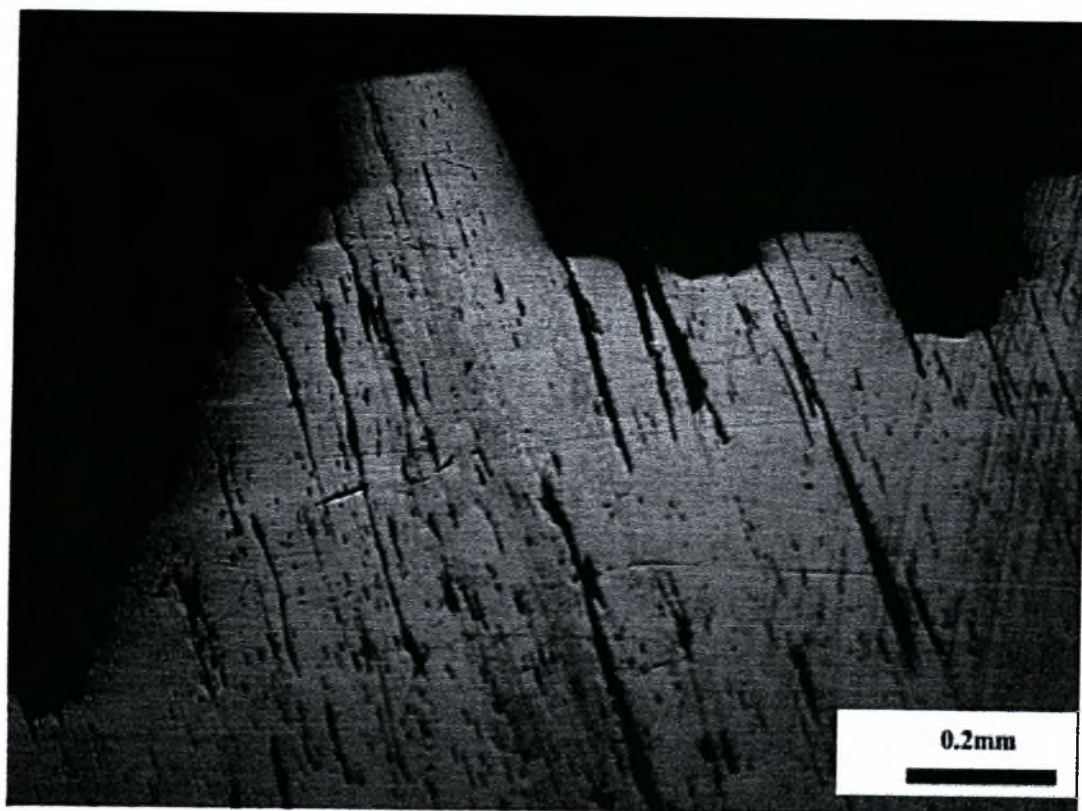




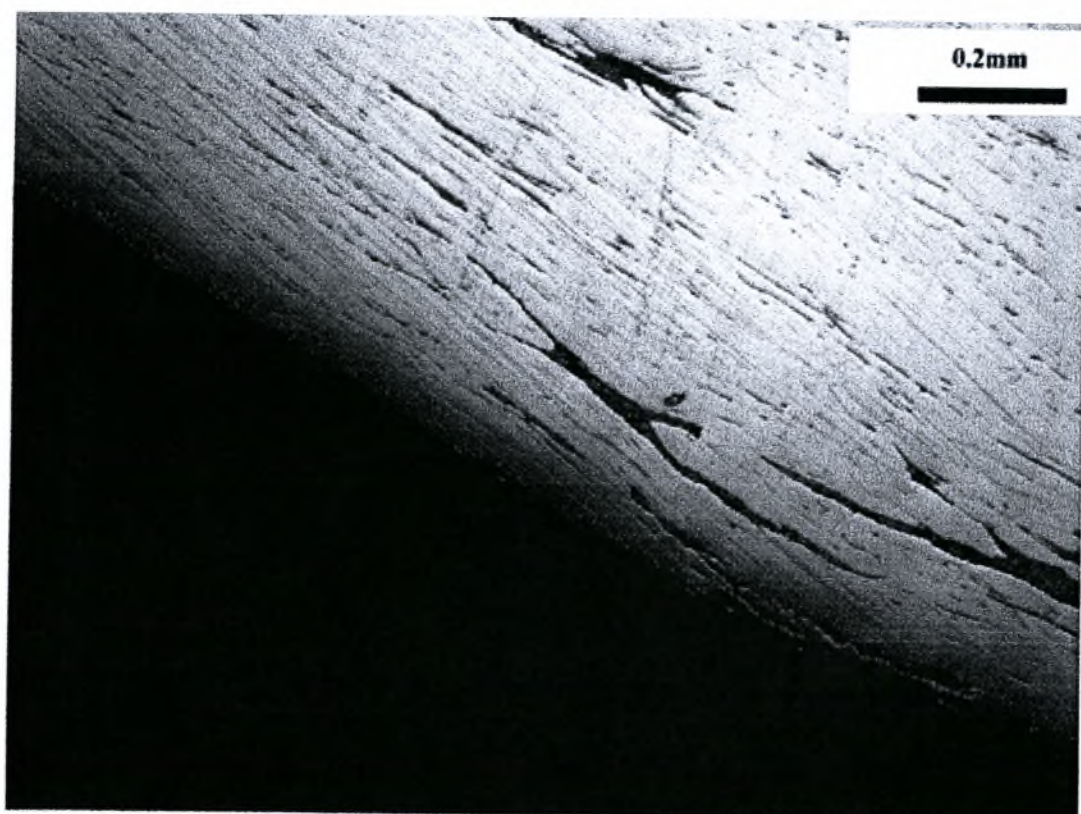
53: Δοκίμιο DIM9-2. Επιφάνεια δοκιμίου



54: Δοκίμιο DIM9-2. Επιφάνεια θραύσης

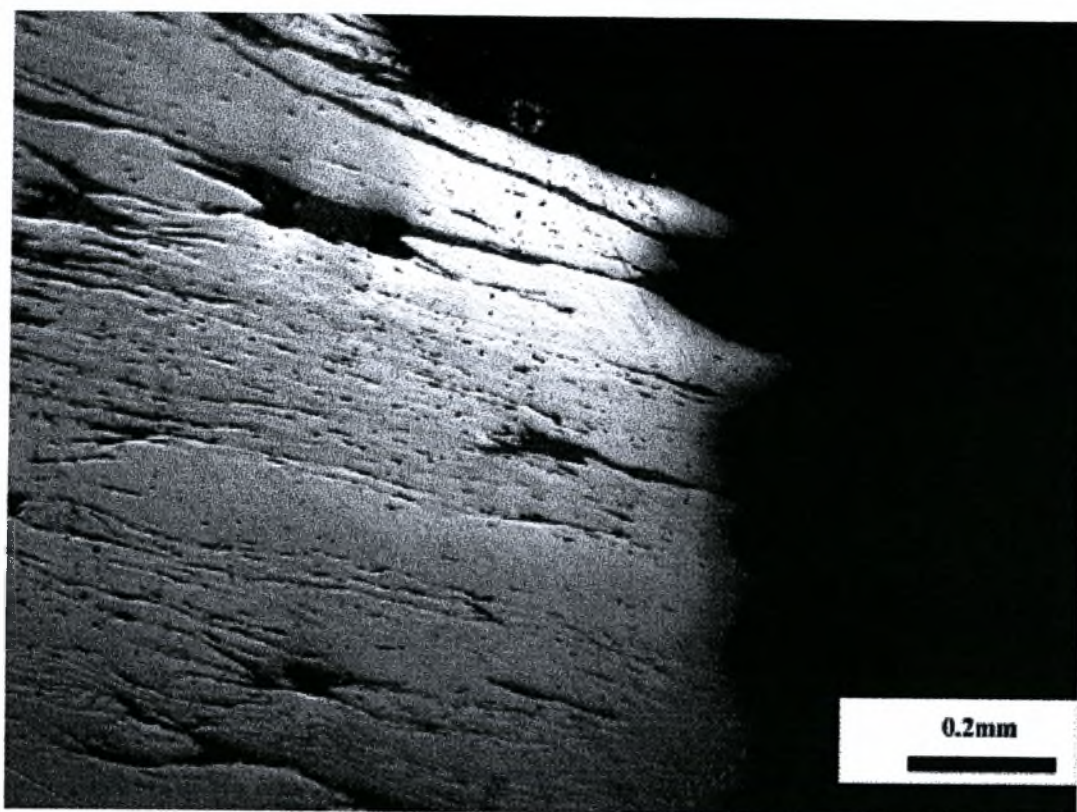


55: Δοκίμιο DIM11-1. Επιφάνεια θραύσης

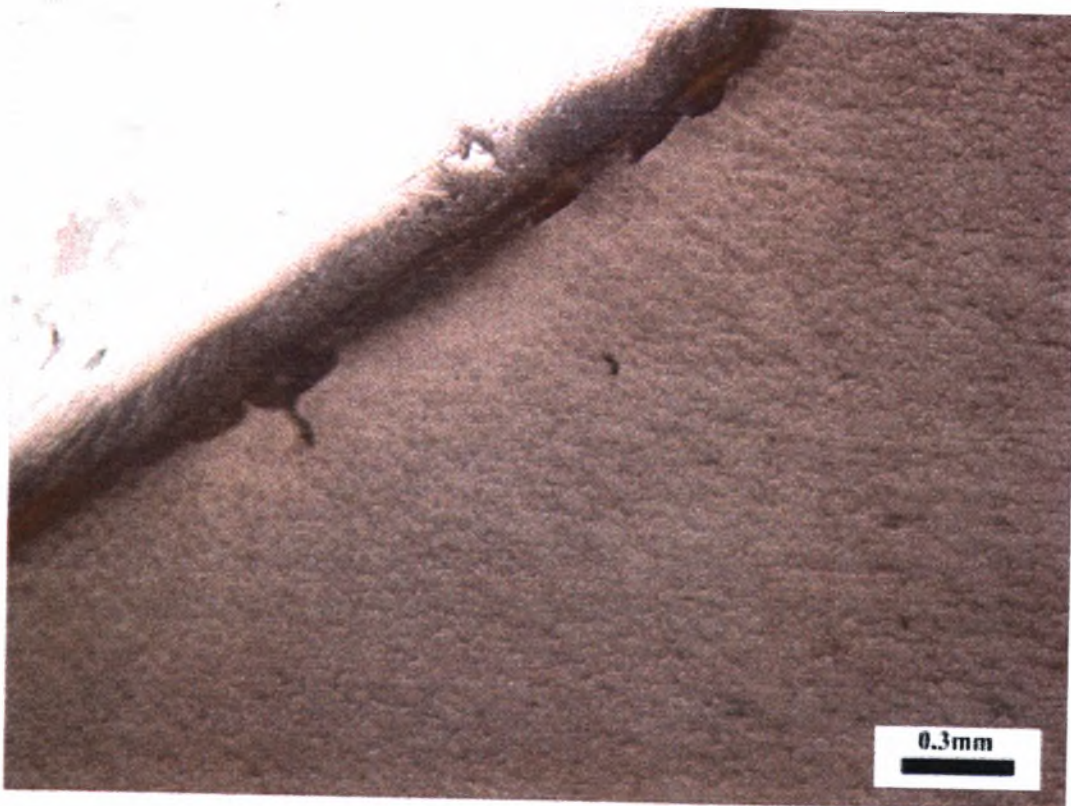


56: Δοκίμιο DIM11-1. Επιφάνεια δοκιμίου

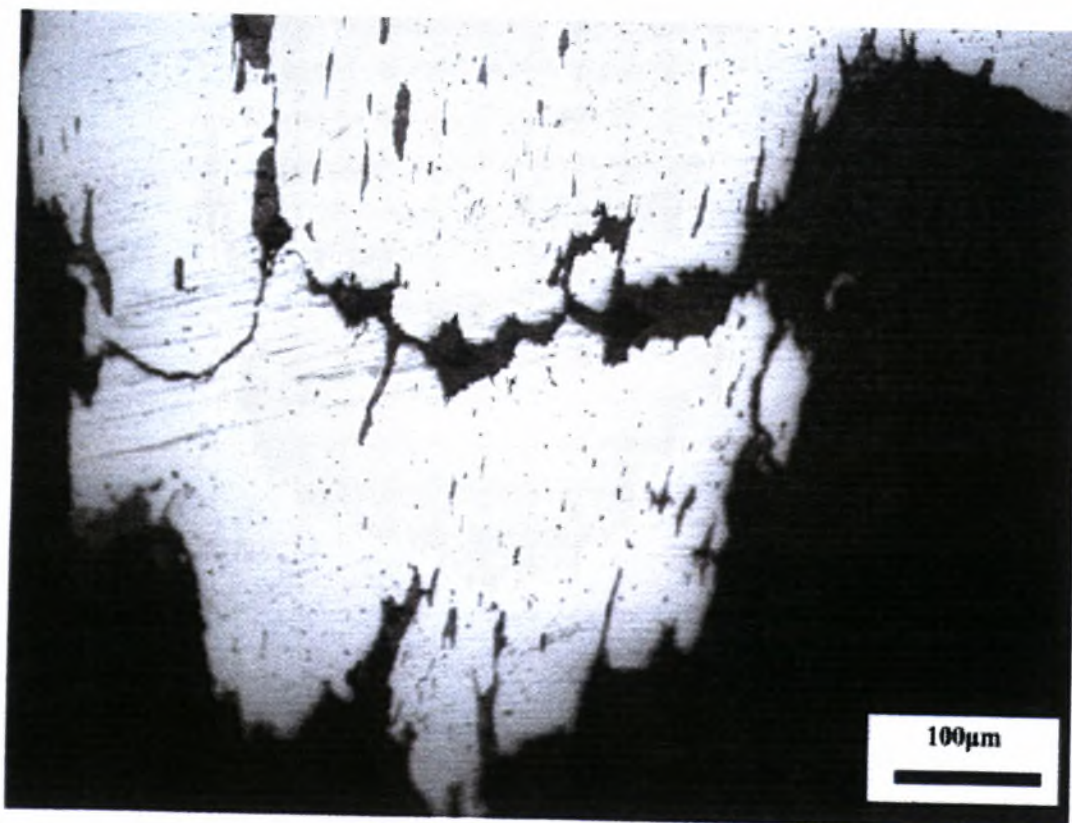




57: Δοκίμιο DIM11-1. Επιφάνεια θραύσης

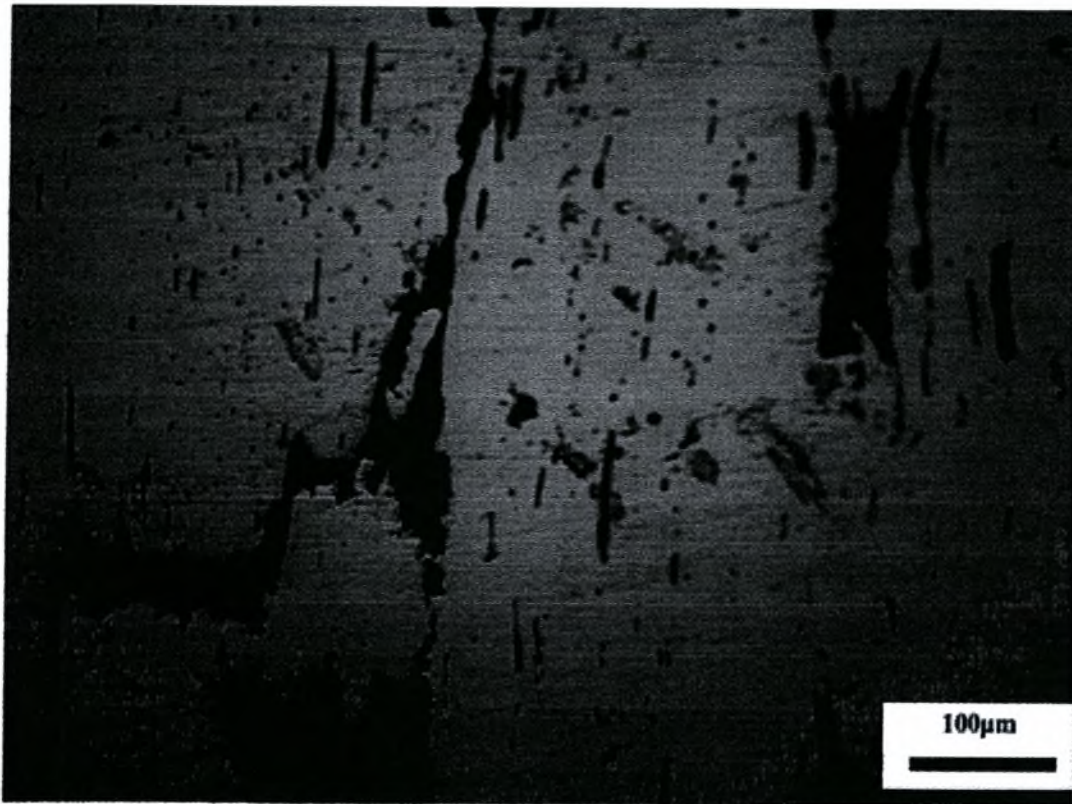


1: Δοκίμιο 311F-1. Διάβρωση στην επιφάνεια του δοκιμίου



2: Δοκίμιο 311F-1. Cracking στην επιφάνεια θραύσης



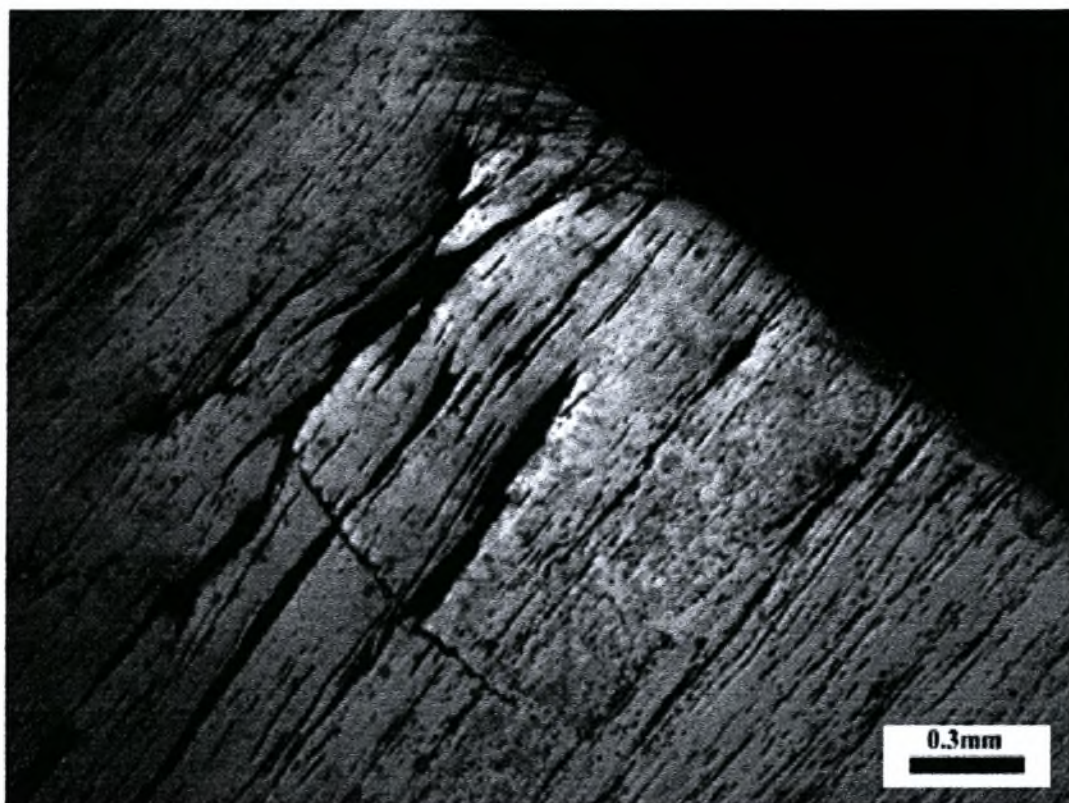


3: Δοκίμιο 311F-2. Cracking στην επιφάνεια θραύσης



4: Δοκίμιο 311F-2. Cracking στην επιφάνεια θραύσης

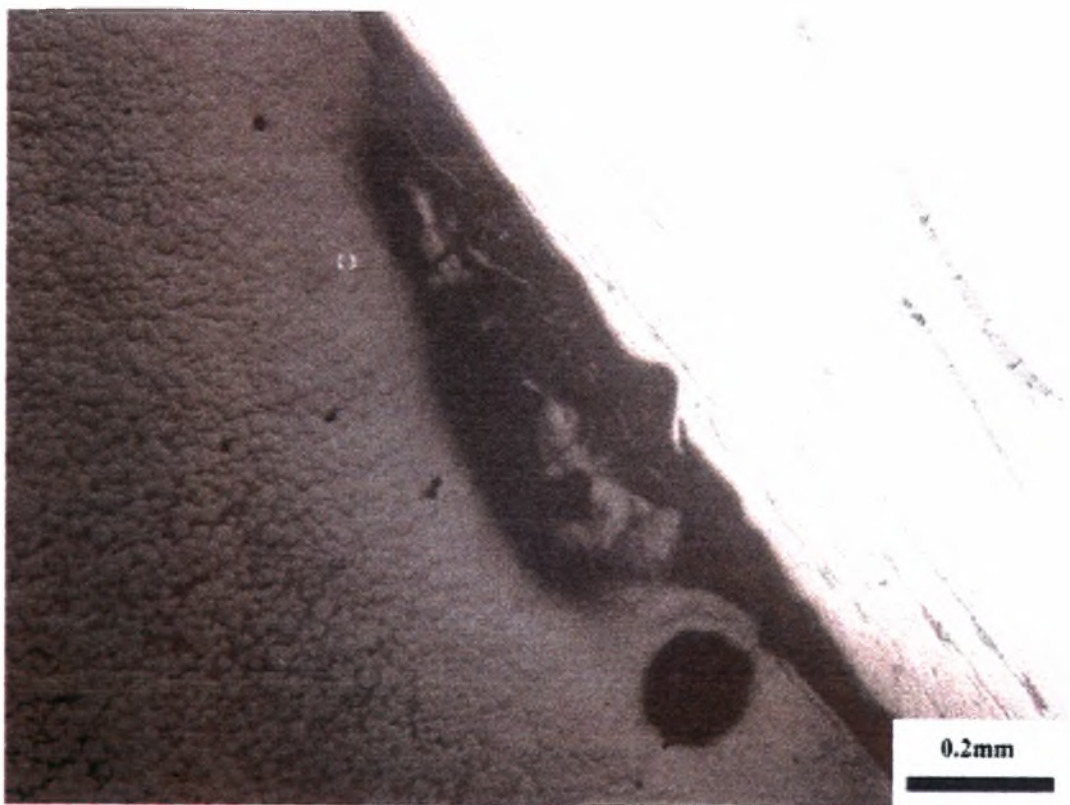




5: Δοκίμιο 3F3. Διάδοση ρωγμής διαμέσου των εγκλεισμάτων στο εσωτερικό του δοκιμίου



6: Δοκίμιο 3F3. Διάδοση ρωγμής από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του δοκιμίου η οποία αναπτύσσεται στον πυθμένα επιφανειακής διάβρωσης

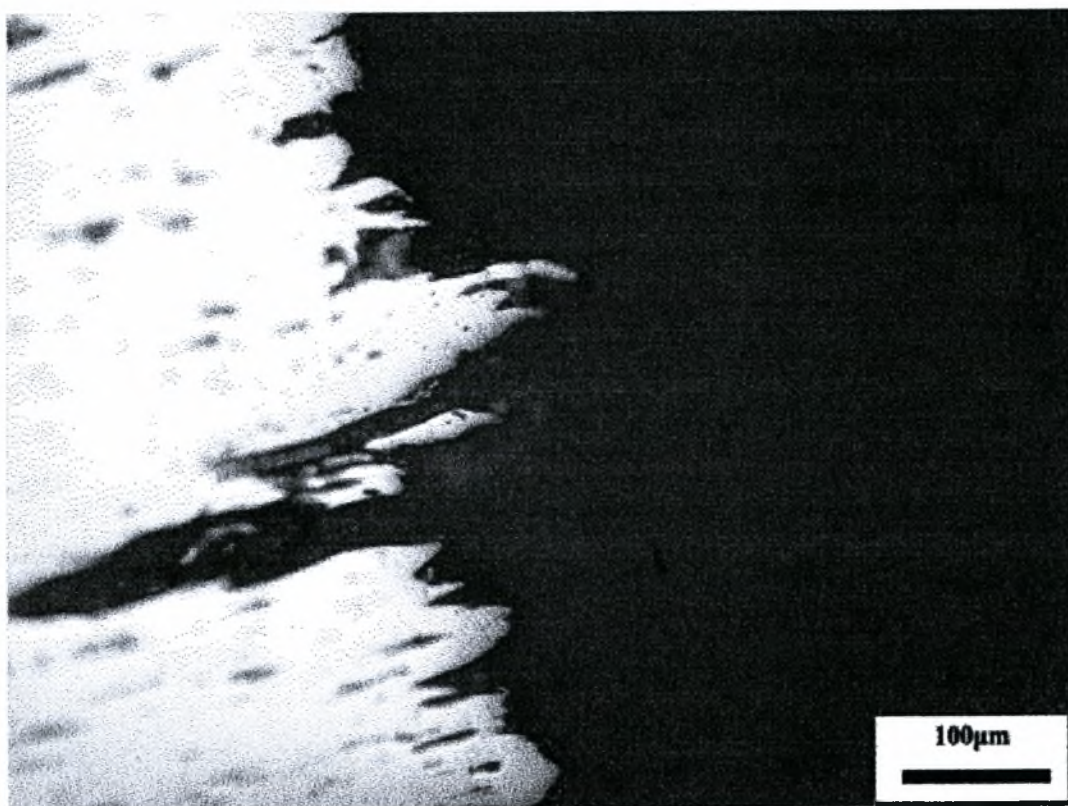


7: Δοκίμιο 301-1. Διάβρωση στην επιφάνεια



8: Δοκίμιο 301-1. Ρηγμάτωση στην επιφάνεια του δοκιμίου





9: Δοκίμιο 301-1. Επιφάνεια θραύσης

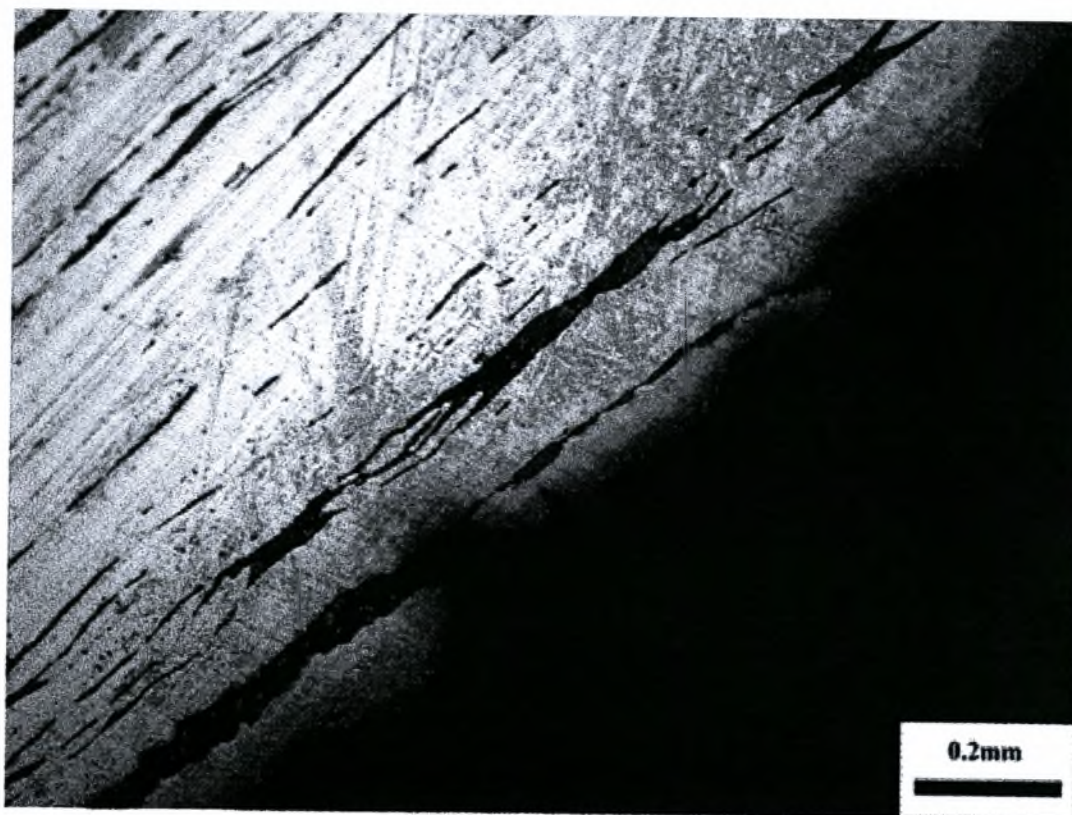


10: Δοκίμιο 301-1. Πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια θραύσης



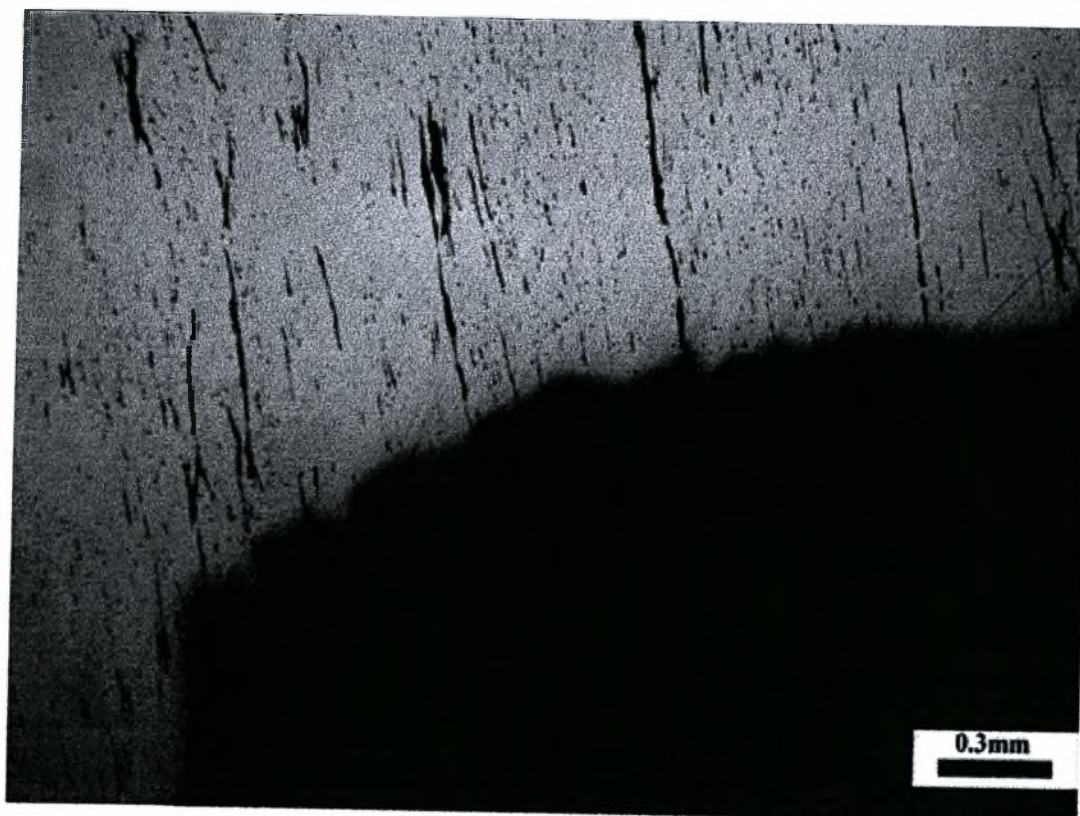


11: Δοκίμιο 301-2. Επιφάνεια θραύσης



12: Δοκίμιο 301-2. Επιφάνεια δοκιμίου με αποκολλήσεις εγκλεισμάτων





13: Δοκίμιο 302-1. Επιφάνεια θραύσης

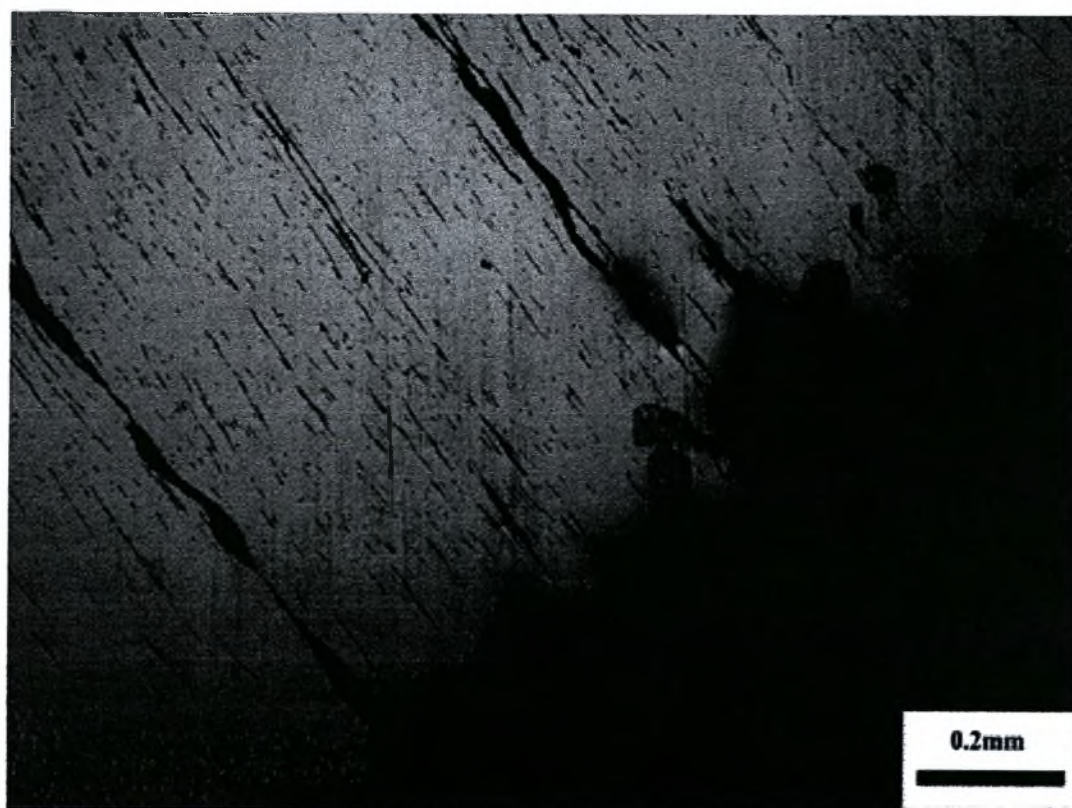


14: Δοκίμιο 302-1. Επιφάνεια θραύσης





15: Δοκίμιο 302-2. Επιφάνεια θραύσης με αποκολλήσεις εγκλεισμάτων

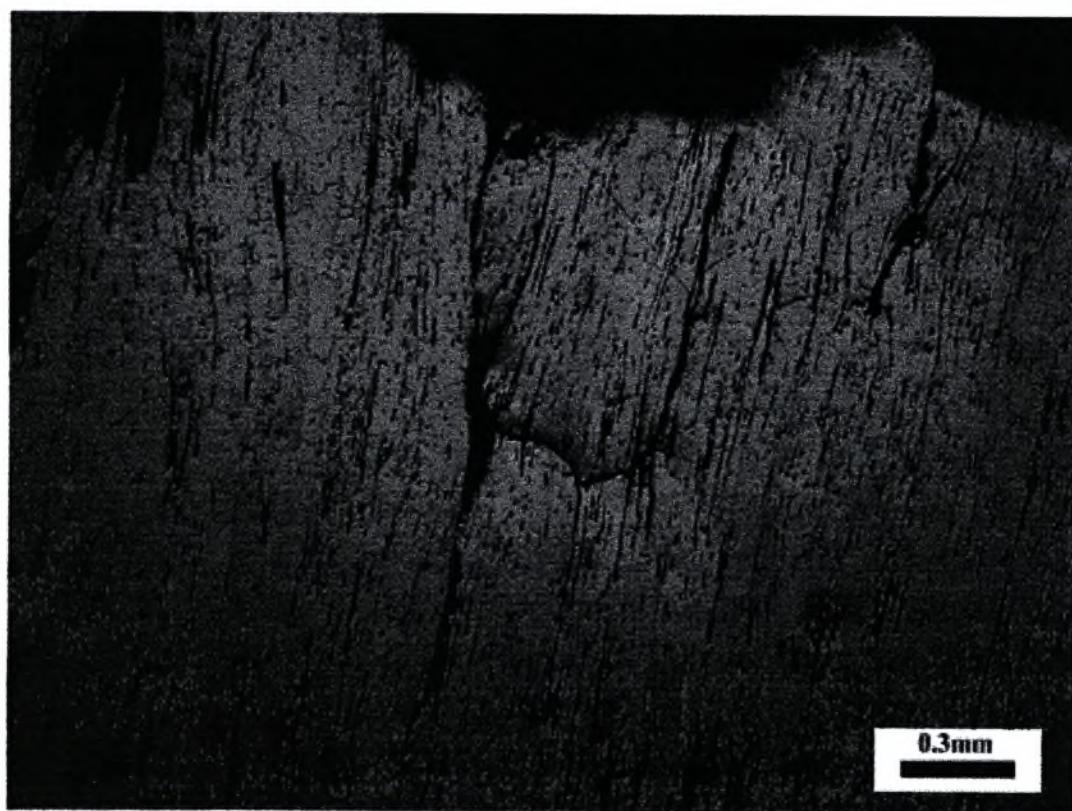


16: Δοκίμιο 302-2. Επιφάνεια θραύσης

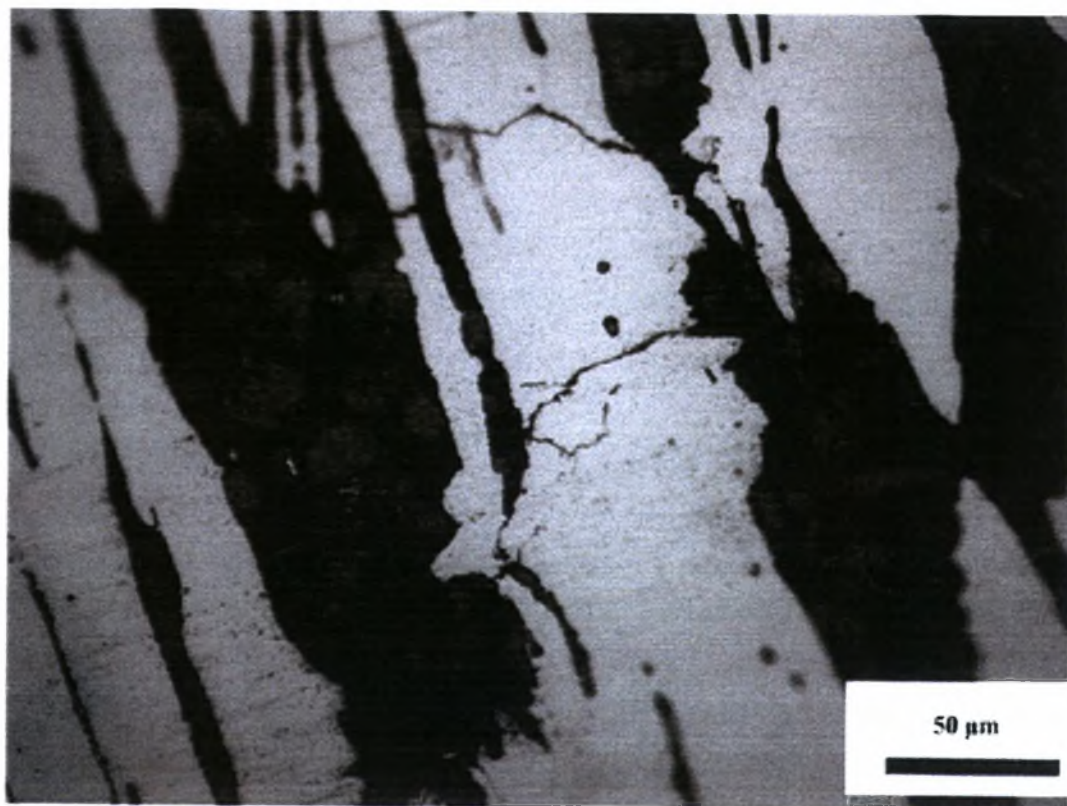




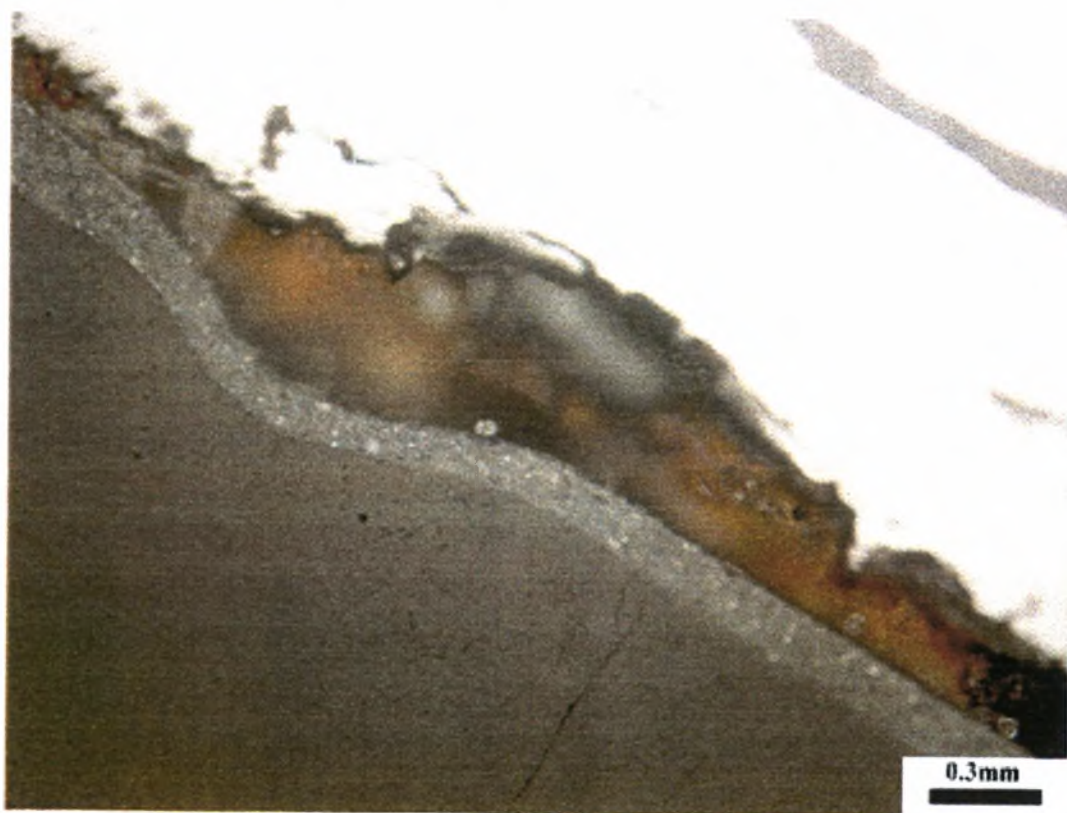
17: Δοκίμιο 303-1. Επιφάνεια θραύσης με ανάπτυξη ρωγμής



18: Δοκίμιο 303-1. Επιφάνεια θραύσης με ανάπτυξη ρωγμής

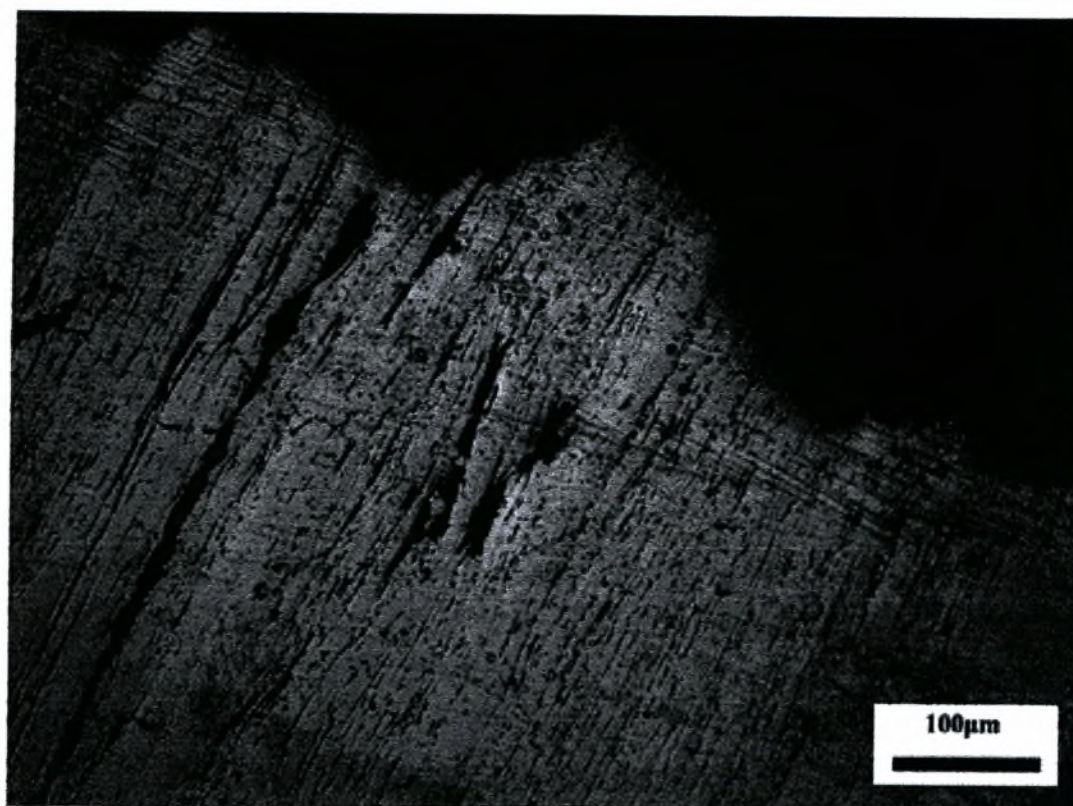


19: Δοκίμιο 303-1. Ανάπτυξη network μικρορωγμών μεταξύ εγκλεισμάτων

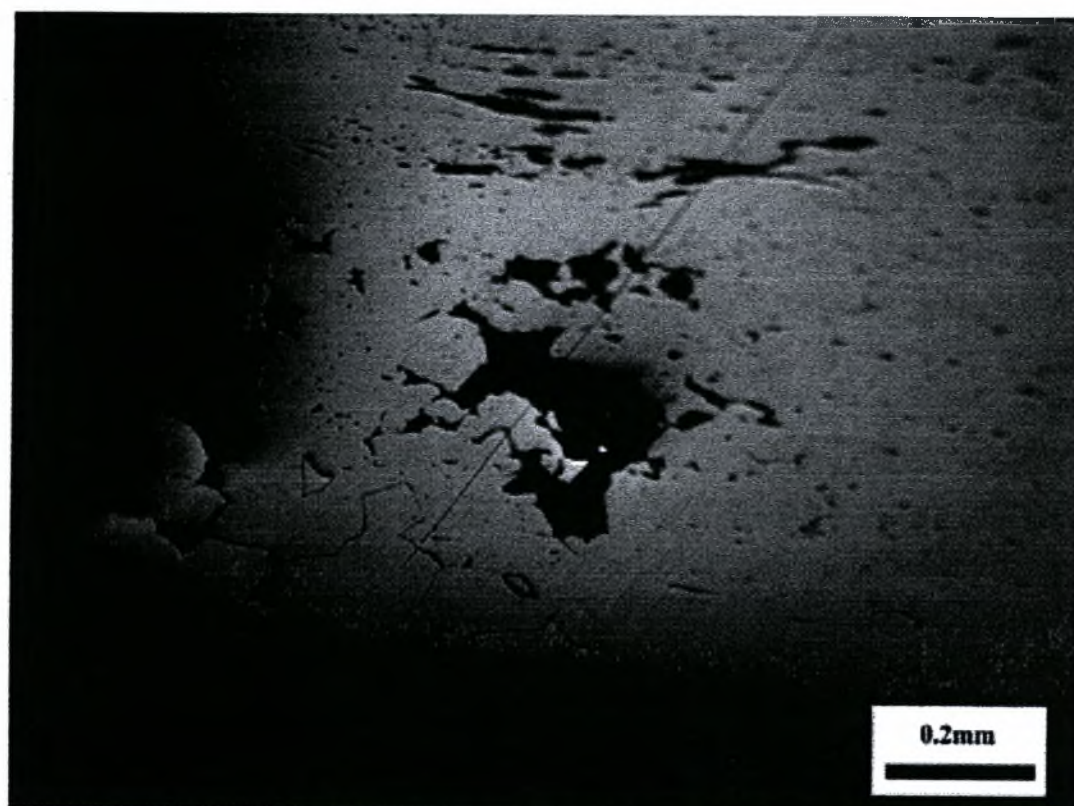


20: Δοκίμιο 303-2. Διαβρώσεις στην επιφάνεια

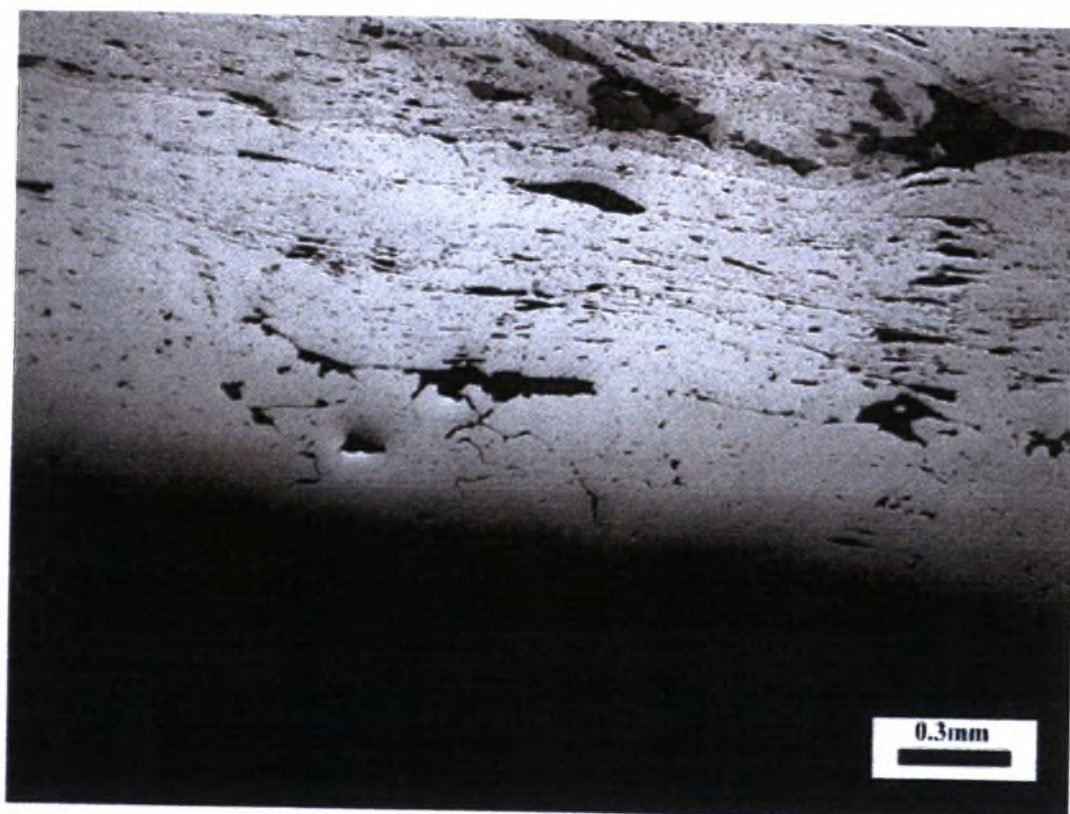




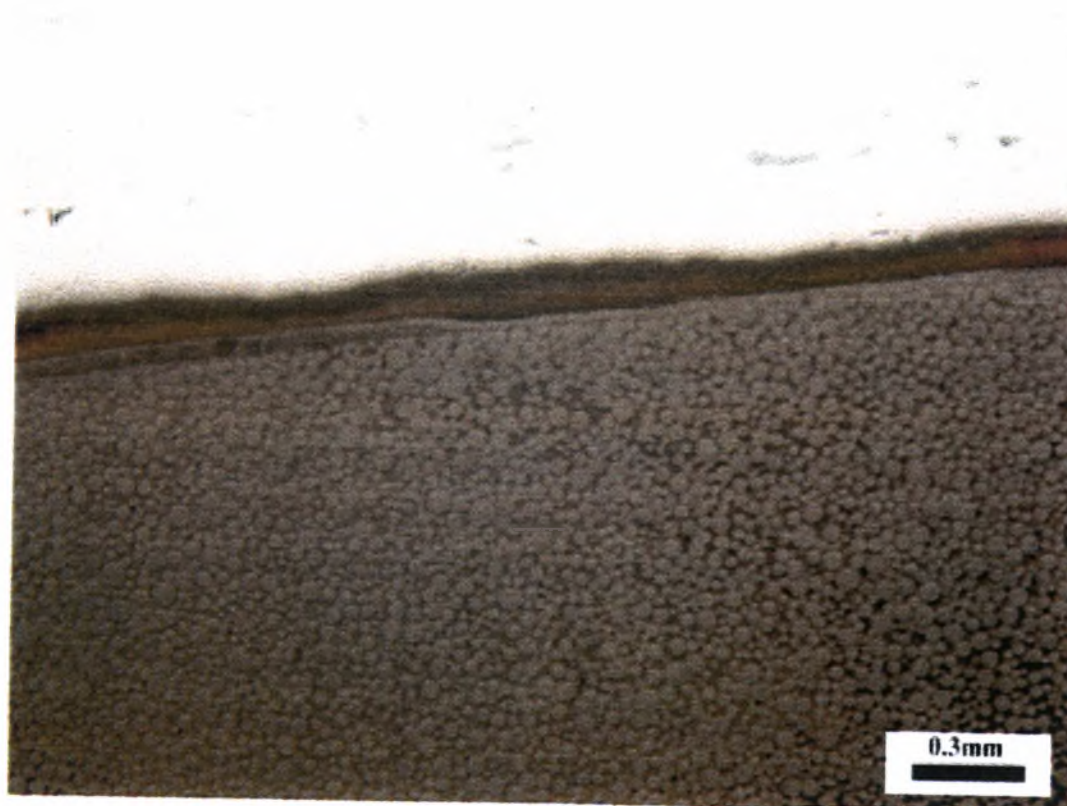
21: Δοκίμιο 303-2. Επιφάνεια θραύσης



22: Δοκίμιο 3F2-1. Μικρορωγμές στην επιφάνεια

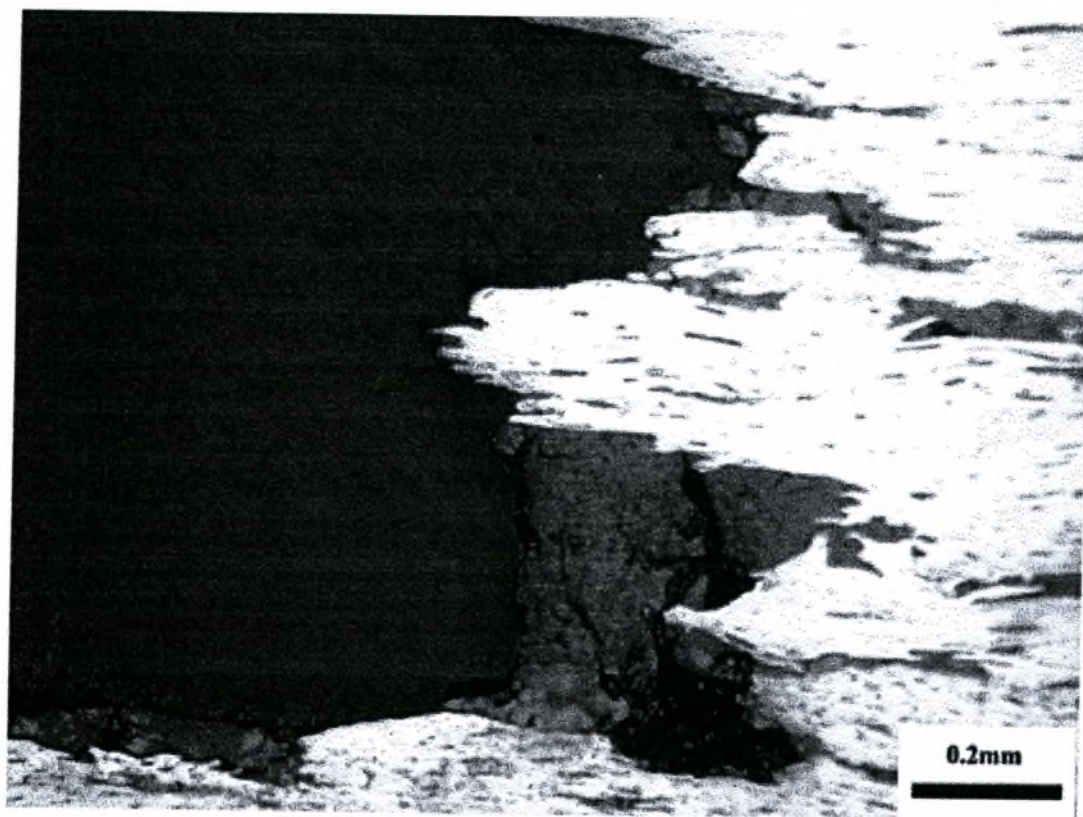


23: Δοκίμιο 3F2-1. Διάβρωση και μικρορωγμές στην επιφάνεια

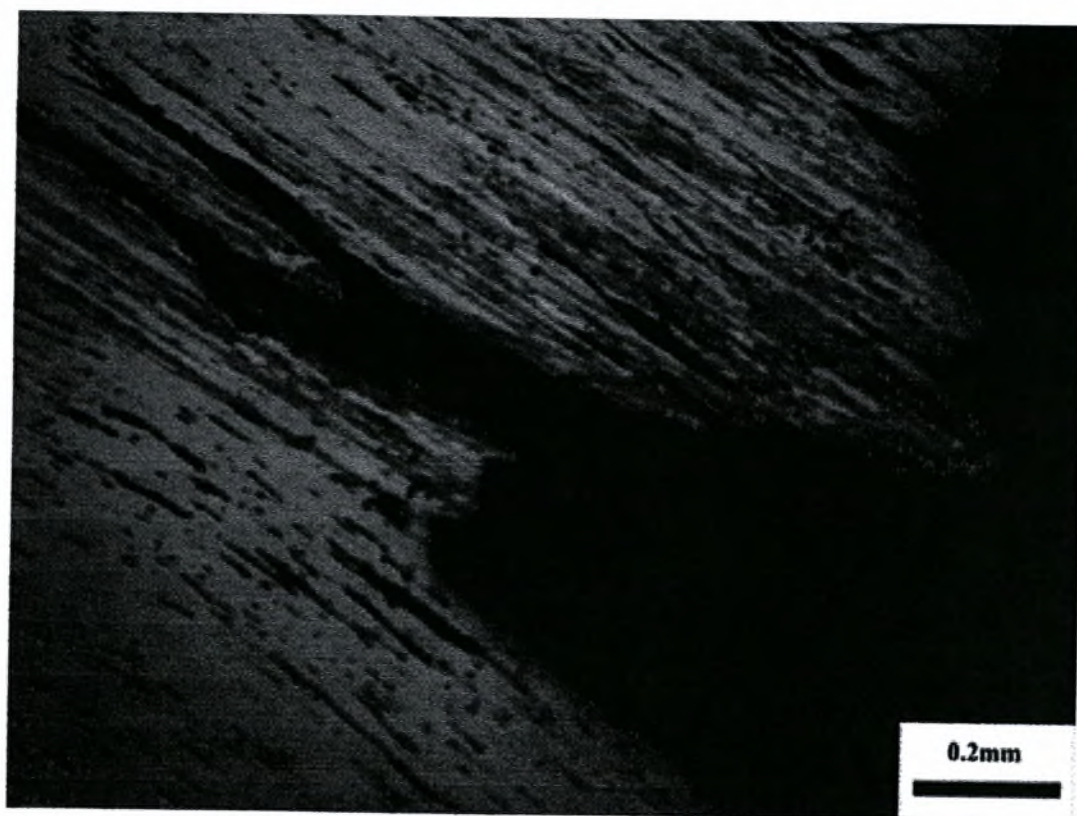


24: Δοκίμιο 3F2-2. Διάβρωση στην επιφάνεια



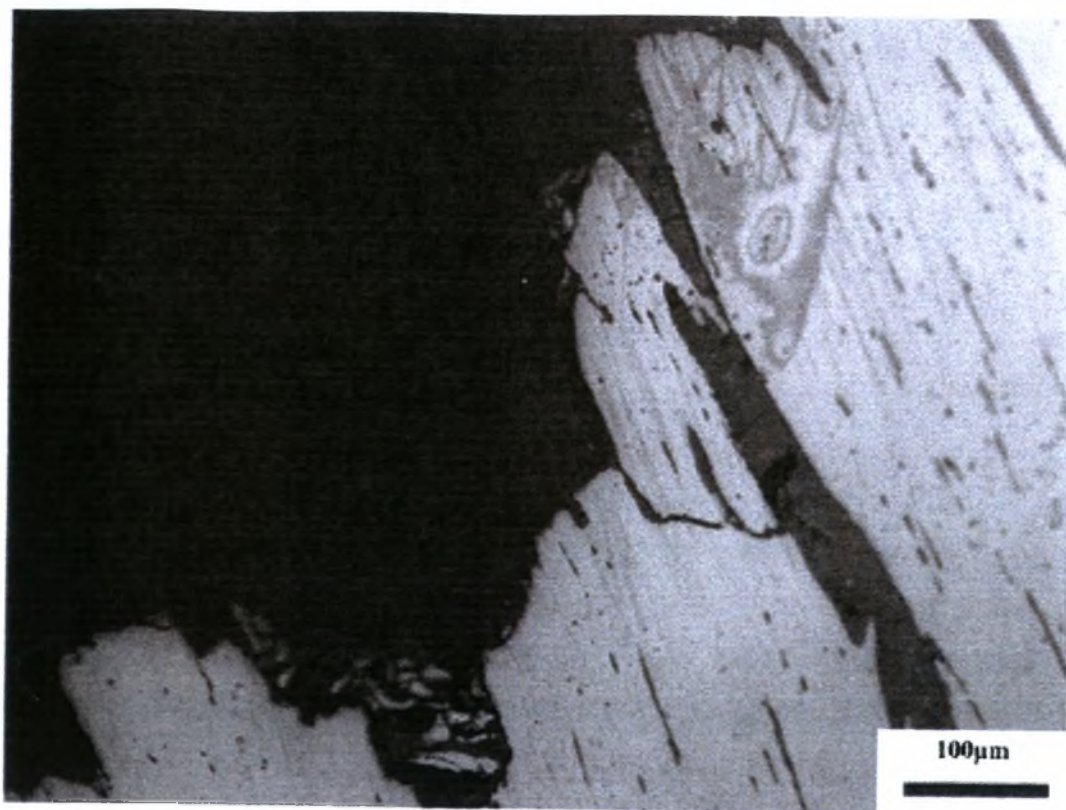


25: Δοκίμιο 3F2-2. Αποφλοίωση στην επιφάνεια θραύσης

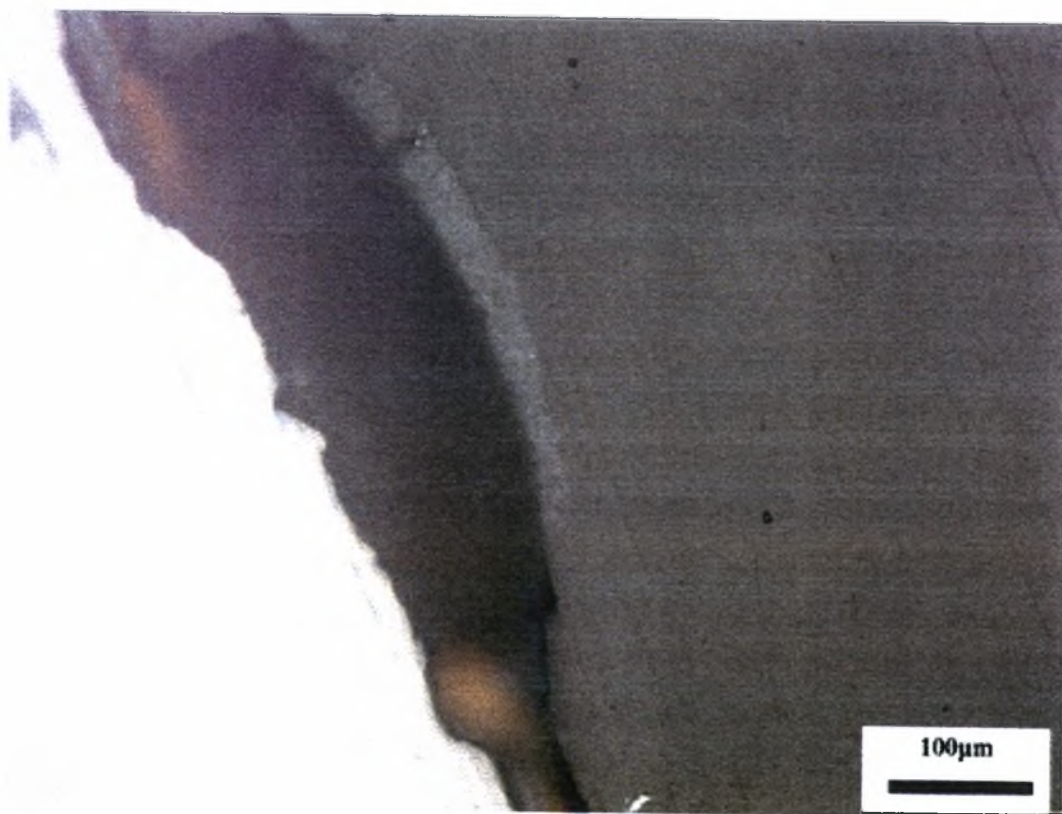


26: Δοκίμιο 304-1. Διάδοση ρήγματος στην επιφάνεια θραύσης

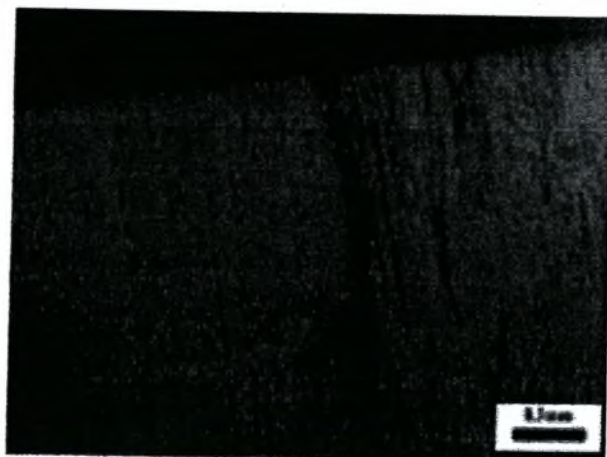




27: Δοκίμιο 304-2. Ανάπτυξη ρωγμής στην επιφάνεια θραύσης

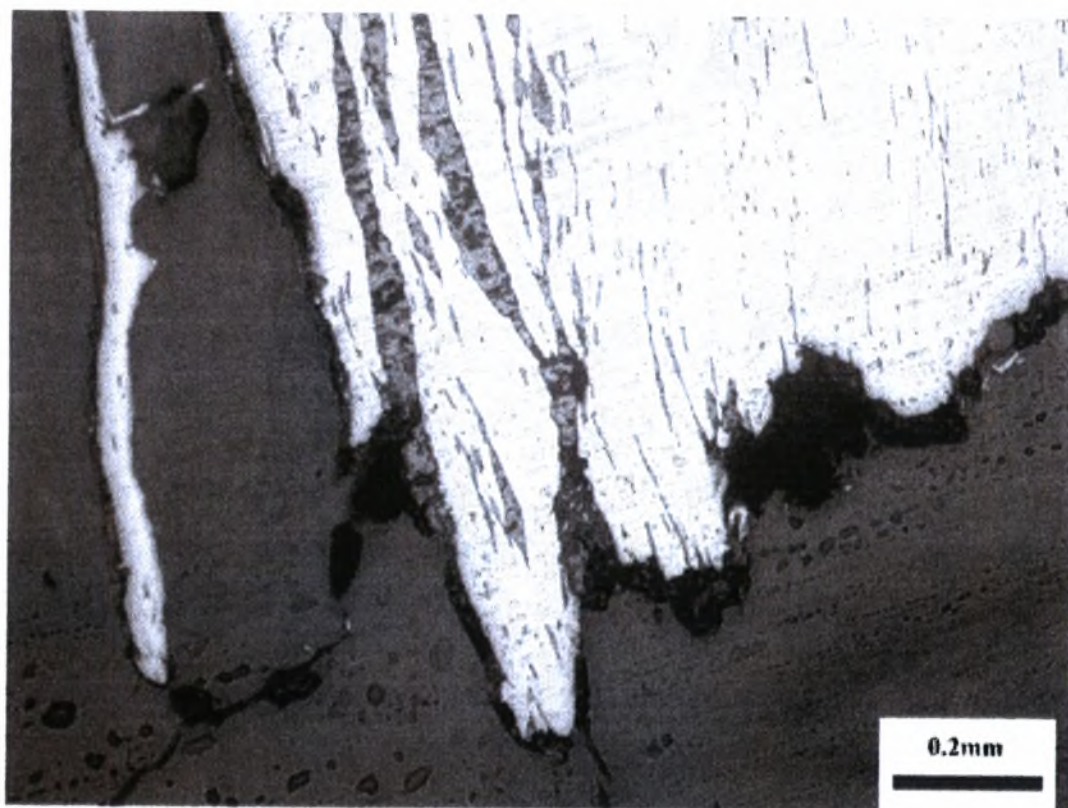


28: Δοκίμιο 304-2. Διάβρωση στην επιφάνεια του δοκιμίου



29: Δοκίμιο 305-1. Διάσχιση δοκιμίου από ρωγμή που διαδίδεται προς το εσωτερικό του υλικού διαμέσου των εγκλεισμάτων





30: Δοκίμιο 305-2. Επιφάνεια θραύσης

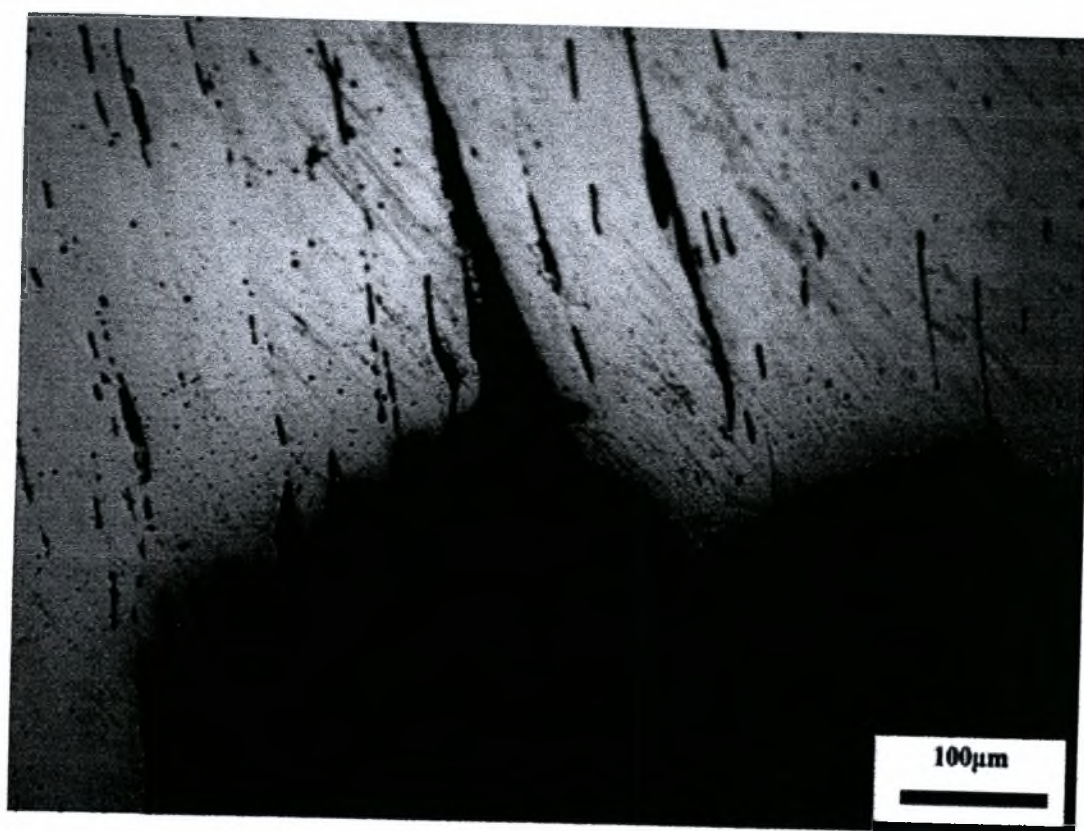


31: Δοκίμιο 305-2. Διαβρώσεις στην επιφάνεια

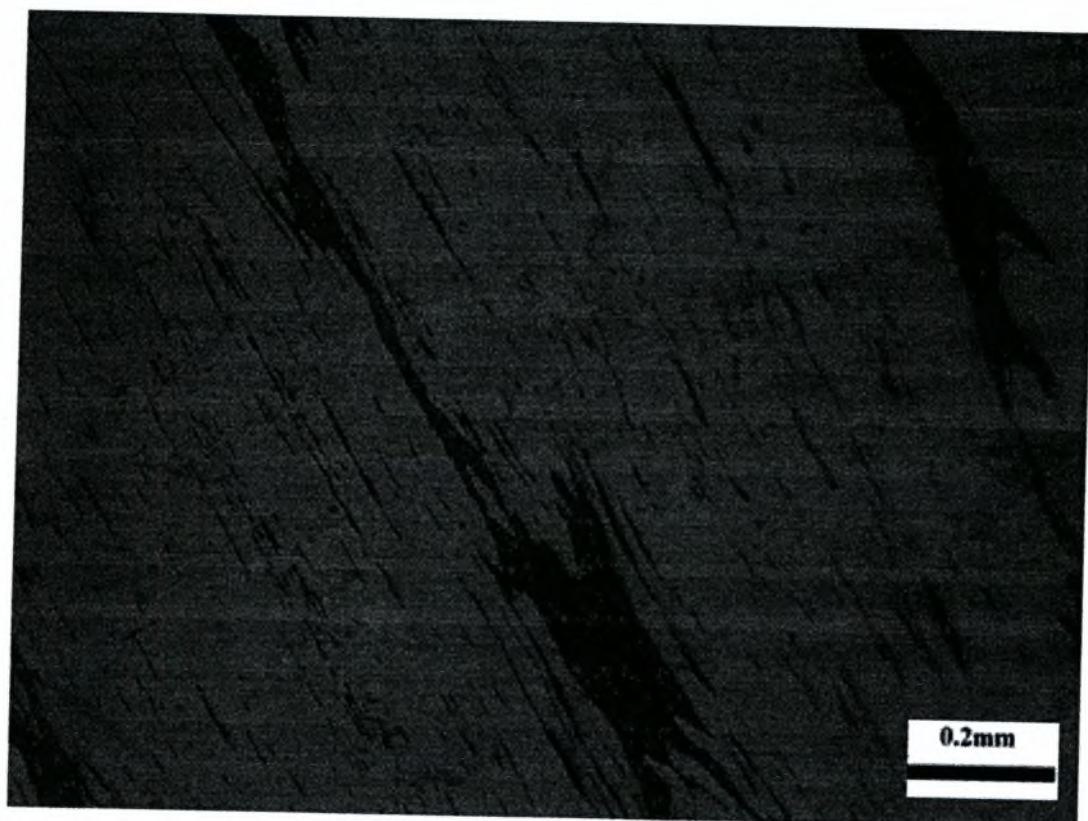




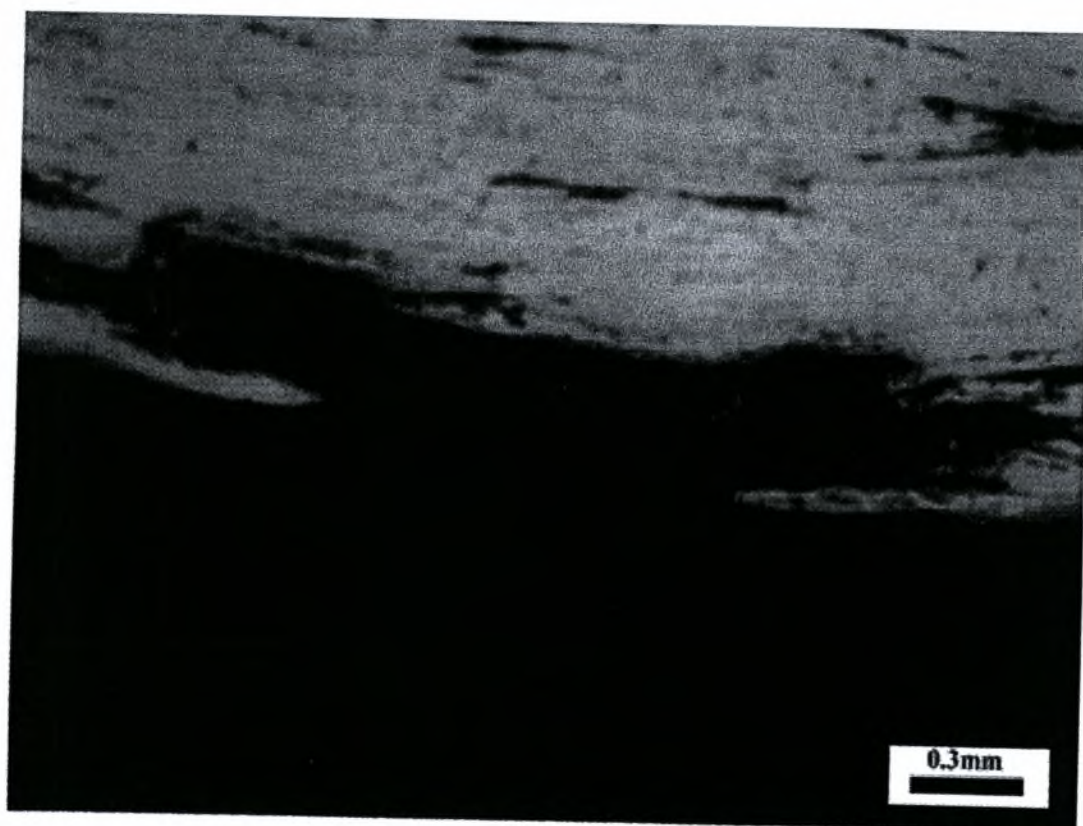
32: Δοκίμιο 306-1. Διάδοση ρωγμής διαμέσου των εγκλεισμάτων



33: Δοκίμιο 306-1. Επιφάνεια θραύσης

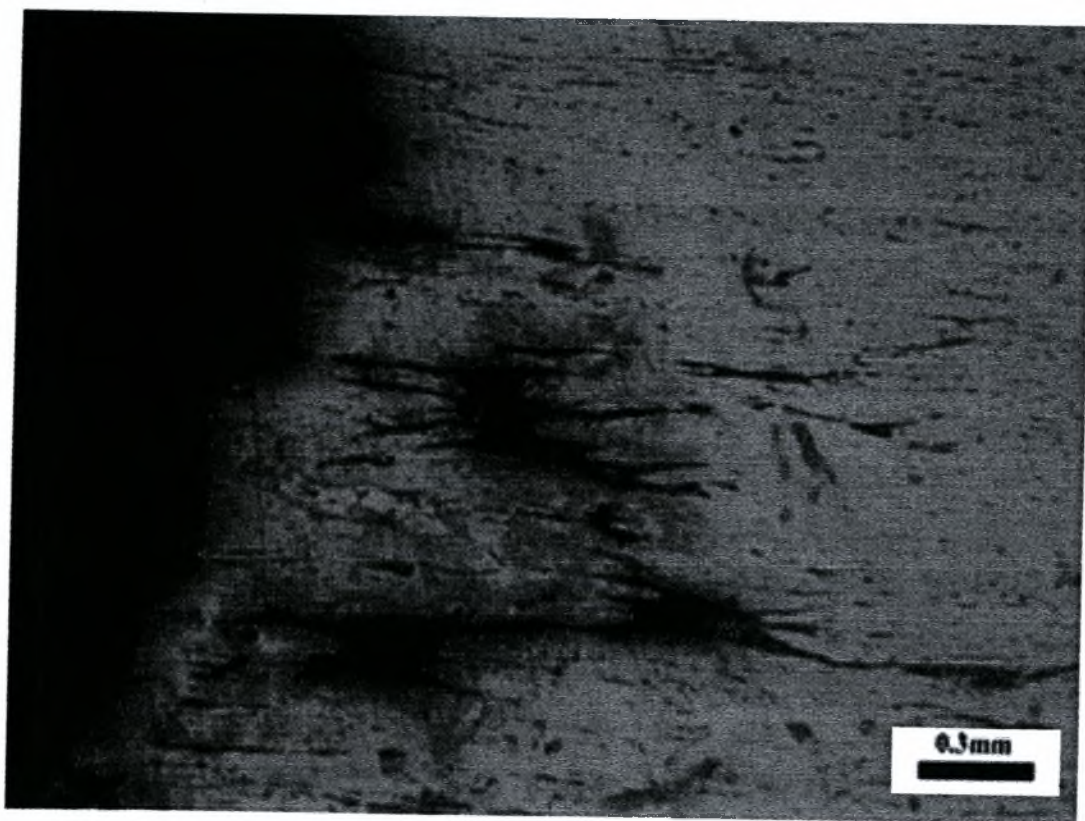


34: Δοκίμιο 307F-2. Φερριτική μικροδομή με παρουσία διαμηκών εγκλεισμάτων

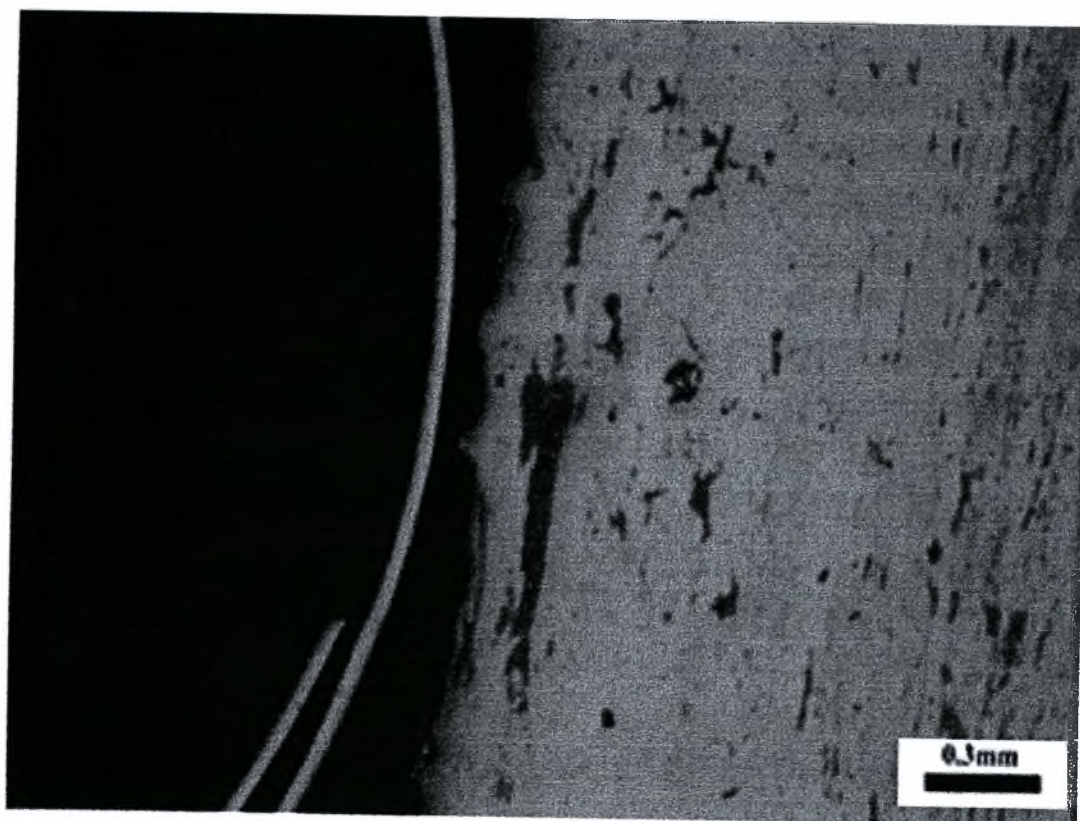


35: Δοκίμιο 3F4. Διαβρώσεις στην επιφάνεια



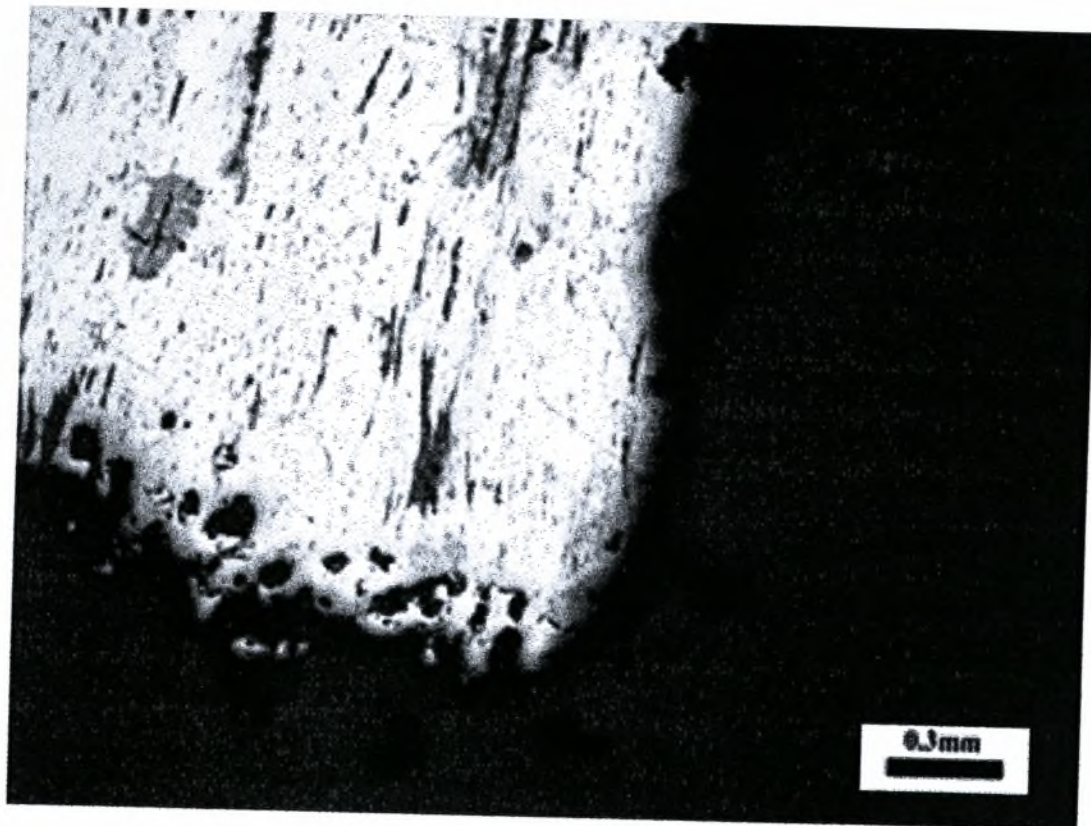


36: Δοκίμιο 3F4. Ρωγμές στην επιφάνεια θραύσης οι οποίες αρχίζουν από επιφανειακή διάβρωση



37: Δοκίμιο 3F1-1. Μικρορηγματώσεις στην επιφάνεια





38: Δοκίμιο 3F1-1. Διαβρώσεις στην επιφάνεια θραύσης και στην επιφάνεια του δοκιμίου

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

### 5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η θραυστογραφία των δοκιμίων που ελήφθησαν από τη γέφυρα του Εύηνου και του Δίμηκου.

#### 5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑΣ

α) Ακολουθούν οι παρατηρήσεις που αφορούν τη θραυστογραφία της γέφυρας του Δίμηκου:

Στις φωτογραφίες 1-6 έχουμε την παρουσία striations κόπωσης και αλληλεπίδραση κόπωσης και εγκλεισμάτων καθώς και επιτάχυνση της κόπωσης με τοπική γρήγορη θραύση. Επίσης την παρουσία ψαθυρών περιοχών όπου υπάρχει είτε καθαρή διάσχιση του υλικού (cleavage) είτε θραύση των εγκλεισμάτων

Στις φωτογραφίες 7-11 έχουμε την παρουσία striations κόπωσης, περικρυσταλλικής διάβρωσης και περιοχών γρήγορης διάσχισης

Στη φωτογραφία 12 έχουμε την παρουσία striations κόπωσης και περιοχές γρήγορες διάσχισης

β) Ακολουθούν οι παρατηρήσεις που αφορούν τη θραυστογραφία της γέφυρας του Εύηνου:

Στις φωτογραφίες 1-4 έχουμε την παρουσία πορώδους και περικρυσταλλικής διάβρωσης καθώς και μεγάλου μεγέθους εγκλείσματα που ευνοούν τη γρήγορη θραύση

Στις φωτογραφίες 5-11 έχουμε την παρουσία striations κόπωσης και την αλληλεπίδραση κόπωσης και εγκλεισμάτων καθώς και επιτάχυνση της κόπωσης με τοπική γρήγορη θραύση. Επίσης την παρουσία ψαθυρών περιοχών όπου υπάρχει είτε καθαρή διάσχιση του υλικού είτε θραύση των εγκλεισμάτων

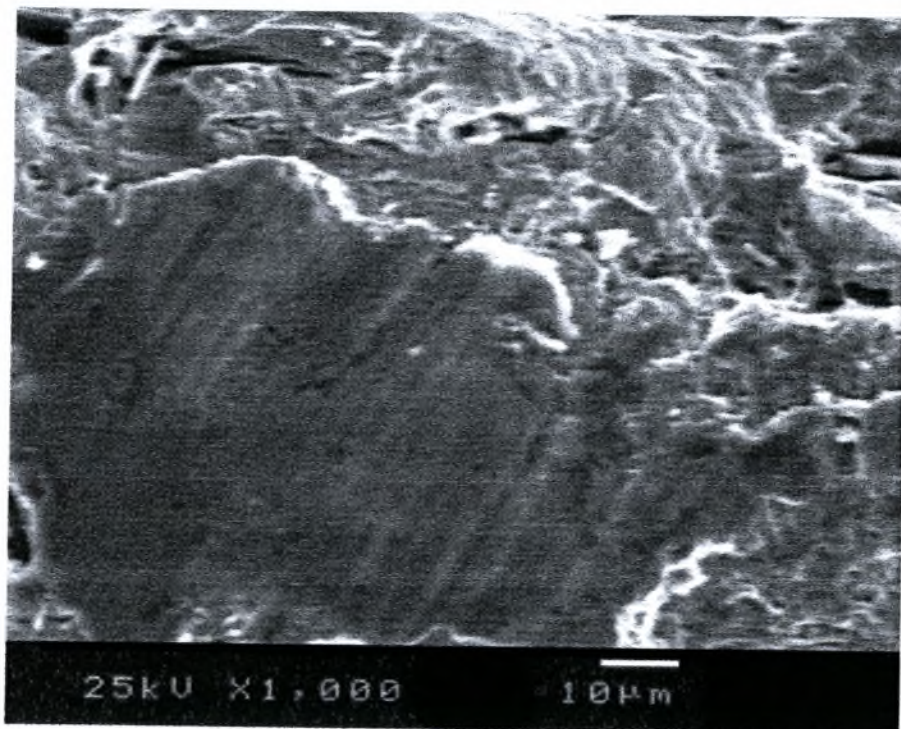
Στις φωτογραφίες 12-14 έχουμε την παρουσία striations κόπωσης και εγκλεισμάτων που επιταχύνουν τη θραύση

Στις φωτογραφίες 15-16 παρουσιάζεται περικρυσταλλική διάβρωση κοντά στην επιφάνεια

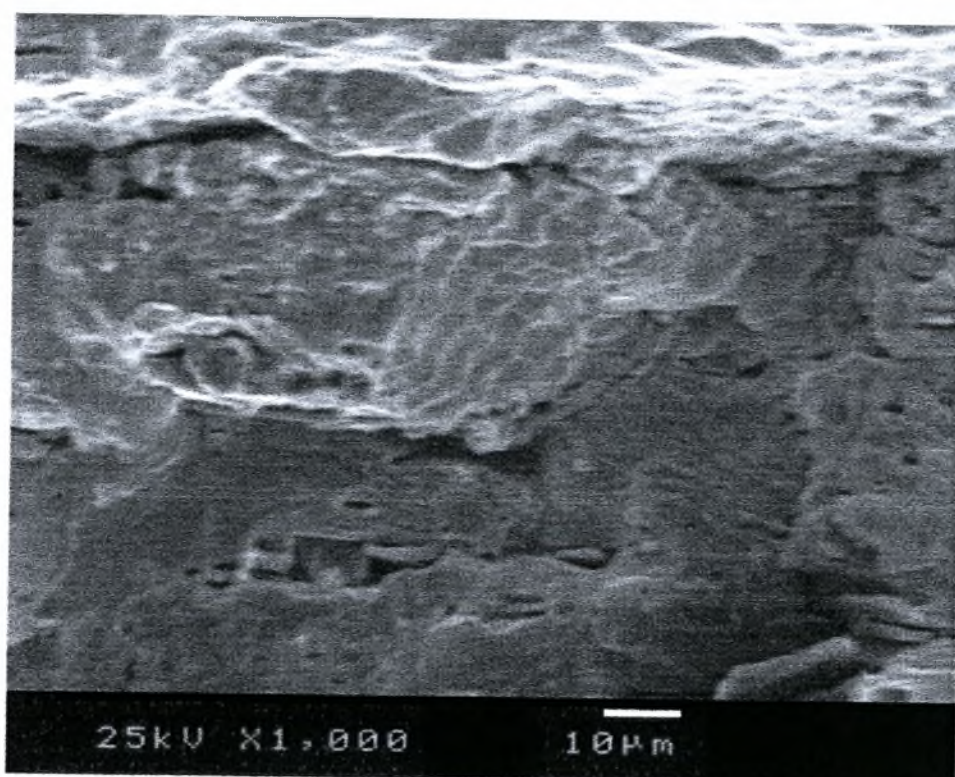
Στις φωτογραφίες 17-18 έχουμε την παρουσία εγκλεισμάτων και λίγες περιοχές με striations κόπωσης

Στις φωτογραφίες 19-22 έχουμε περικρυσταλλική θραύση και περιοχές γρήγορης διάσχισης

Στις φωτογραφίες 23-26 παρουσιάζονται striations κόπωσης και περιοχές γρήγορης διάσχισης

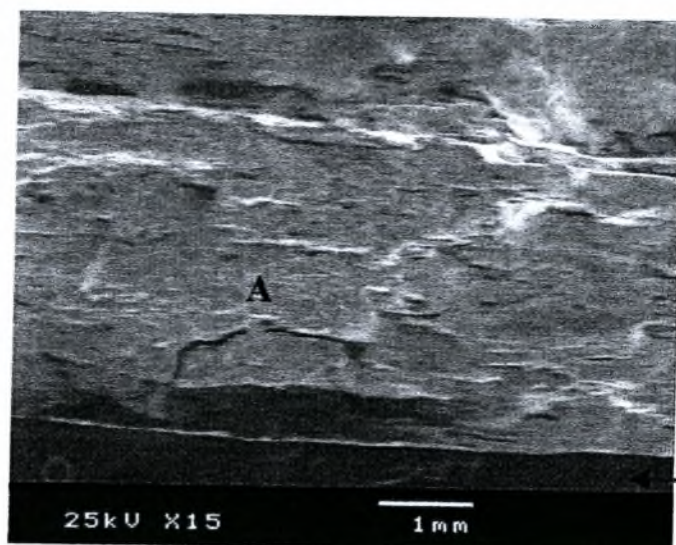


1: Δοκίμιο 3DIM5 Striations κόπωσης



2: Δοκίμιο 3DIM5 Striations κόπωσης

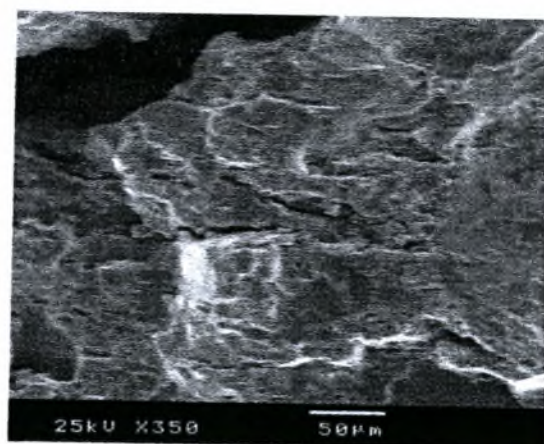




Επιφάνεια  
δοκιμίου

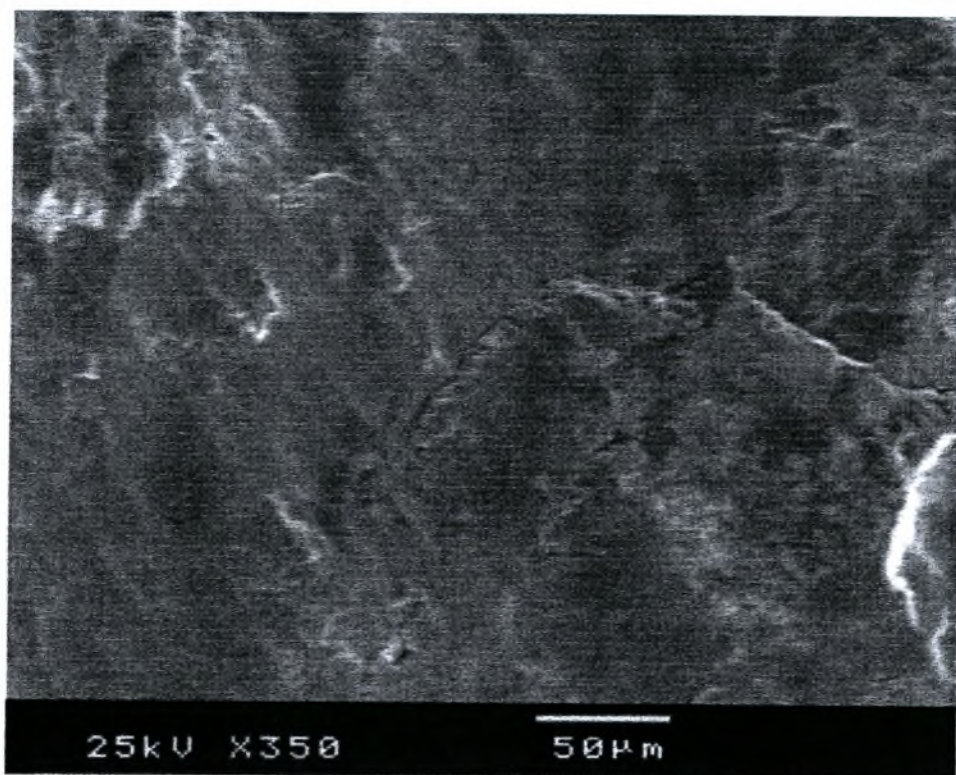


Λεπτομέρεια περιοχής Α

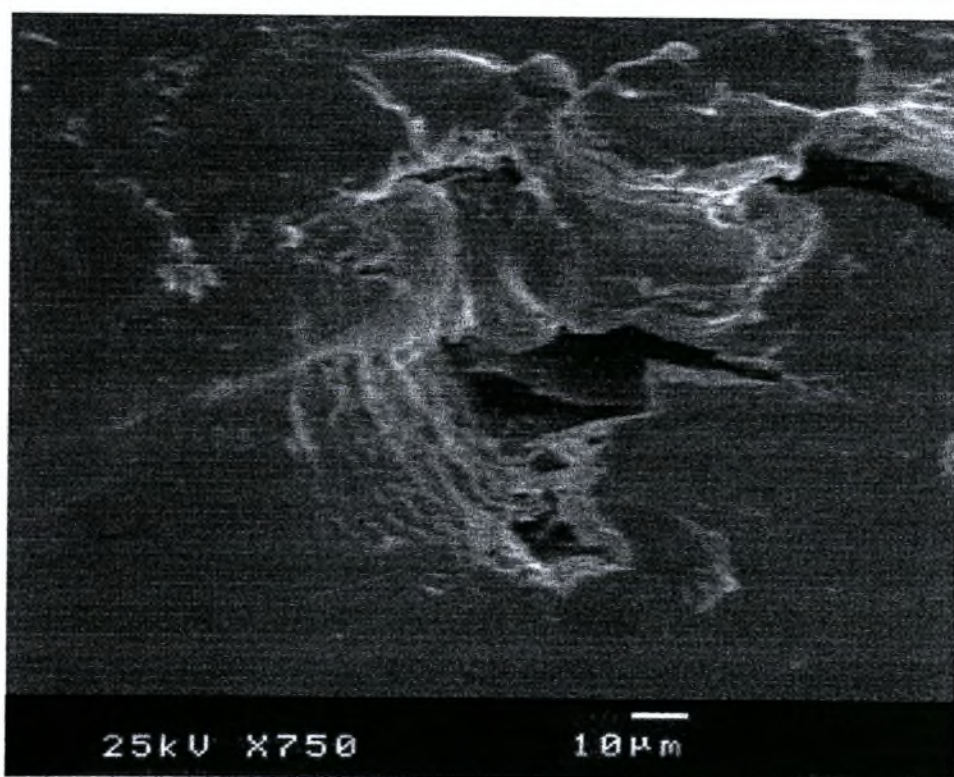


Λεπτομέρεια περιοχής Β

3: Δοκίμιο 3DIM5 Διάδοση ρήγματος από την επιφάνεια θραύσης προς το εσωτερικό του δοκιμίου

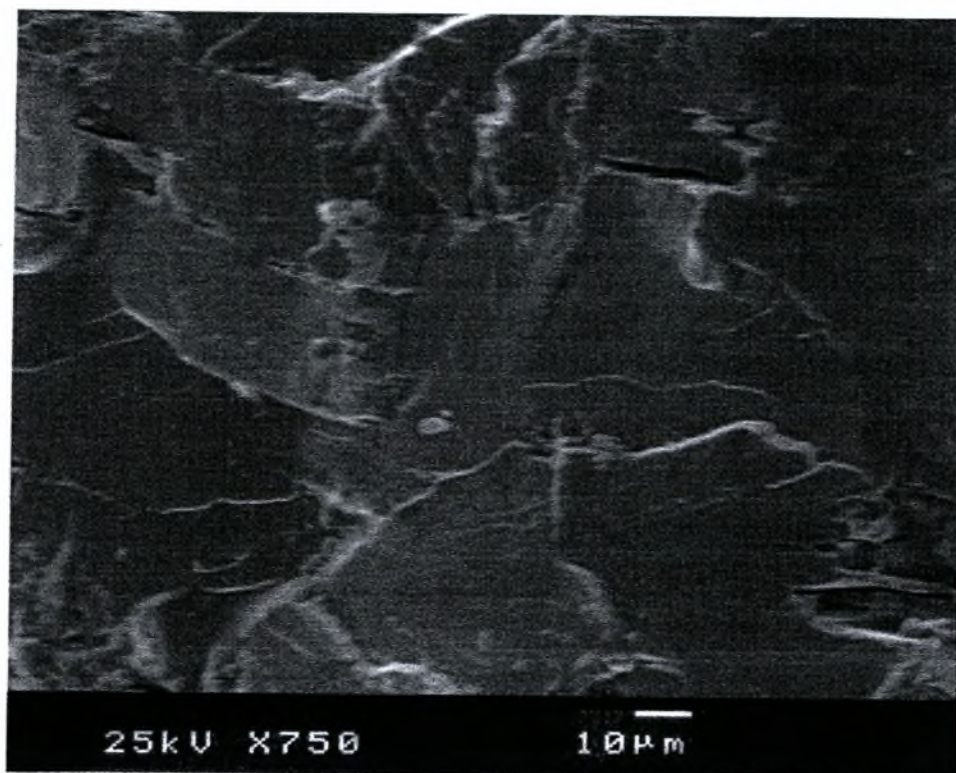


4: Δοκίμιο 3DIM5 Ψαθυρή μορφολογία επιφάνειας θραύσης

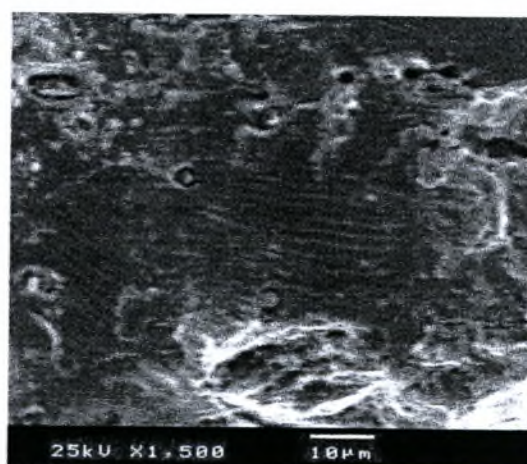
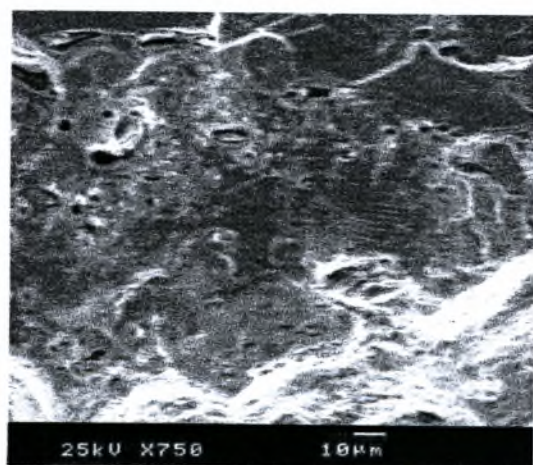


5: Δοκίμιο 3DIM5 Αλληλεπίδραση striations κόπωσης-εγκλεισμάτων



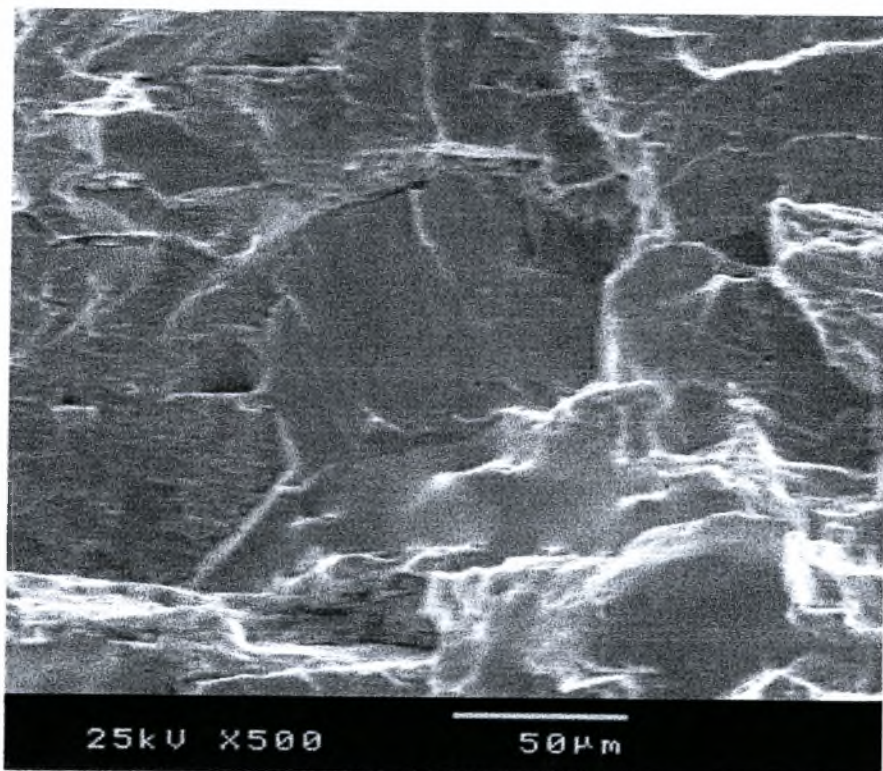


6: Δοκίμιο 3DIM5 Περιοχή γρήγορης διάσχισης (cleavage)

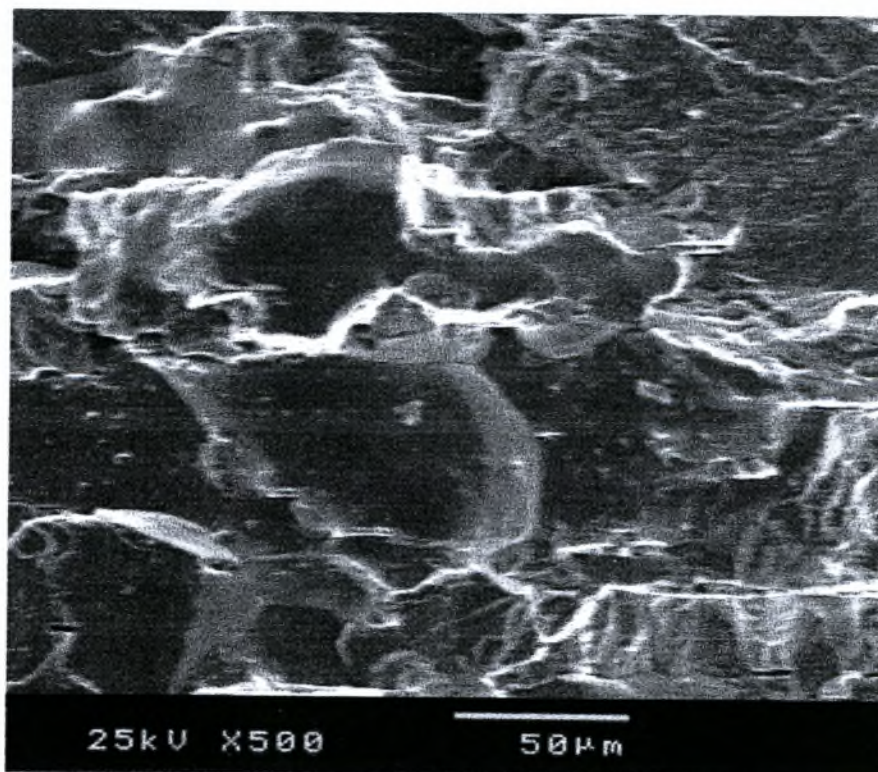


7: Δοκίμιο 3DIM6 Striations κόπωσης στο κέντρο του δοκιμίου



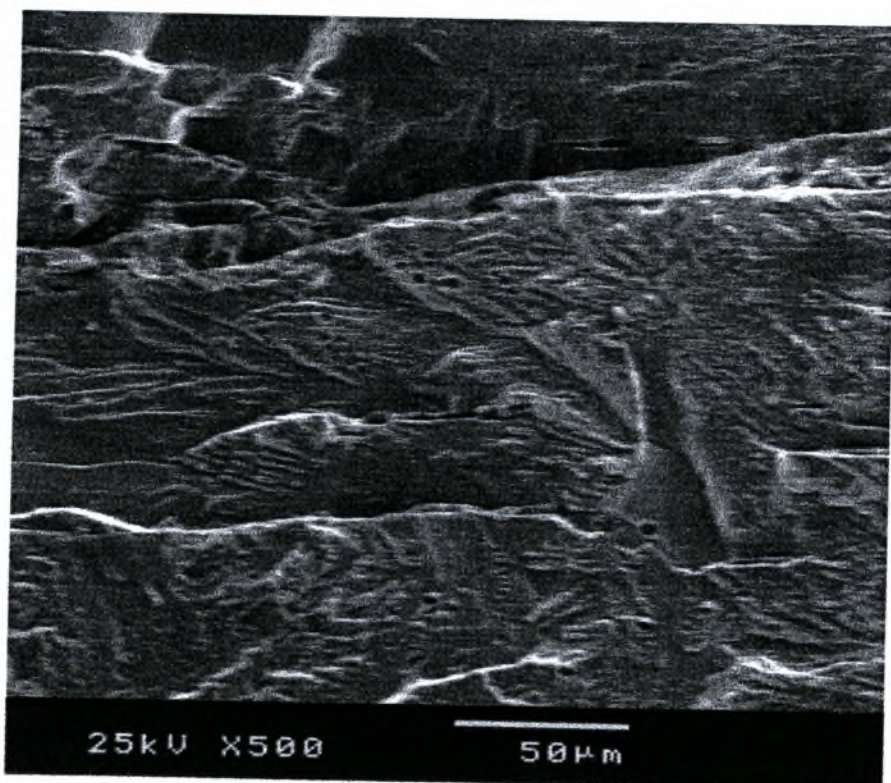


8: Δοκίμιο 3DIM6 Περικρυσταλλική διάβρωση και περιοχή γρήγορης διάσχισης (~1mm) από την επιφάνεια του δοκιμίου.

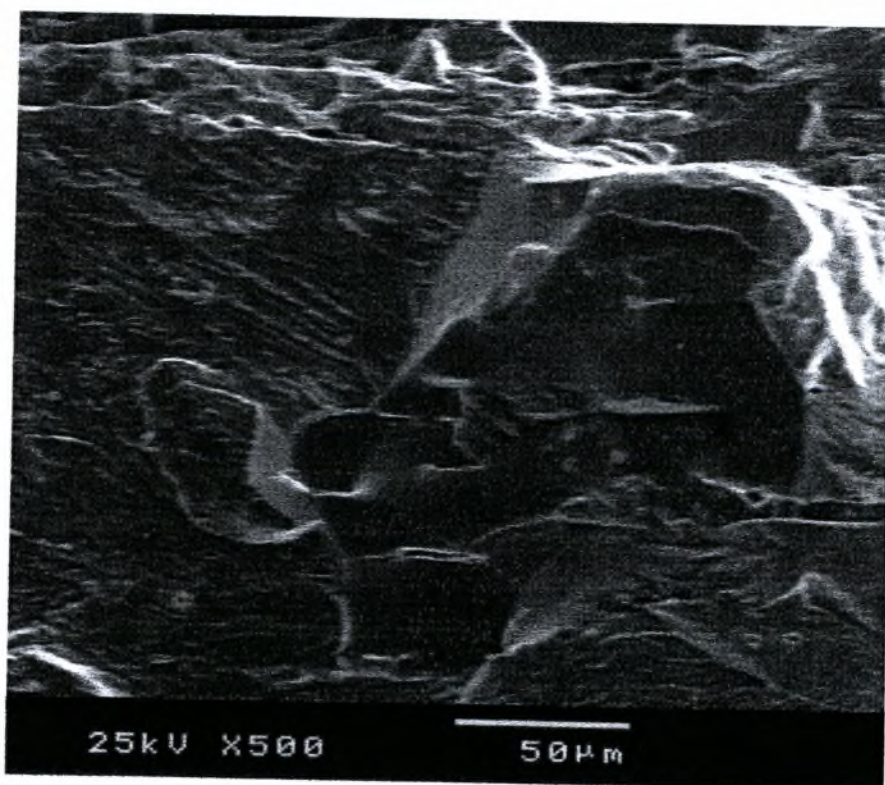


9: Δοκίμιο 3DIM6 Μικτή μορφολογία επιφάνειας θραύσης (περικρυσταλλική + cleavage)



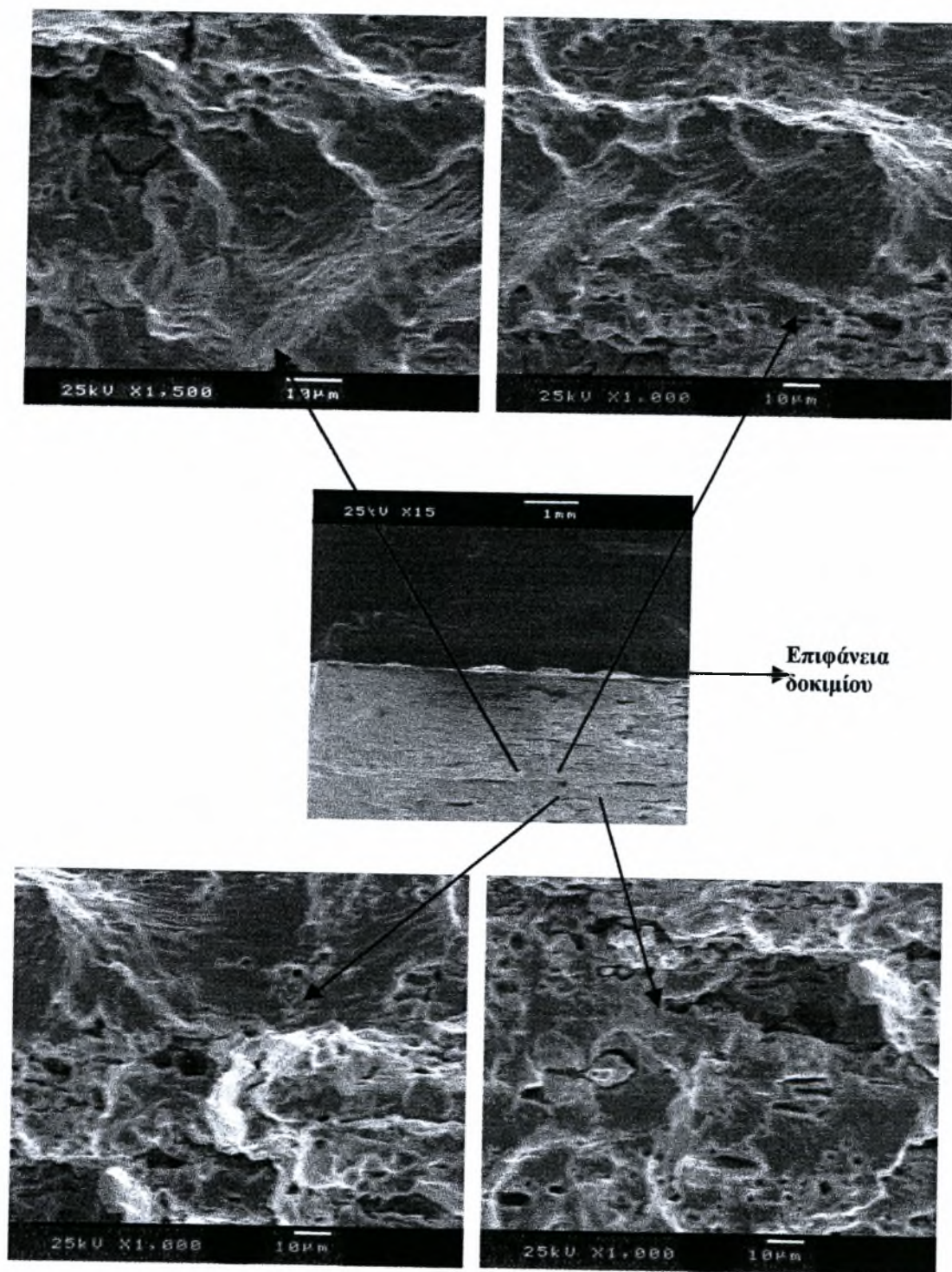


10: Δοκίμιο 3DIM6 Striations κόπωσης



S11: Δοκίμιο 3DIM6 Striations κόπωση –Περικρυσταλλική διάβρωση





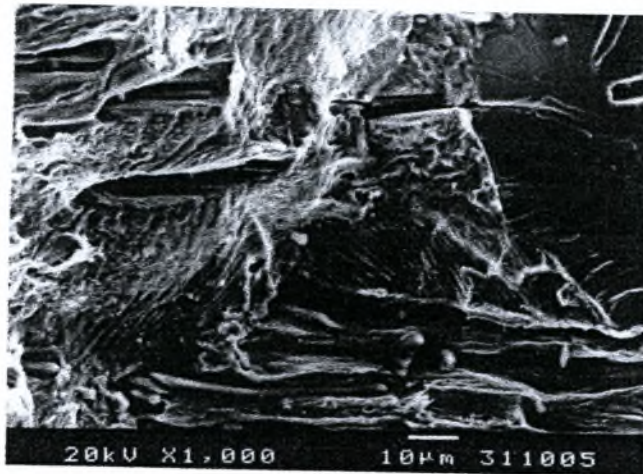
12: Δοκίμιο 3DIM9 Έναρξη και διάδοση προς το εσωτερικό του δοκιμίου του κύριου ρήγματος κόπωσης



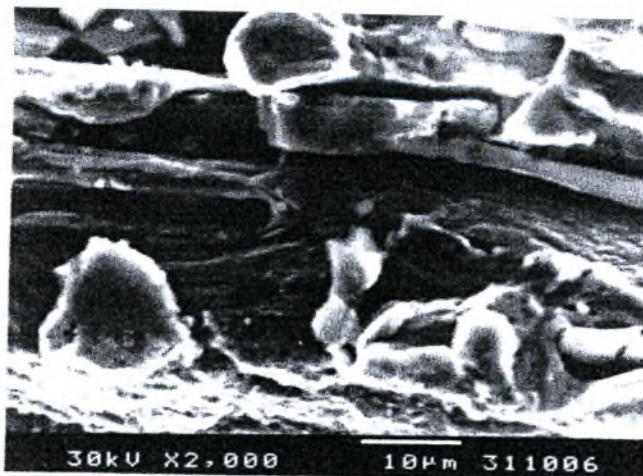
## ΕΥΗΝΟΣ



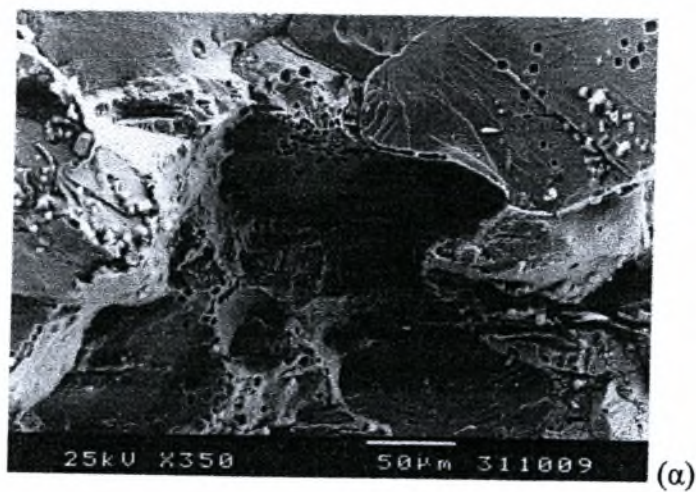
1: Δοκίμιο 311F Επιφάνεια θραύσης



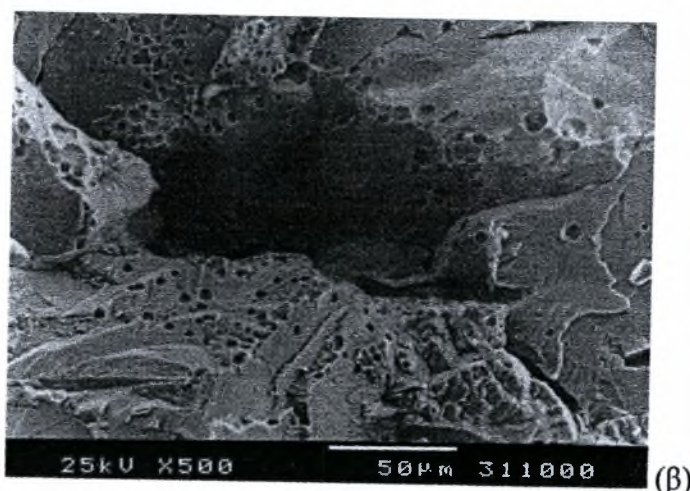
2: Δοκίμιο 311F Επιφάνεια θραύσης



3: Δοκίμιο 311F Επιφάνεια θραύσης  
Αλληλεπίδραση εγκλείσματος με striations κόπωσης

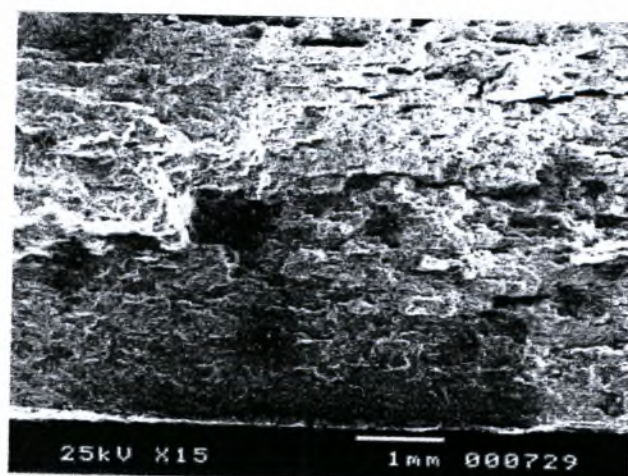


(α)



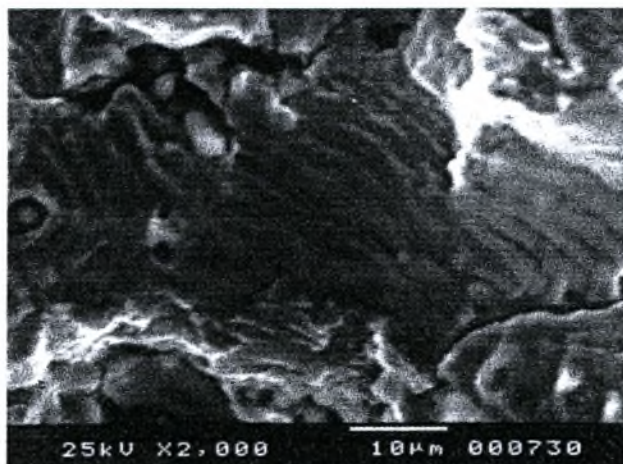
(β)

4(α,β): Δοκίμιο 311F Επιφάνεια θραύσης  
Πορώδες και περικρυσταλλική διάβρωση

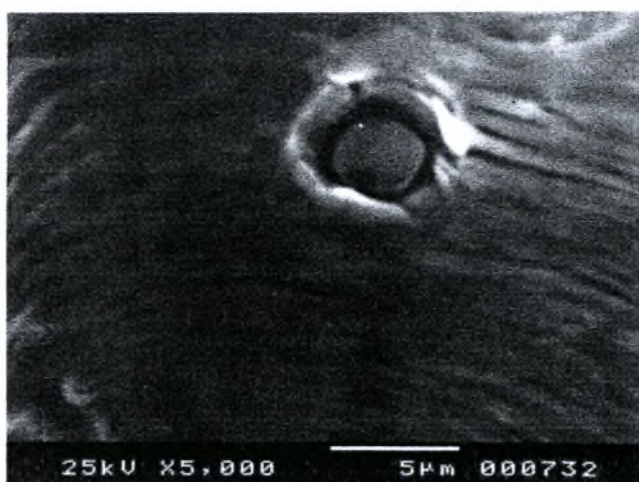


5: Δοκίμιο 301 Επιφάνεια θραύσης  
Οριοθέτηση περιοχής κόπωσης

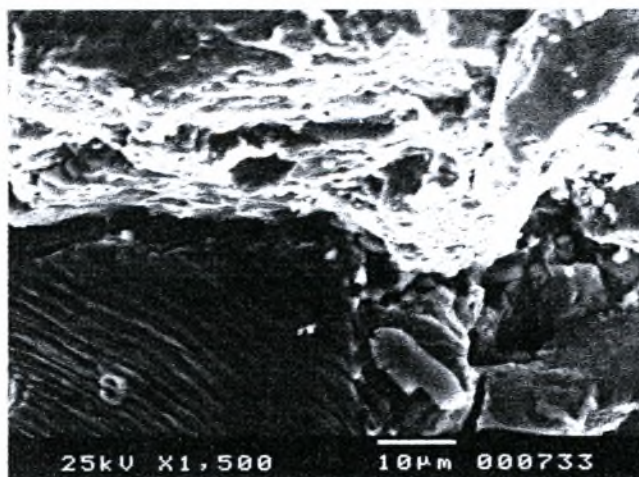




6: Δοκίμιο 301 Επιφάνεια θραύσης  
Striations στην περιοχή κόπωσης

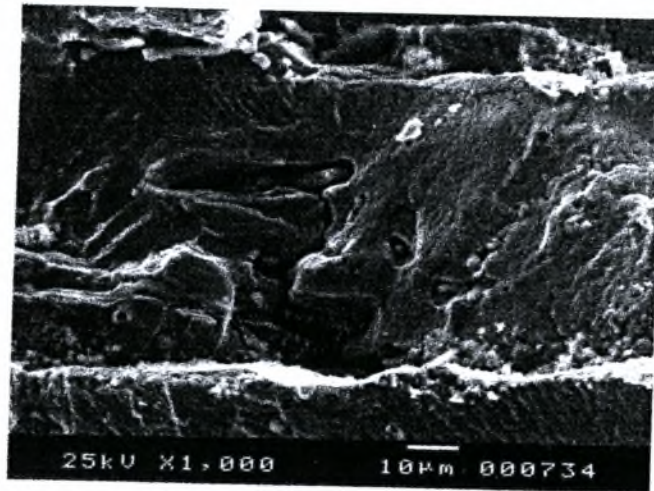


7: Δοκίμιο 301 Επιφάνεια θραύσης  
Αλληλεπίδραση κόπωσης και εγκλείσματος

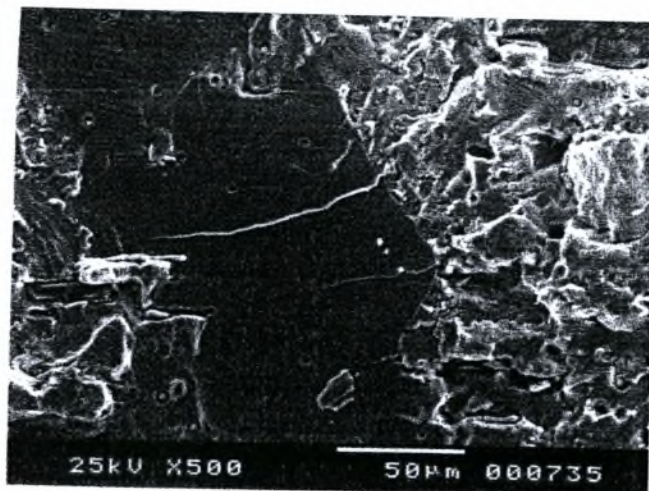


8: Δοκίμιο 301 Επιφάνεια θραύσης Μεταβατική περιοχή όπου η κόπωση προχωράει  
με τοπική θραύση  
(~2mm από την επιφάνεια του δοκιμίου)





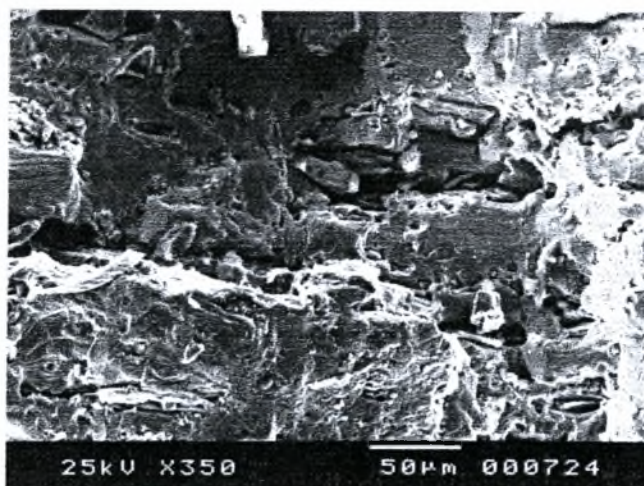
9: Δοκίμιο 301 Επιφάνεια θραύσης  
Αλληλεπίδραση με μεγάλο έγκλεισμα και επιτάχυνση  
της κόπωσης με τοπική θραύση



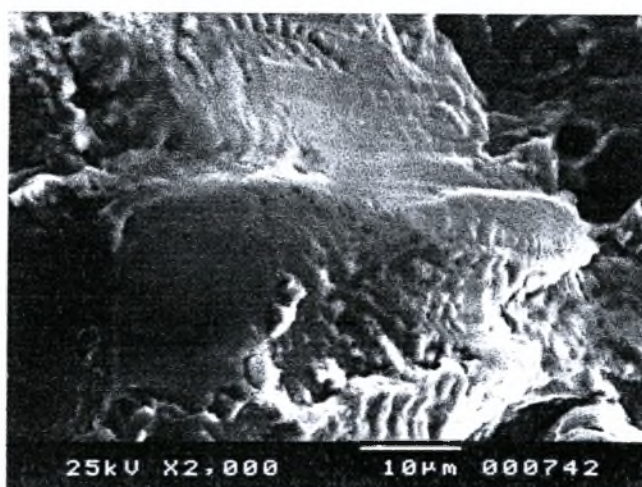
10: Δοκίμιο 301 Επιφάνεια θραύσης  
Περιοχή κόπωσης με διάσχιση



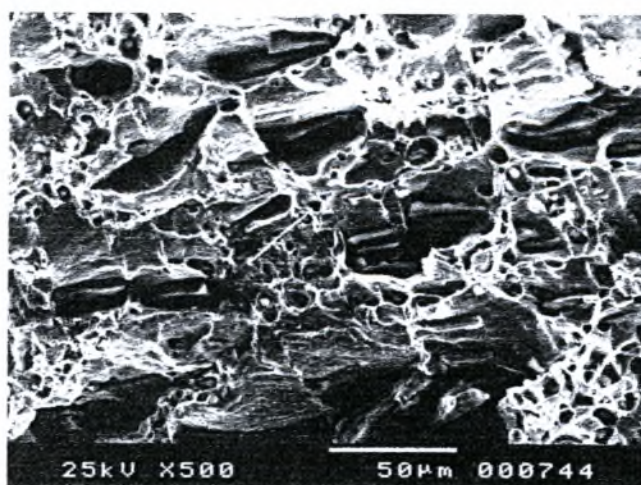
11: Δοκίμιο 301 Επιφάνεια θραύσης  
Περιοχή γρήγορης θραύσης



12: Δοκίμιο 302 Επιφάνεια θραύσης

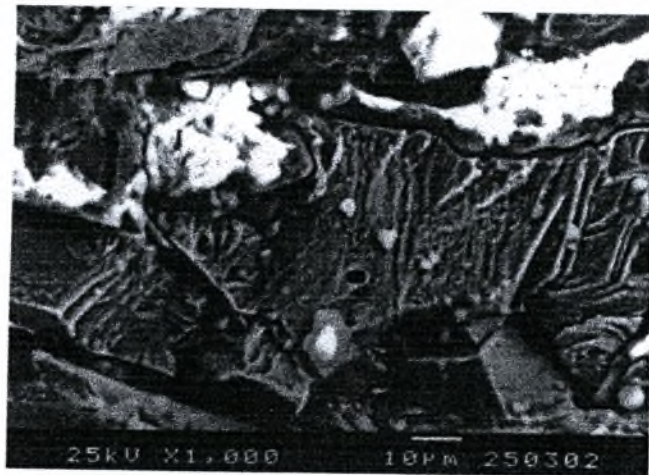


13: Δοκίμιο 303 Επιφάνεια θραύσης  
Striations κόπωσης



14: Δοκίμιο 303 Επιφάνεια θραύσης  
Περιοχή γρήγορης θραύσης

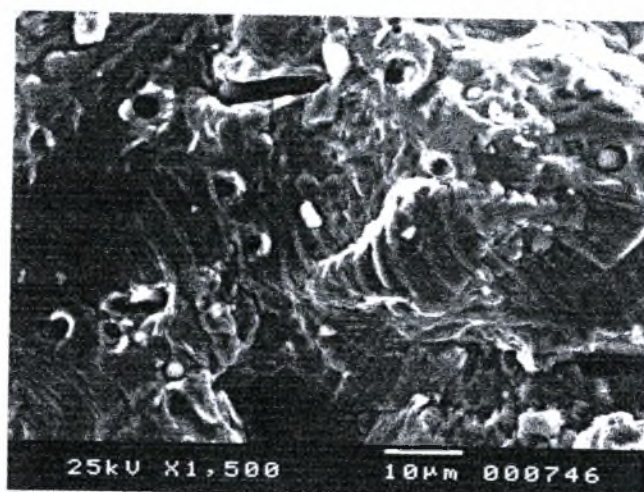




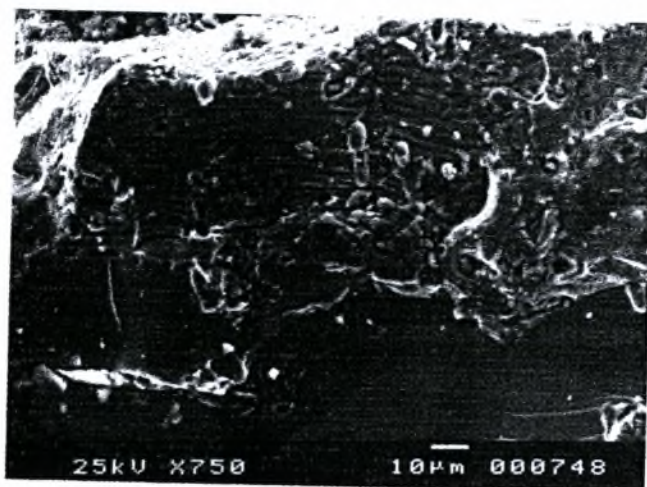
15: Δοκίμιο 3F2 Επιφάνεια θραύσης  
Περικρυσταλλική διάβρωση



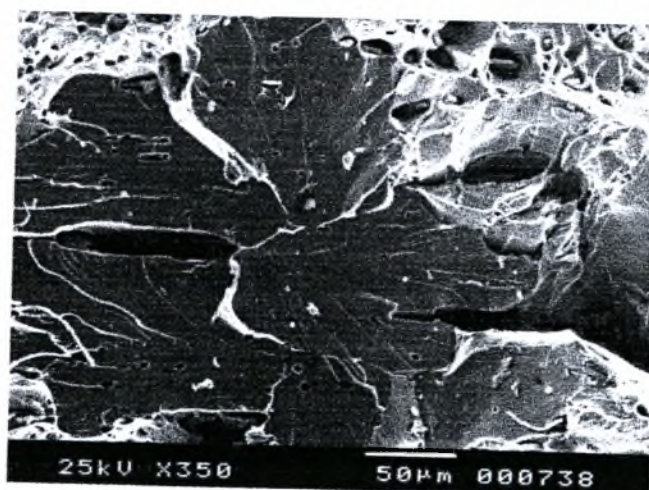
16: Δοκίμιο 3F2 Επιφάνεια θραύσης  
Περικρυσταλλική διάβρωση



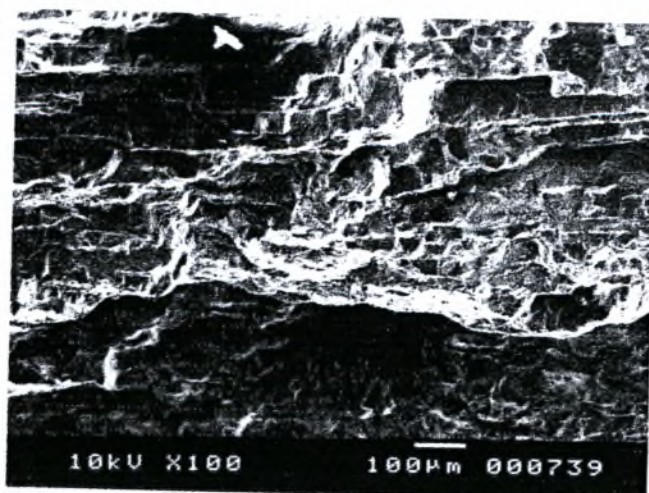
17: Δοκίμιο 304 Επιφάνεια θραύσης  
Striations κόπωσης



18: Δοκιμίου 304 Επιφάνεια θραύσης

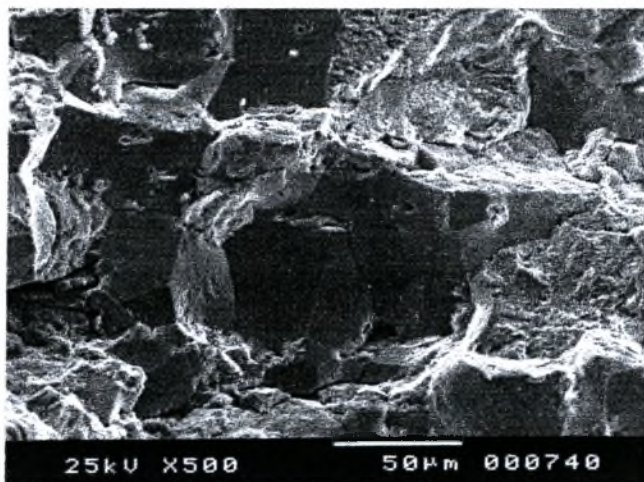


19: Δοκίμιο 305 Επιφάνεια θραύσης  
Περιοχή γρήγορης διάσχισης(cleavage)

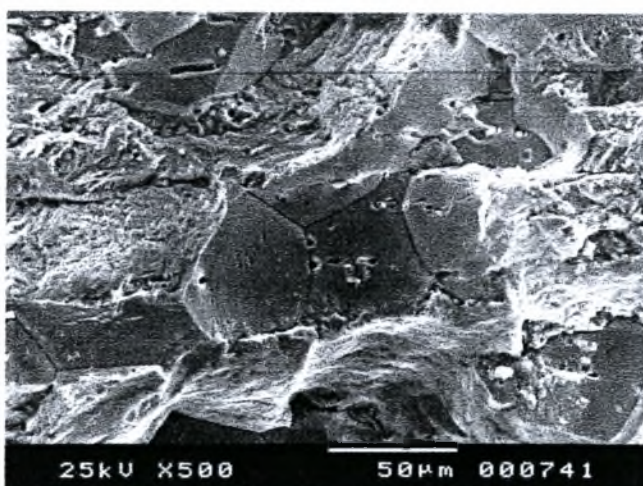


20: Δοκίμιο 305 Επιφάνεια θραύσης





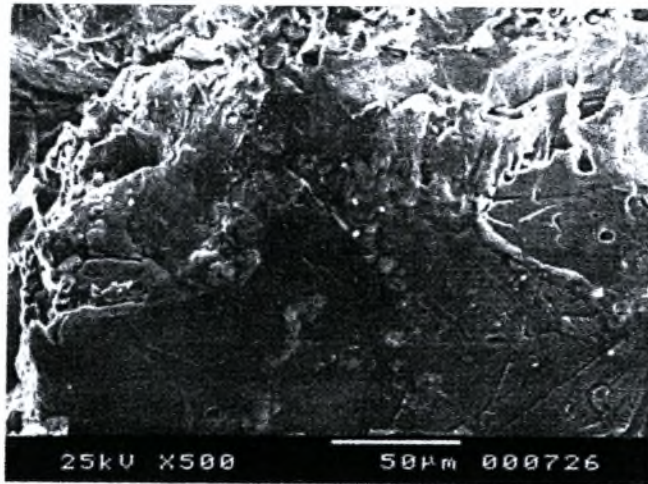
21: Δοκίμιο 305 Επιφάνεια θραύσης  
Περικρυσταλλική θραύση



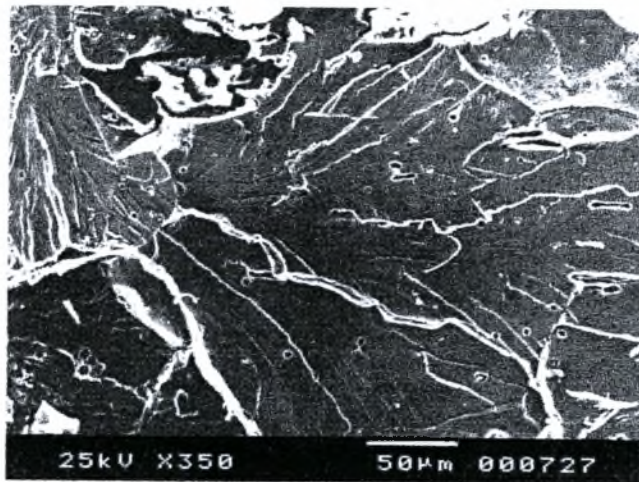
22: Δοκίμιο 305 Επιφάνεια θραύσης  
Περικρυσταλλική θραύση



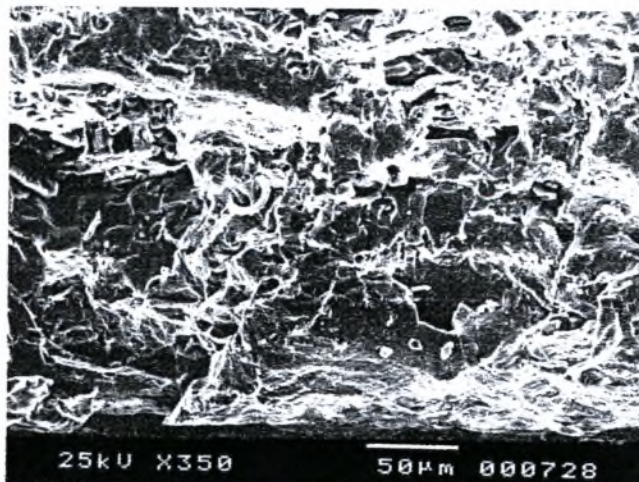
23: Δοκίμιο 306 Επιφάνεια θραύσης  
Striations κόπωσης



24: Δοκίμιο 306 Επιφάνεια θραύσης



25: Δοκίμιο 306 Επιφάνεια θραύσης



26: Δοκίμιο 306 Επιφάνεια θραύσης



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑΣ 3-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια γενική παρουσίαση όσον αφορά τον Ευροκώδικα 3 και αποτίμηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν σύμφωνα με αυτόν καθώς και συμπεράσματα και γενικές παρατηρήσεις.

### 6.1 ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑΣ 3

#### 6.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

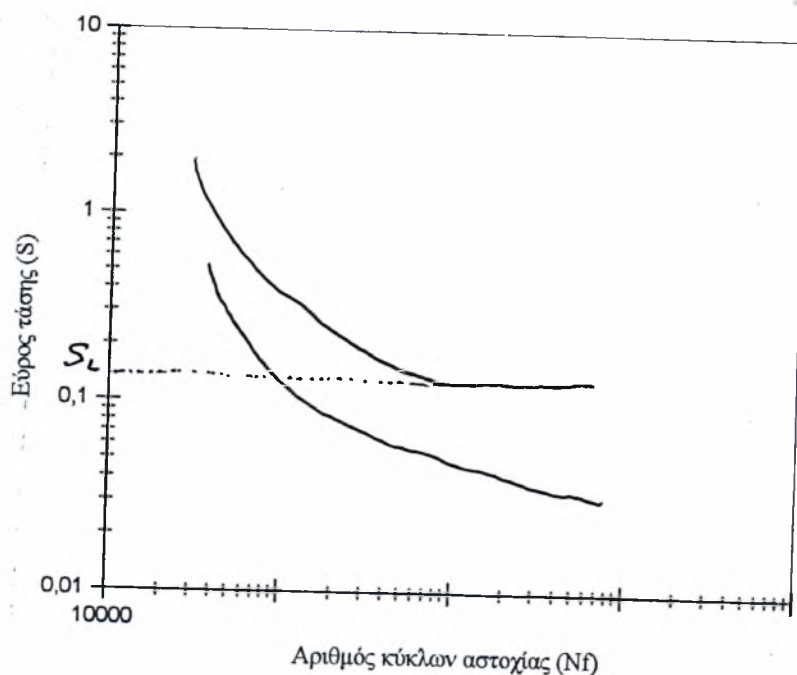
Οι κατασκευαστικοί Ευροκώδικες περιλαμβάνουν ένα σύνολο από κριτήρια για το κατασκευαστικό και το γεωτεχνικό σχεδιασμό των κτηρίων και των έργων της πολιτικής μηχανικής.

#### 6.1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑ 3

Ο Ευροκώδικας 3 εφαρμόζεται στο σχεδιασμό των κτηρίων και των έργων των πολιτικών μηχανικών που πρόκειται να κατασκευαστούν με χάλυβα. Καλύπτει τις απαιτήσεις για αντοχή και χρησιμότητα των κατασκευών αλλά δεν καλύπτει θέματα όπως η θερμική και ηχητική μόνωση όπως και θέματα που αφορούν στη σεισμική κάλυψη.

### 6.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ S-N

Τα αποτελέσματα των τεστ κόπωσης πλοτάρονται σαν μέγιστη τάση ή εύρος τάσης προς τον αριθμό των κύκλων,  $N$ , για τη θραύση χρησιμοποιώντας λογαριθμική κλίμακα για τον αριθμό των κύκλων. Η τάση πλοτάρεται είτε σε γραμμική είτε σε λογαριθμική κλίμακα. Η καμπύλη που προκύπτει από τα σημεία καλείται S-N καμπύλη. Για τους χάλυβες οι καμπύλες S-N τυπικά έχουν κλίση σε χαμηλούς κύκλους η οποία αλλάζει σε μια οριζόντια γραμμή σε υψηλούς κύκλους ενώ η οποία παρουσιάζει το όριο αντοχής το οποίο αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τάση την οποία το μέταλλο μπορεί να αντέξει για έναν άπειρο αριθμό κύκλων με 50% πιθανότητα αστοχίας. Το όριο αντοχής δεν υπάρχει στα μη σιδηρούχα υλικά και αυτό παρουσιάζεται στο γράφημα που ακολουθεί. Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι καμπύλες S-N αντιπροσωπεύουν τη μέση ζωή για μια δοσμένη τάση. Το παραπάνω παρουσιάζεται στο γράφημα που ακολουθεί:



### 6.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ S-N

Οι καμπύλες S-N έχουν προκύψει από μια σειρά τεστ κόπωσης που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια τα οποία αποτελούν κατασκευαστικές λεπτομέρειες για τις οποίες απαιτείται αποτίμηση της αντοχής σε κόπωση. Όταν τα αποτελέσματα των τεστ κόπωσης πλοτάρονται σε λογαριθμική κλίμακα μια αξιοσημείωτη στατιστική διασπορά υπάρχει στα αρχεία της κόπωσης.

Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν υποθέτοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ του  $\log \Delta \sigma$  και του  $\log N$  και προκύπτει η εξίσωση:

$$\log N = \log A - m \log \Delta \sigma \quad (1.1)$$

όπου

$$y = \log N, \quad x = \log \Delta \sigma, \quad a = \log A, \quad b = -m$$

όπου  $\log$  είναι ο λογάριθμος με βάση το 10.

Το πρώτο βήμα της στατιστικής ανάλυσης είναι η εφαρμογή μιας μεθόδου γραμμικής παλινδρόμησης των δεδομένων ώστε να προκύψουν οι σταθερές  $a$  και  $b$  οι οποίες σημειώνονται ως  $\bar{a}$  και  $\bar{b}$  αντίστοιχα. Κάθε ζευγάρι των δεδομένων κόπωσης,  $y_i = \log N_i$  και  $x_i = \log \Delta \sigma_i$  θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$y_i = \bar{a} + \bar{b} * x_i + e_i$$

όπου  $e_i$  καλείται το υπόλοιπο.

Οι σταθερές  $\bar{a}$  και  $\bar{b}$  προκύπτουν έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων είναι το ελάχιστο. Αυτή η συνθήκη οδηγεί στις ακόλουθες σταθερές.

$$\bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) * \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$\text{και } \bar{a} = \bar{y} - \bar{b} * \bar{x}$$

όπου  $\bar{y}$  και  $\bar{x}$  είναι αντίστοιχα οι μέσες τιμές των  $y_i$  και  $x_i$  π.χ.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad \text{όπου } n \text{ είναι το μέγεθος του δείγματος.}$$

Το δεύτερο βήμα είναι η εύρεση του τετραγώνου της τυπικής απόκλισης της κατανομής  $\varphi(y_i)$  σε ένα δοσμένο  $x_i$ . Το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης γραμμένο σαν  $\text{Var}(y_i)$ , υποτίθεται ότι είναι σταθερό για όλες τις τιμές  $x_i = \log \Delta \sigma_i$ . Η υπόθεση ότι το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης είναι σταθερό είναι μερικές φορές



αμφισβητήσιμο αλλά επιβεβαιώνεται από το μεγαλύτερο μέρος των αποτελεσμάτων των τεστ κόπωσης. Συνήθως υποτίθεται ότι για μια δεδομένη τιμή του  $x_i$  η αντίστοιχη τιμή του  $y_i$  μορφοποιεί μια κανονική κατανομή.

Ένας από τους κύριους δείκτες σύγκρισης ο οποίος χρησιμοποιείται σε σχέση με το σύστημα ταξινόμησης που υιοθετείται στον Ευροκώδικα 3 είναι η χαρακτηριστική αντοχή στα δύο εκατομμύρια κύκλους που γράφεται  $x_c = \log \Delta \sigma_c$ . Η τυχαία μεταβλητή που αντιστοιχεί στη δεδομένη τιμή  $x_c$  είναι  $y_c = \log N_c$ . Η κατανομή της δειγματοληψίας του  $y_c$  μπορεί να ληφθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{y}_c = \bar{a} + \bar{b} * x_c \quad (1.6)$$

και

$$Var(y_c / x_c) = \sigma_{y_c x_c}^2 = s_y^2 \left( 1 + \frac{1}{n} + \frac{x_c - \bar{x}}{s_{xx}} \right)$$

όπου  $Var(y_c/x_c)$  είναι το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης του  $y_c$  που δίνεται για  $x$  ίσο με  $x_c$ .

$$s_y^2 = \frac{(s_{yy} - b * s_{xy})}{n - 2}$$

όπου

$$s_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \quad \text{και} \quad s_{xx} = \sum x_i y_i - \frac{\sum x_i * \sum y_i}{n}$$

Ένα 95% διάστημα εμπιστοσύνης που υπολογίζεται για  $y_c$  δίνεται από:

$$y_{ck} = y_c - t_{95} * \sigma_{y_c / x_c}$$

Όπου  $t_{95}$  είναι το 95% ποσοστό της κατανομής Student με  $n-2$  βαθμούς ελευθερίας. Συνεπώς υπάρχει εμπιστοσύνη ότι το 95% του  $y_c$  του πληθυσμού Student θα έχουν τιμές πάνω από το  $y_{ck}$ .

Πολύ συχνά στην ανάλυση των τεστ κόπωσης το δείγμα είναι μικρό ( $n \leq 30$ ) και η τιμή της αποτίμησης του τετραγώνου της τυπικής απόκλισης όπως καθορίζεται από την εξίσωση (1.7) κυμαίνεται αξιοσημείωτα από δείγμα σε δείγμα.

Για να ληφθεί υπόψη αυτό το γεγονός η κατανομή  $\phi(y_i)$  για μέγεθος δείγματος  $n \leq 30$  υποτίθεται ότι ακολουθεί κατανομή Student.

Ξέροντας το  $y_{ck}$  από την εξίσωση (1.10) η χαρακτηριστική αντοχή στα δύο εκατομμύρια κύκλους μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (1.1). Τελικά η

<μονόπλευρη> αποτίμηση εμπιστοσύνης εκπληρώνεται για ένα συγκεκριμένο σημείο το οποίο αναφέρεται σαν χαρακτηριστική αντοχή στα δύο εκατομμύρια κύκλους.

Η χαρακτηριστική S-N καμπύλη δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\log N_k = (\log A - t_{95} * \sigma_{y, x_c}) - m * \log \Delta \sigma_k$$

και η χαρακτηριστική αντοχή στα δύο εκατομμύρια κύκλους μπορεί να υπολογιστεί από:

$$\log \Delta \sigma_{kc} = [(\log A - t_{95} * \sigma_{y, x_c}) - \log(2 * 10^6)] / m$$

Επομένως

$$\Delta \sigma_{kc} = 10^{\log \Delta \sigma_{kc}}$$

## 6.4 ΕΥΗΝΟΣ

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικής καμπύλων αντοχής σε κόπωση γίνεται ως εξής:

Δσ (N/mm <sup>2</sup> )	Αριθμός Κύκλων N	Κατάσταση δοκιμίου
350	325600	Αστόχησε
320	65529	Αστόχησε
320	5106288	Αστόχησε
350	228927	Αστόχησε
320	1411839	Αστόχησε
350	721971	Αστόχησε
320	2227486	Αστόχησε
280	101000	Αστόχησε
280	8000000	Αστόχησε

Εφαρμόζουμε τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης:

Ο υπολογισμός των a και b μπορεί να γίνει ακολουθώντας τον παρακάτω αριθμητικό πίνακα ο οποίος περιλαμβάνει μόνο τα αποτελέσματα του τεστ κόπωσης.



No	$\Delta\sigma_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	$x_i = \log\Delta\sigma_i$	Αριθμός Κύκλων N	$y_i = \log N_i$	$x_i^2$	$y_i^2$	$x_i \cdot y_i$
1	350	2,544068	325600	5,512684	6,472282	30,38969	14,02464421
2	320	2,50515	65529	4,816434	6,275776	23,19803	12,06588838
3	320	2,50515	5106288	6,708105	6,275776	44,99868	16,80480986
4	350	2,544068	228927	5,359697	6,472282	28,72635	13,63543391
5	320	2,50515	1411839	6,149785	6,275776	37,81986	15,4061342
6	350	2,544068	721971	5,85852	6,472282	34,32225	14,90447289
7	320	2,50515	2227486	6,347815	6,275776	40,29476	15,90222857
8	280	2,447158	101000	5,004321	5,988582	25,04323	12,24636524
9	280	2,447158	8000000	6,90309	5,988582	47,65265	16,8929521
	Σ	22,54712		52,66045	56,49712	312,4455	131,8829294

$$b = -3,894, \quad a = 15,607$$

και επομένως η εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης δίνεται από:

$$\log N = 15,607 - 3,894 \log \Delta \sigma$$

για  $N_c = 2000000$  κύκλους έχουμε:

$$\log \Delta \sigma_c = 2,389823 \quad \text{και} \quad \Delta \sigma_c = 245,3708 \text{ N/mm}^2$$

Για να βρούμε το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης του  $y = \log N$  χρησιμοποιούμε τον παραπάνω πίνακα.

$$S_{xx} = 0,01127$$

$$S_{yy} = 4,3207054$$

$$S_{xy} = -0,04391$$

$$S_y = 0,641668$$

και το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης είναι:

$$\sigma_{yc}/x_c^2 = 1,471364$$

$$\text{και} \quad \sigma_{yc}/x_c = 1,212998$$

Την τιμή  $t_{95}$  της κατανομής Student με 7 βαθμούς ελευθερίας την παίρνουμε έτοιμη από τους πίνακες της κατανομής:

$$t_{95} = 1,895$$

Η χαρακτηριστική αντοχή στα δύο εκατομμύρια κύκλους είναι :

$$\log \Delta \sigma_{kc} = 1,673789$$

Επομένως :

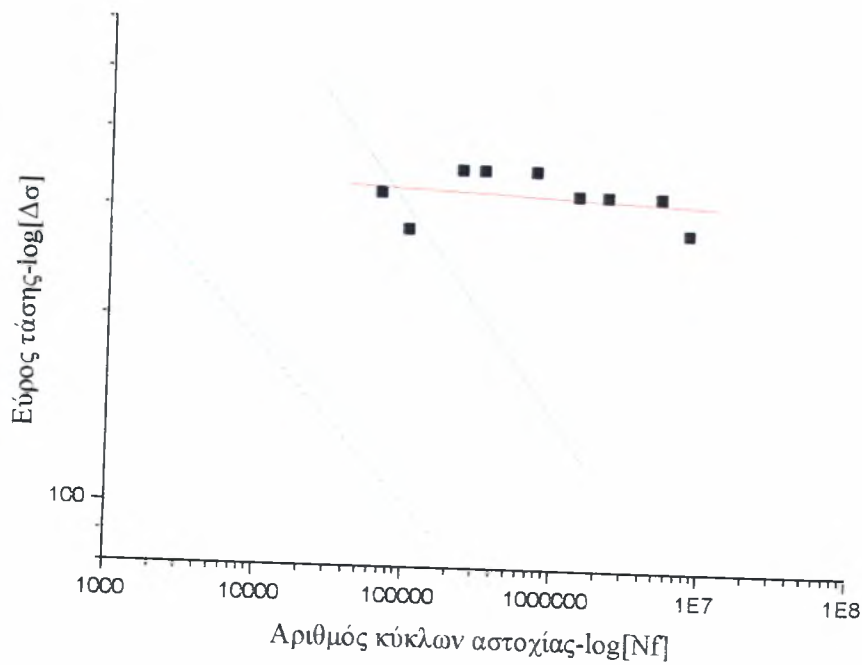
$$\Delta\sigma_{kc} = 47,18341797$$

Άρα η εξίσωση που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι:

$$\log N_{kc} = 12,819 - 3894 \log \Delta\sigma_{kc}$$

Για την κατασκευαστική λεπτομέρεια που αναφέρεται σε ηλωτή γέφυρα η χαρακτηριστική εξίσωση καμπύλης S-N είναι σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 3:

$$\log N = 12,451 - 3 \log \Delta\sigma$$



Γράφημα 6.1: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του Ευροκώδικα για τη γέφυρα του Εύηνου



## 6.5 ΔΙΜΗΚΟΣ

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικής καμπύλων αντοχής σε κόπωση γίνεται ως εξής:

$\Delta\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	Αριθμός Κύκλων N	Κατάσταση δοκιμίου
365,1	27510	Αστόχησε
332	61189	Αστόχησε
313,2	347699	Αστόχησε
287,1	3019314	Αστόχησε
332	102348	Αστόχησε
287,1	3449913	Αστόχησε
313,2	1602873	Αστόχησε
365,1	118800	Αστόχησε
332	700140	Αστόχησε
313,2	1932177	Αστόχησε
287,1	1465250	Αστόχησε

Εφαρμόζουμε τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης:

Ο υπολογισμός των a και b μπορεί να γίνει ακολουθώντας τον παρακάτω αριθμητικό πίνακα ο οποίος περιλαμβάνει μόνο τα αποτελέσματα του τεστ κόπωσης.

No	$\Delta\sigma_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	$x_i = \log \Delta\sigma_i$	Αριθμός Κύκλων N	$y_i = \log N_i$	$x_i^2$	$y_i^2$	$x_i \cdot y_i$
1	365,1	2,5624118	27510	4,439491	6,565954	19,70908	11,37580322
2	332	2,5211381	61189	4,786673	6,356137	22,91224	12,06786449
3	313,2	2,4958218	347699	5,541203	6,229126	30,70494	13,82985609
4	287,1	2,4580332	3019314	6,479908	6,041927	41,98921	15,92782964
5	332	2,5211381	102348	5,010079	6,356137	25,1009	12,63110188
6	287,1	2,4580332	3449913	6,537808	6,041927	42,74294	16,07014942
7	313,2	2,4958218	1602873	6,204899	6,229126	38,50077	15,48632218
8	365,1	2,5624118	118800	5,074816	6,565954	25,75376	13,0037697
9	332	2,5211381	700140	5,845185	6,356137	34,16619	14,73651823
10	313,2	2,4958218	1932177	6,286047	6,229126	39,51439	15,68885262
11	287,1	2,4580332	1465250	6,165912	6,041927	38,01847	15,15601569
	$\Sigma$	27,549803		62,37202	69,01348	359,1129	155,9740832

$$b = -16,719, \quad a = 47,543$$

και επομένως η εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης δίνεται από:

$$\log N = 47,543 - 16,719 \log \Delta\sigma$$

για  $N_c = 2000000$  κύκλους έχουμε:

$$\log \Delta \sigma_c = 2,466773 \text{ και } \Delta \sigma_c = 292,9358566 \text{ N/mm}^2$$

Για να βρούμε το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης του  $y = \log N$  χρησιμοποιούμε τον παραπάνω πίνακα.

$$S_{xx} = 0,014241$$

$$S_{yy} = 5,4520377$$

$$S_{xy} = -0,23836$$

$$S_y = 0,162983$$

και το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης είναι:

$$\sigma_{yc}/x_c^2 = 0,194112$$

$$\text{και } \sigma_{yc}/x_c = 0,440582$$

Την τιμή  $t_{95}$  της κατανομής Student με 9 βαθμούς ελευθερίας την παίρνουμε έτοιμη από τους πίνακες της κατανομής:

$$t_{95} = 1,833$$

Η χαρακτηριστική αντοχή στα δύο εκατομμύρια κύκλους είναι :

$$\log \Delta \sigma_{kc} = 2,445491$$

Επομένως :

$$\Delta \sigma_{kc} = 278,9272$$

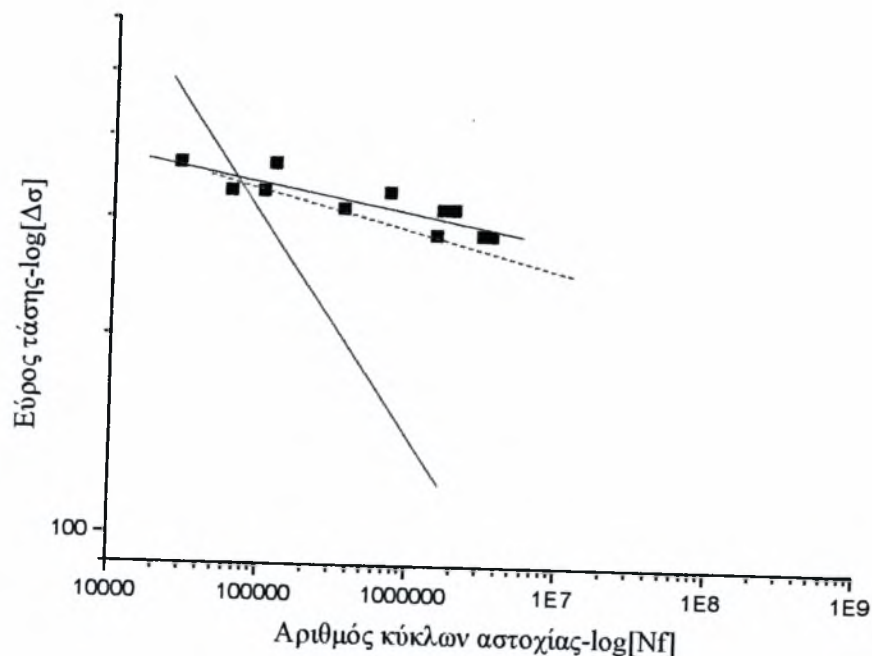
Άρα η εξίσωση που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση είναι:

$$\log N_{kc} = 47,187 - 16,719 \log \Delta \sigma_{kc}$$

Για την κατασκευαστική λεπτομέρεια που αναφέρεται σε ηλωτή γέφυρα η χαρακτηριστική εξίσωση καμπύλης S-N είναι σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 3:

$$\log N = 12,451 - 3 \log \Delta \sigma$$

Γράφημα 6.2: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του Ευροκώδικα για τη γέφυρα του Δίμηκου



Παρατηρήσεις: α) Στα παραπάνω σχήματα η ευθεία με το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί στην κατηγορία ταξινόμησης  $\Delta\sigma_c=112\text{MPa}$ .

β) Η ευθεία με το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στην χαρακτηριστική ευθεία που προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα.

γ) Η μπλε ευθεία αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από στατιστική ανάλυση για ένα διάστημα εμπιστοσύνης 75% του 95% της πιθανότητας επιβίωσης του  $\log N$ , αφού έχει ληφθεί υπόψη η τυπική απόκλιση και το μέγεθος του δείγματος.

## 6.6 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑ 3

Παρατηρούμε ότι το δείγμα που αφορά τη γέφυρα του Εύηνου δύο από τα δοκίμια δεν ικανοποιούν το κριτήριο του Ευροκώδικα και το ίδιο συμβαίνει και για τα δείγματα από τη γέφυρα του Δίμηκου. Τα δοκίμια κόπωσης χαρακτηρίζονται από κακή επιφανειακή κατάσταση και παρουσιάζουν επιφανειακές εγχοπές διάβρωσης, μικρές ρωγμές και αποκολλήσεις. Το μεγαλύτερο ποσοστό της διάρκειας της ζωής ενός δοκιμίου που υφίσταται πολυκυκλική κόπωση αναλώνεται στο σχηματισμό της ρωγμής. Σύμφωνα όμως με τη βιβλιογραφία όταν το υλικό περιέχει πολλά εγκλείσματα όπως ο χάλυβας που εξετάζουμε το στάδιο που αφορά στο σχηματισμό της ρωγμής ελαχιστοποιείται σχεδόν μηδενίζεται και σε συνδυασμό με την κακή επιφανειακή κατάσταση (οξειδώσεις, μικρορωγμές και αποκολλήσεις εγκλεισμάτων) του υλικού που έχει την πλέον ισχυρή επίδραση στο σχηματισμό της ρωγμής έχει σαν αποτέλεσμα η έναρξη της ρωγμής κόπωσης να γίνεται πολύ συντομότερα και αυτό αποδεικνύεται από τα δοκίμια με πολύ μικρή διάρκεια ζωής. Θα πρέπει όμως να



σημειωθεί ότι η συμπεριφορά σε κόπωση του υλικού όπως αποτυπώνεται στις καμπύλες είναι ισχυρή συνάρτηση της δειγματοληψίας.

## 6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

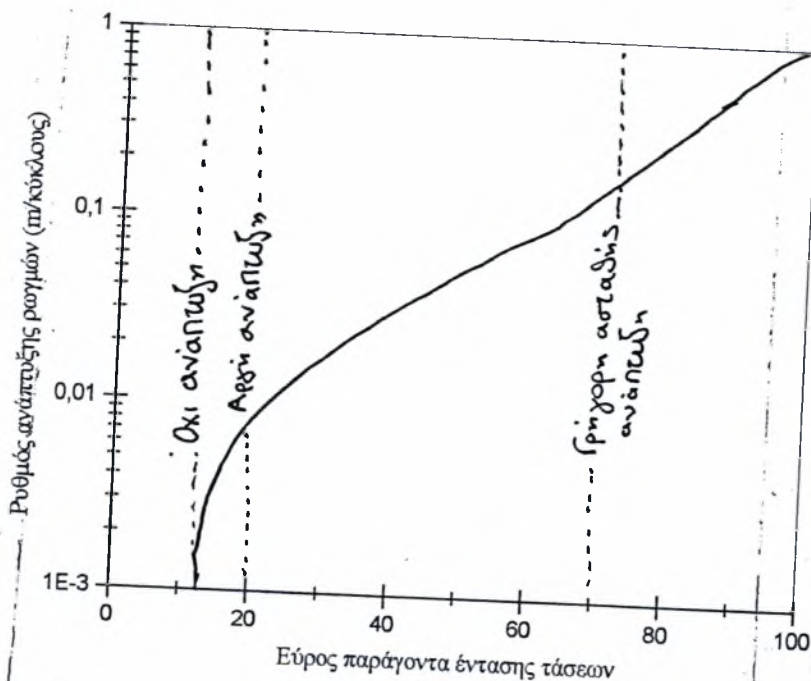
Οι εργαστηριακοί έλεγχοι έδειξαν ότι πρόκειται για χάλυβα με ανομοιομορφία στη χημική σύσταση όπως υψηλή περιεκτικότητα Si, P, και S όπως και χαμηλό λόγο Mn/S, δομή με έντονη διαστρωμάτωση και μεγάλο ποσοστό διαμήκων ψαθυρών εγκλεισμάτων. Ο χάλυβας έχει φερριτική μικροδομή. Για τη γέφυρα του Δίμηκου ο χάλυβας παρουσιάζει όριο διαρροής της τάξης των 246-275 MPa κυρίως όμως παρουσιάζει χαμηλές τιμές ολκιμότητας. Όσον αφορά τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου χάλυβα σε κόπωση προκύπτει ότι το όριο διαρκούς αντοχής είναι 143 MPa. Για τη γέφυρα του Εύηνου ο χάλυβας παρουσιάζει όριο διαρροής της τάξης των 246-257 MPa και χαμηλές τιμές ολκιμότητας. Το όριο διαρκούς αντοχής είναι 138 MPa.

## 6.8 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Η ανάπτυξη των ρηγμάτων ξεκινά από την επιφάνεια και δεδομένου ότι η επιφανειακή κατάσταση του χάλυβα που εξετάζεται είναι εξαιρετικά κακή ευνοεί την ανάπτυξη των ρηγμάτων. Οι γέφυρες είναι σιδηροδρομικές και επομένως κατά τη διάρκεια της φόρτισης τους υφίστανται φθορά στην επιφάνεια τους. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η φθορά της επιφάνειας αποτρέπει την ανάπτυξη των ρηγμάτων που δημιουργούνται.
- Τα μεγάλα διαμήκη εγκλείσματα που υπάρχουν στο εσωτερικό του υλικού συμβάλλουν στην ανάπτυξη ρηγμάτων των οποίων ο ρυθμός με τον οποίο αναπτύσσονται εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το περιβάλλον, η συχνότητα φόρτισης, η θερμοκρασία και η αναλογία τάσεων. Η σχέση που δίνει αυτό το ρυθμό είναι η εξής:

$$da/dN = A \Delta K^m$$

όπου  $da/dN$  είναι ο ρυθμός ανάπτυξης των ρηγμάτων κόπωσης ανά κύκλο  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$  είναι το εύρος του παράγοντα έντασης τάσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου και  $A, m$  είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό και διάφορους άλλους παράγοντες. Σημειώνεται ότι για χαμηλές τιμές του εύρους παράγοντα έντασης τάσεων δεν έχουμε ανάπτυξη των ρωγμών.



- Το γεγονός ότι πρόκειται για γέφυρες με ηλώσεις και όχι με συγκολλήσεις είναι πολύ σημαντικό γιατί όταν υπάρχουν συγκολλήσεις οι παραμένουσες τάσεις βοηθούν στην ανάπτυξη των ρηγμάτων ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση η παρουσία ηλώσεων ίσως να επιδρά και ανασταλτικά για την ανάπτυξη των ρηγμάτων
- Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντικό ρόλο στη μελέτη κόπωσης παίζει και το μέγεθος του δοκιμίου όπου αλλαγές στο μέγεθος μπορεί να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα καθώς και η μέση τάση.

## 6.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Από τη χημική ανάλυση προκύπτει ότι δεν μπορεί να γίνει αντιστοίχιση του χάλυβα που εξετάστηκε με χάλυβα σύγχρονων προδιαγραφών
2. Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση των καμπυλών S-N όπως ορίζει ο Ευροκώδικας 3 τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις δύο γέφυρες όσον αφορά τη μελέτη κόπωσης ικανοποιούν το κριτήριο του Ευροκώδικα
3. Το όριο διαρκούς αντοχής είναι 143 MPa για τη γέφυρα του Δίμηκου και 138 MPa για τη γέφυρα του Εύηνου
4. Φερριτική με έντονη διαστρωμάτωση ( banding ) και υψηλό ποσοστό διαμήκων εγκλεισμάτων παράλληλων με την διεύθυνση έλασης
5. Τα δοκίμια κόπωσης χαρακτηρίζονται από κακή επιφανειακή κατάσταση και παρουσιάζουν επιφανειακές εγχοπές διάβρωσης, μικρές ρωγμές και αποκολλήσεις
6. Το υλικό έχει χαμηλή ολκιμότητα

## **Βιβλιογραφία**

**[1] David Roylance “MECHANICS OF MATERIALS”**

**[2] Richard W. Hertzberg “ DEFORMATION AND FRACTURE MECHANICS OF ENGINEERING MATERIALS”**

**[3] Eurocode 3 “DESIGN OF STEEL STRUCTURES”**

**[4] Σημειώσεις του μαθήματος: ‘ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ’**





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074015

