

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

υπό

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΧΑΝΔΡΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2010

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

υπό

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΧΑΝΔΡΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2010



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 8923/1
Ημερ. Εισ.: 11-10-2010
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2010
ΧΑΝ

© 2010 Αναστάσιος Χάνδρος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Άννα Ζερβάκη
Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κα Άννα Ζερβάκη και κ. Νικόλαο Χασιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες στην κα Άννα Ζερβάκη για την πολύτιμη βοήθεια της και τη διαρκή καθοδήγηση της. Ευχαριστώ τους φίλους(ες) μου Στέφανο, Δημήτρη, Σωτήρη, Θοδωρή, Γιάννη, Ρόζα για την ηθική υποστήριξή τους. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους φίλους μου Μάκη και Ανδρέα, τόσο για την ηθική τους υποστήριξη όσο και για τη βοήθεια τους εντός και εκτός εργαστηρίου. Επίσης, ευχαριστώ την Μαρίνα Πολυχρονίδου για την κατανόηση, την υπομονή και την υποστήριξή της όλα αυτά τα χρόνια που στάθηκε δίπλα μου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Αντώνη και Ντίνα και στον αδερφό μου Δημήτρη, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους από την αρχή μέχρι το τέλος της προσπάθειάς μου. Αφιερώνω αυτή την εργασία στη μνήμη του παππού μου Μήτσου, που πρόσφατα έφυγε από τη ζωή.

Τάσος Χάνδρος

ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΧΑΝΔΡΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Φυσικής
Μεταλλουργίας

Περίληψη

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι οι αστοχίες (failures) των μηχανολογικών στοιχείων και κατασκευών.

Αρχικά, αναφέρονται οι μηχανισμοί και τα αίτια των αστοχιών και αναλύονται οι διαδικασίες της ανάλυσης των αστοχιών.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τρία (3) Case Studies από την Ελληνική Βιομηχανία: Αστοχία Αυλών Εναλλάκτη Θερμότητας, Αστοχία Αυλών Φούρνου Reformer, Αστοχία Χάλυβα Μπιγιέτας.

Σε κάθε ένα από αυτά, γίνεται αρχικά μία σύντομη περιγραφή της μονάδας, των συνθηκών λειτουργίας και του υλικού κατασκευής. Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας και γίνεται συζήτηση των αποτελεσμάτων. Τέλος, γίνεται εξαγωγή συμπερασμάτων και δίνονται κάποιες προτάσεις, όπου αυτές υπάρχουν.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρο	1
1.2 Μηχανισμοί αστοχιών	2
1.3 Τα αίτια των αστοχιών	4
1.4 Οι διαδικασίες της ανάλυσης των αστοχιών	4
1.4.1 Εισαγωγή	4
1.4.2 Συλλογή στοιχείων και δειγματοληψία	5
1.4.3 Οπτικός έλεγχος	6
1.4.4 Σχεδιασμός εργαστηριακών ελέγχων	7
1.4.5 Χημικές αναλύσεις	7
1.4.6 Μεταλλογραφία	8
1.4.7 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία και θραυστογραφία	9
1.4.8 Μηχανικές δοκιμασίες	9
1.4.9 Μη-καταστρεπτικοί έλεγχοι	10
1.4.10 Υπολογισμοί	11
1.4.11 Προσδιορισμός αιτίου αστοχίας	12
1.5 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	12
Κεφάλαιο 2 - Αστοχία Αυλών Εναλλάκτη Θερμότητας	14
2.1 Εισαγωγή	14
2.1.1 Συνθήκες Λειτουργίας	15
2.1.2 Υλικό Κατασκευής	16
2.2 Προετοιμασία Μελέτης	17
2.3 Αποτελέσματα	20
2.3.1 Οπτικός έλεγχος	20
2.3.2 Μεταλλογραφικός έλεγχος	21
2.3.3 Μικροσκληρομέτρηση	25
2.3.4 Χημική Ανάλυση	27
2.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα	31
2.5 Προτάσεις	35

Κεφάλαιο 3 - Αστοχία Αυλών Φούρνου Reformer	33
3.1 Εισαγωγή	33
3.1.1 Σύντομη περιγραφή της μονάδας	34
3.1.2 Μηχανισμοί διάβρωσης στους αυλούς reformer	34
3.1.3 Βελτιωμένα κράματα για κατασκευή αυλών reformer	37
3.1.4 Αξιολόγηση κατάστασης & πρόβλεψη ζωής αυλών reformer	39
3.1.5 Περιγραφή της αστοχίας	44
3.1.6 Μεταβλητές λειτουργίας	46
3.1.7 Υλικό κατασκευής	48
3.2 Προετοιμασία Μελέτης	54
3.3 Αποτελέσματα	55
3.3.1 Οπτικός έλεγχος	55
3.3.2 Μεταλλογραφικός έλεγχος	58
3.3.3 Μικροσκληρομέτρηση	66
3.3.4 Δοκιμές εφελκυσμού	74
3.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	77
3.4.1 Ερπυσμός	77
3.4.2 Υλικό κατασκευής	77
3.4.3 Ενανθρακωμένη και απανθρακωμένη ζώνη	78
3.4.4 Θερμικές τάσεις	79
3.4.5 Συμπεράσματα	80
3.5 Προτάσεις	80
Κεφάλαιο 4 - Αστοχία Χάλυβα Μπιγιέτας	82
4.1 Εισαγωγή	82
4.1.1 Ατέλειες στην μικροδομή και διαφορισμός των χυτών	83
4.1.2 Υλικό Κατασκευής	88
4.2 Επίλογή δοκιμών	89
4.3 Αποτελέσματα	90
4.3.1 Οπτικός έλεγχος	90
4.3.2 Μεταλλογραφικός έλεγχος	91
4.3.3 Μικροσκληρομέτρηση	96
4.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα	99

Κεφάλαιο 5 – Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας	100
Βιβλιογραφία	101

1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζουμε πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

1.1 Κίνητρο

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι οι αστοχίες (failures) των μηχανολογικών στοιχείων και κατασκευών.

Ένα μηχανολογικό στοιχείο ή μία κατασκευή γενικότερα θεωρείται ότι έχει αστοχήσει όταν ισχύει μία από τις πιο κάτω συνθήκες:

- Όταν δεν μπορεί πλέον να λειτουργήσει.
- Όταν μπορεί μεν να λειτουργήσει αλλά δεν έχει την απόδοση για την οποία σχεδιάστηκε.
- Όταν η υποβάθμιση είναι τέτοια ώστε η συνέχιση της λειτουργίας δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με αξιοπιστία και ασφάλεια με αποτέλεσμα να απαιτείται άμεση αντικατάσταση ή επισκευή.

Οι επιπτώσεις μιας αστοχίας ποικίλουν. Ας δούμε ορισμένα παραδείγματα. Μία περίπτωση αστοχίας μπορεί να αφορά την θραύση της οδόντωσης ενός γραναζιού στο κιβώτιο ταχυτήτων του αυτοκινήτου σας. Τις περισσότερες φορές μπορείτε ακόμη να οδηγήσετε με ασφάλεια μέχρι το πλησιέστερο συνεργείο για την αποκατάσταση της βλάβης. Σε μία άλλη περίπτωση η αστοχία μπορεί να αφορά την θραύση του εμβόλου της πρέσας σε μία βιομηχανία διέλασης αλουμινίου. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγική διαδικασία σταματά, μέχρι την αντικατάσταση του εμβόλου, γεγονός που συνοδεύεται από σοβαρές οικονομικές συνέπειες για την επιχείρηση. Σε μία ακόμα περίπτωση οι συνέπειες μπορεί να είναι καταστροφικές, η αστοχία δηλαδή να συνοδεύεται από απώλεια ανθρώπινης ζωής. Το 1980 κατέρρευσε η πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου Alexander Kieland. Έχασαν την ζωή τους 120 άνθρωποι. Καταστροφικές αστοχίες έχουν συμβεί και στη χώρα μας. Το 1992 μετά από έκρηξη σε ελληνικό διωλιστήριο έχασαν την ζωή τους 20 άνθρωποι.

Αστοχίες συνέβαιναν, συμβαίνουν και θα συμβαίνουν, παρά την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας. Το ερώτημα που προκύπτει αμέσως μετά μία αστοχία είναι το *γιατί*;

Ποιο είναι το αίτιο της αστοχίας; Ήταν ανεπαρκής ο σχεδιασμός; Δεν χρησιμοποιήθηκε το σωστό υλικό; Ή μήπως η αστοχία οφείλεται σε βίαιη χρήση; Ποια είναι η πιθανότητα να ξανασυμβεί παρόμοια αστοχία; Τι βελτιώσεις απαιτούνται για την πρόληψη αστοχίας; Και τέλος, εάν εφαρμοστεί ένα πρόγραμμα δοκιμών και προσομοίωσης για την αξιολόγηση της αστοχίας, πρέπει το πρόγραμμα αυτό να περιλαμβάνει στατικά ή δυναμικά φορτία, κάμψη ή στρέψη, κρούση ή κόπωση και γενικότερα ποιες πρέπει να είναι οι συνθήκες για την προσομοίωση της αστοχίας; Απάντηση στα ερωτήματα αυτά δίνει η ανάλυση της αστοχίας (failure analysis). Η ανάλυση της αστοχίας περιλαμβάνει την εφαρμογή συγκεκριμένων μεθοδολογιών διερεύνησης με στόχο τον ακριβή προσδιορισμό του αιτίου της αστοχίας (cause of damage) έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών για την πρόληψη παρόμοιων αστοχιών στο μέλλον. Επιπρόσθετα η ανάλυση της αστοχίας αξιοποιείται σε νομικές διαδικασίες για την απόδοση ευθυνών και την επιβολή αποζημιώσεων.

Στην επιστημονική περιοχή της ανάλυσης των αστοχιών υπάρχει σημαντική σε μέγεθος βιβλιογραφία, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας αναπτύχθηκε κατά τα πρόσφατα χρόνια.

1.2 Μηχανισμοί αστοχιών

Σε αυτό το σημείο θα αναφέρουμε τους βασικότερους μηχανισμούς με τους οποίους προκαλείται αστοχία σε κατασκευαστικά στοιχεία. Οι μηχανισμοί αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν σε αστοχίες που προκαλούνται από μηχανικά αίτια (Μηχανικές Αστοχίες), σε αστοχίες που προκαλούνται από διάβρωση (Αστοχίες Διάβρωσης) και σε αστοχίες που οφείλονται στις υψηλές θερμοκρασίες (Αστοχίες σε Υψηλές Θερμοκρασίες), όπως παρακάτω:

Μηχανικές Αστοχίες:

- Υπερβολικές ελαστικές μετατοπίσεις (Excessive elastic displacements)
- Ελαστικός λυγισμός (Elastic buckling)
- Πλαστική παραμόρφωση (Plastic deformation)
- Ερπυσμός (Creep)
- Ψαθυρή θραύση (Brittle Fracture)
- Κόπωση (Fatigue)

- Φθορά (Adhesive wear)
- Φθορά εκτριβής (Abrasive wear)
- Fretting

Αστοχίες Διάβρωσης:

- Ομοιόμορφη διάβρωση (Uniform Corrosion)
- Τρηματική διάβρωση (Pitting Corrosion)
- Διάβρωση εσοχών (Crevice corrosion)
- Γαλβανική διάβρωση (Galvanic corrosion)
- Επιλεκτική διάβρωση (Selective leaching)
- Σπηλαιώση (Cavitation)
- Μηχανική διάβρωση (erosion corrosion)
- Εργοδιάβρωση (stress corrosion cracking)
- Ψαθυροποίηση υδρογόνου (hydrogen embrittlement)

Αστοχίες σε υψηλές θερμοκρασίες:

- Οξείδωση (Oxidation)
- Διάβρωση από προϊόντα καύσης (Fuel ash corrosion)
- Ενανθράκωση (Carburization)
- Μεταλλική Κονιοποίηση (Metal dusting)
- Σουλφιδίωση (Sulfidation)
- Θερμικό σοκ (Thermal shock)

1.3 Τα αίτια των αστοχιών

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέραμε τους κυριότερους μηχανισμούς αστοχιών. Αυτό που έχει όμως μεγαλύτερη σημασία στην ανάλυση των αστοχιών είναι να προσδιοριστεί το αίτιο της αστοχίας, ώστε να είναι δυνατόν να προδιαγραφούν οι διορθωτικές ενέργειες για να μην ξανασυμβεί παρόμοια αστοχία στο μέλλον. Τα κυριότερα αίτια αστοχιών είναι τα εξής:

- Ανεπαρκής μηχανολογικός σχεδιασμός
- Λανθασμένη επιλογή υλικού
- Ατέλειες στα υλικά κατασκευής
- Ανεπαρκής κατεργασία των υλικών
- Ανεπαρκής συναρμολόγηση
- Μη-κανονικές συνθήκες λειτουργίας
- Ανεπαρκής συντήρηση
- Ανεπαρκής ποιοτικός έλεγχος

Τις περισσότερες φορές η αστοχία οφείλεται σε περισσότερα από ένα αίτια. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχουν μικρορωγμές σε ένα χυτό εξάρτημα, που υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας δεν αποτελούν πρόβλημα. Όμως κάτω από βίαιες συνθήκες λειτουργίας, όπως για παράδειγμα συμβαίνει σε απότομα σταματήματα ή ξεκινήματα μιας μονάδας, οι μικρορωγμές αυτές μπορεί να διαδοθούν και να προκαλέσουν θραύση του εξαρτήματος. Στην περίπτωση αυτή η αστοχία οφείλεται στον συνδυασμό ατέλειας του υλικού κατασκευής και σε μη-κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

1.4 Οι διαδικασίες της ανάλυσης των αστοχιών

1.4.1 Εισαγωγή

Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε στην μεθοδολογία και τις διαδικασίες που ακολουθούνται για την πραγματοποίηση μια μελέτης αστοχίας. Ο στόχος της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός του αιτίου αστοχίας (cause of damage) έτσι ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα

μέτρα για την αποφυγή παρόμοιας αστοχίας στο μέλλον. Σε γενικές γραμμές τα στάδια για την ανάλυση μιας αστοχίας είναι τα εξής:

- Συλλογή στοιχείων και δειγματοληψία
- Οπτικός έλεγχος
- Σχεδιασμός εργαστηριακών ελέγχων
- Χημικές αναλύσεις
- Μεταλλογραφία
- Ηλεκτρονική μικροσκοπία και θραυστογραφία
- Μηχανικές δοκιμασίες
- Μη-καταστρεπτικοί έλεγχοι
- Υπολογισμοί
- Προσδιορισμός αιτίου αστοχίας
- Προτάσεις για την αποφυγή παρόμοιας αστοχίας στο μέλλον
- Συγγραφή τεχνικής έκθεσης

Η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάλυση μιας αστοχίας εξαρτάται από την συγκεκριμένη περίπτωση. Εάν πρόκειται για μία απλή περίπτωση, ίσως να αρκεί ο οπτικός έλεγχος και μία χημική ανάλυση. Σε πιο σύνθετες περιπτώσεις απαιτούνται περαιτέρω εργαστηριακοί έλεγχοι, όπως μεταλλογραφίες και μηχανικές δοκιμασίες ή ακόμα και υπολογισμοί της μηχανικής των θραύσεων για να προσδιοριστεί ο μηχανισμός και το αίτιο της αστοχίας. Ας δούμε όμως μία σύντομη περιγραφή των διαφορετικών ενεργειών που απαιτούνται για την ανάλυση μιας αστοχίας.

1.4.2 Συλλογή στοιχείων και δειγματοληψία

Στο πρώτο αυτό στάδιο πραγματοποιείται μία επίσκεψη στο χώρο της αστοχίας και συλλέγονται στοιχεία που περιλαμβάνουν:

- Λειτουργικά σχέδια της εγκατάστασης (process plans) και μηχανολογικά σχέδια του εξοπλισμού που υπέστη την αστοχία.
- Το ιστορικό κατασκευής, κατεργασίας και συντήρησης των κατασκευαστικών στοιχείων. Συλλογή των συναφών προδιαγραφών των υλικών και των διαδικασιών συγκόλλησης και συναρμολόγησης.

- Το ιστορικό λειτουργίας με ιδιαίτερη έμφαση σε αναφορές για μη κανονικές συνθήκες όπως υπερφόρτιση, άνοδος θερμοκρασίας, απότομα σταματήματα ή λειτουργία σε διαβρωτικό περιβάλλον. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στο χρονικό διάστημα πριν την αστοχία ώστε να είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η αλληλουχία των συμβάντων πριν την αστοχία.
- Φωτογραφίες από τον τόπο της αστοχίας, των κατασκευαστικών στοιχείων που αστόχησαν καθώς και του παρακείμενου εξοπλισμού.

Στη συνέχεια διενεργείται η δειγματοληψία, που αφορά στην συλλογή των απαραίτητων για την ανάλυση τμημάτων από την κατασκευή που υπέστη την αστοχία. Η δειγματοληψία πρέπει να διενεργείται με ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα δείγματα να περιέχουν όλη την πληροφορία που είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί για την ανάλυση της αστοχίας. Επίσης πρέπει η μέθοδος της δειγματοληψίας (π.χ. κοπή) να μην προκαλέσει αλλοιώσεις στα δείγματα, τέτοιες που να παρεμποδίσουν την εξαγωγή συμπερασμάτων. Πολλές φορές μαζί με τα δείγματα από τα υλικά που αστόχησαν λαμβάνονται και δείγματα από ασφαλείς περιοχές για σύγκριση. Εκτός από τα δείγματα των υλικών του κατασκευαστικού στοιχείου που αστόχησε, λαμβάνονται και δείγματα των υγρών με τα οποία ήταν σε επαφή το κατασκευαστικό στοιχείο καθώς και δείγματα τυχόν επικαθήσεων (αλάτων, σκουριάς, καυσίμου, ελαίου, κ.α.) για την πραγματοποίηση χημικών αναλύσεων.

1.4.3 Οπτικός έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος αποτελεί ίσως ένα από τα πιο σημαντικά στάδια κατά την μελέτη μίας αστοχίας. Σημεία προσοχής αποτελούν τα εξής: οι επιφάνειες θραύσης, οι οξειδωμένες ή διαβρωμένες επιφάνειες, η όδευση των ρωγμών που προκάλεσαν την θραύση, οι αλλαγές χρωματισμού στην επιφάνεια, ενδείξεις βίαιης χρήσης, όπως χτυπήματα ή χαραγές, καθώς και η γενική κατάσταση των κατασκευαστικών στοιχείων, η οποία είναι ενδεικτική της ποιότητας κατεργασίας. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται και η μέτρηση κρίσιμων διαστάσεων καθώς και φωτογράφιση όλων των δειγμάτων.

Αξίζει να γίνει ιδιαίτερη μνεία για την παρατήρηση των επιφανειών θραύσης με γυμνό μάτι. Ο προσανατολισμός και η μακροσκοπική εμφάνιση της επιφάνειας θραύσης μπορεί να δώσει πληροφορίες για την εντατική κατάσταση που προκάλεσε την θραύση. Ο μονοτονικός

εφελκυσμός προκαλεί επίπεδες επιφάνειες θραύσης προσανατολισμένες κάθετα στην κατεύθυνση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης κάτω από συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain), ενώ σε συνθήκες επίπεδης έντασης (plane stress) σχηματίζονται κεκλιμένες επιφάνειες με γωνία 45° ως προς την μέγιστη εφελκυστική τάση. Στην πράξη σε πολλά ελάσματα εμφανίζονται και οι δύο εκδοχές: επίπεδη επιφάνεια στο μέσον του πάχους και κεκλιμένη επιφάνεια θραύσης προς τις δύο επιφάνειες του ελάσματος. Αυτό συμβαίνει γιατί στο μέσον του πάχους επικρατούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης ενώ στις επιφάνειες επικρατούν συνθήκες επίπεδης έντασης. Σε λεπτά ελάσματα ή σε ράβδους μικρής διαμέτρου συνήθως παρατηρούνται μόνον κεκλιμένες επιφάνειες θραύσης αφού δεν αναπτύσσονται τάσεις κατά την διεύθυνση του πάχους. Επίσης η μακροσκοπική παρατήρηση μπορεί να δώσει πληροφορίες για την όδευση και κυρίως για την θέση εκκίνησης μιας ρωγμής ώστε να συσχετιστεί με εγκοπές ή άλλες αιτίες συγκέντρωσης των τάσεων.

1.4.4 Σχεδιασμός εργαστηριακών ελέγχων

Στο στάδιο αυτό της διαδικασίας, σχεδιάζονται όλοι οι απαιτούμενοι εργαστηριακοί έλεγχοι για την διερεύνηση της αστοχίας. Συγκεκριμένα λαμβάνονται αποφάσεις για την κοπή των μεταλλογραφικών δοκιμών και τον προσανατολισμό των μεταλλογραφικών τομών, για τις περιοχές απ' όπου θα εξαχθούν δοκίμια εφελκυσμού ή κρούσης, για το ποιες προδιαγραφές θα χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση των δοκιμών, για το είδος και πλήθος των χημικών αναλύσεων και τέλος για τους απαραίτητους ελέγχους επιφανειών θραύσης με ηλεκτρονική μικροσκοπία. Σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευάζονται σκαριφήματα που δείχνουν την ακριβή θέση των δοκιμών στο κατασκευαστικό στοιχείο που αστόχησε.

1.4.5 Χημικές αναλύσεις

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιούνται χημικές αναλύσεις του υλικού του κατασκευαστικού στοιχείου για να διαπιστωθεί η συμμόρφωση με τις σχετικές προδιαγραφές. Παράλληλα πραγματοποιούνται χημικές αναλύσεις στα υγρά διεργασίας (π.χ. στο καύσιμο εάν η αστοχία αφορά τον αυλό μεταφοράς καυσίμου) καθώς και στις επικαθήσεις που τυχόν βρέθηκαν στην επιφάνεια του κατασκευαστικού στοιχείου.

1.4.6 Μεταλλογραφία

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιούνται οι μεταλλογραφικοί έλεγχοι αφού προηγουμένως εφαρμοστούν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες για την προπαρασκευή των μεταλλογραφικών δοκιμίων (εγκιβωτισμός, λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή). Με την μεταλλογραφία είναι δυνατόν να προσδιοριστούν τυχόν μεταβολές στην μικροδομή, οι οποίες συνέβαλαν στην αστοχία του υλικού. Έτσι είναι δυνατόν για παράδειγμα να διαπιστωθεί σφαιροποίηση καρβιδίων, που υποδηλώνει εκτεταμένη παραμονή σε υψηλές θερμοκρασίες, ή τυχόν ενανθράκωση που οφείλεται στην παρουσία ενανθρακωτικής ατμόσφαιρας σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης μπορεί να διαπιστωθεί εάν η όδευση μιας ρωγμής είναι περικρυσταλλική ή διακρυσταλλική και να προσδιοριστεί ο σχηματισμός ή η διαλυτοποίηση φάσεων και ενδομεταλλικών ενώσεων. Είναι δυνατόν επίσης να προσδιοριστεί η μικροδομή στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη των συγκολλήσεων και να συσχετιστεί με τυχόν ρηγματώσεις στην ίδια περιοχή. Με την μεταλλογραφία είναι δυνατόν να προσδιοριστεί εάν ένας ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας υπέστη αστοχία λόγω ευαισθητοποίησης, που οφείλεται στον σχηματισμό καρβιδίων του χρωμίου στα σύνορα των κόκκων. Είναι επίσης δυνατόν να προσδιοριστεί ποιοτικά ο βαθμός ερπυσμού σε ένα κράμα που είναι εκτεθειμένο σε υψηλές θερμοκρασίες, π.χ. στον αυλό ενός φούρνου. Τέλος με την μεταλλογραφία προσδιορίζεται και η αρχική ποιότητα του υλικού όσον αφορά την παρουσία εγκλεισμάτων, ισχυρής διαστρωμάτωσης (banding) ή άλλων σφαλμάτων που οφείλονται στην κατεργασία του υλικού.

Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνονται και τυχόν μεταλλογραφίες ρέπλικας που είναι δυνατόν να απαιτηθούν για να διαπιστωθεί η κατάσταση της μικροδομής γεινιάζοντος εξοπλισμού, από τον οποίο δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν κανονικά δοκίμια μεταλλογραφίας. Η μεταλλογραφία ρέπλικας πραγματοποιείται με φορητό εξοπλισμό λείανσης και στίλβωσης και η μικροδομή αποτυπώνεται σε ειδικά για τον σκοπό αυτό φιλμ. Η παρατήρηση και φωτογράφιση της αποτυπωμένης δομής μπορεί στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί σε οποιοδήποτε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο.

1.4.7 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία και Θραυστογραφία

Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται μεγαλύτερη μεγέθυνση και βάθος πεδίου, από αυτήν που προσφέρει το οπτικό μικροσκόπιο για την παρατήρηση της μικροδομής. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) προσφέρει την δυνατότητα παρατήρησης της επιφάνειας σε μεγάλη μεγέθυνση και επιπλέον την δυνατότητα πραγματοποίησης τοπικής χημικής ανάλυσης με την μέθοδο EDAX (Energy Dispersive Analysis with X-rays). Έτσι για παράδειγμα, εάν υπάρχει καθίζηση κάποιων φάσεων στα σύνορα των κόκκων ενός ανοξείδωτου χάλυβα, μπορεί να διαπιστωθεί εάν πρόκειται για καρβίδια του χρωμίου, εάν το scale που έχει αναπτυχθεί στην επιφάνεια ενός χάλυβα είναι σουλφίδιο και επίσης μπορεί να διερευνηθεί η παρουσία χλωρίου μέσα σε μία ρωγμή εργοδιάβρωσης. Μία ακόμα πολύ σημαντική δυνατότητα που μας παρέχει το SEM είναι η ανάλυση των επιφανειών θραύσης (θραυστογραφία). Είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ο τύπος της θραύσης (όγκιμη, ψαθυρή ή κόπωση), τα σημεία εκκίνησης και η όδευση των ρωγμών καθώς και η συσχέτιση με στοιχεία της μικροδομής, όπως το μέγεθος των κόκκων και τα εγκλείσματα. Ειδικά στην κόπωση, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η ταχύτητα ανάπτυξης της ρωγμής από την μέτρηση της μέσης απόστασης μεταξύ των χαρακτηριστικών αυλακώσεων κόπωσης (fatigue striations). Η πληροφορία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί σε υπολογισμούς της διάρκειας ζωής σε κόπωση (βλ. 1.4.10).

1.4.8 Μηχανικές δοκιμασίες

Ο κύριος λόγος για τον οποίο πραγματοποιούνται μηχανικές δοκιμασίες στα πλαίσια της ανάλυσης αστοχιών είναι για να προσδιοριστεί η συμμόρφωση του υλικού που αστόχησε με τις προδιαγραφές (π.χ. εάν το υλικό έχει την αντοχή εφελκυσμού ή την επιμήκυνση που ορίζει η προδιαγραφή). Επίσης οι μηχανικές δοκιμασίες πραγματοποιούνται για να διαπιστωθεί εάν υπήρξε μεταβολή των ιδιοτήτων κατά την διάρκεια λειτουργίας του εξοπλισμού (π.χ. εξασθένηση, σκλήρυνση ή ψαθυροποίηση). Οι πιο κοινές δοκιμασίες είναι η δοκιμασία εφελκυσμού και οι σκληρομετρήσεις (μικρο και μακρο). Σε πιο σύνθετες αστοχίες είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν δοκιμασίες κρούσεως (Charpy), δοκιμασίες δυσθραυστότητας K_{IC} ή ακόμα και δοκιμασίες κόπωσης.

Οι σκληρομετρήσεις μπορεί να δώσουν πληροφορίες για την αξιολόγηση μιας θερμικής κατεργασίας, να προσδιοριστεί πιθανή εξασθένηση λόγω απανθράκωσης ή υπερθέρμανσης και πιθανή εργοσκληρυνση λόγω παραμόρφωσης.

Σε αρκετές περιπτώσεις είναι χρήσιμο να πραγματοποιούνται μηχανικές δοκιμασίες σε συνθήκες που προσομοιάζουν τις συνθήκες λειτουργίας. Έτσι είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν δοκιμασίες εφελκυσμού σε υψηλές θερμοκρασίες για να προσδιοριστεί εάν ένας χάλυβας υφίσταται ψαθυροποίηση από καθίζηση καρβιδίων

Τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμασιών σε δοκίμια από την κατασκευή που υπέστη την αστοχία πρέπει να αξιολογούνται με μεγάλη προσοχή. Εάν, για παράδειγμα, βρεθεί ότι το όριο διαρροής είναι κατά 10% μικρότερο από το ελάχιστο όριο της προδιαγραφής δεν σημαίνει ότι το υλικό αστόχησε εξαιτίας αυτής της διαφοράς. Οι εργαστηριακές μηχανικές δοκιμές σε μικρά δοκίμια δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως την συμπεριφορά μιας μεγάλης κατασκευής από το ίδιο υλικό. Έχει αποδειχτεί ότι το μέγεθος της κατασκευής (π.χ. το πάχος των ελασμάτων) παίζει σημαντικό ρόλο στην ψαθυρή θραύση, την κόπωση και την εργοδιάβρωση. Όσο το μέγεθος των κατασκευών αυξάνεται τόσο μειώνεται η αντίστασή τους στις πιο πάνω μορφές αστοχίας.

1.4.9 Μη-καταστρεπτικοί έλεγχοι

Οι τεχνικές μη-καταστρεπτικού ελέγχου (Non Destructive Testing, NDT) είναι δυνατόν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες κατά την ανάλυση μιας αστοχίας. Τα ευρήματα αφορούν κυρίως επιφανειακές και υποεπιφανειακές ρωγμές και ελαττώματα, όπως π.χ τα ελαττώματα των συγκολλήσεων και των χυτών. Οι κυριότερες τεχνικές είναι οι εξής:

- Διεισδυτικά υγρά
- Μαγνητικά σωματίδια
- Δινορεύματα (eddy currents)
- Υπέρηχοι
- Ραδιογραφία

Όλες οι τεχνικές έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένη ανιχνευσιμότητα. Υπάρχουν επίσης περιορισμοί εφαρμογής, για παράδειγμα η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά.

1.4.10 Υπολογισμοί

Κατά την ανάλυση μιας αστοχίας, εκτός από τους εργαστηριακούς ελέγχους, είναι απαραίτητο πολλές φορές να πραγματοποιηθούν και διάφοροι υπολογισμοί, που θα βοηθήσουν στην διαμόρφωση του σεναρίου αστοχίας. Οι υπολογισμοί αυτοί συνήθως αφορούν σε:

- Ανάλυση τάσεων
- Υπολογισμοί της μηχανικής των θραύσεων
- Υπολογισμοί της διάρκειας ζωής σε κόπωση
- Υπολογισμοί ερπυσμού

Η ανάλυση τάσεων είναι το πρώτο αναγκαίο βήμα κατά το οποίο προσδιορίζεται η εντατική κατάσταση με δεδομένα τα φορτία και την γεωμετρία του κατασκευαστικού στοιχείου που αστόχησε. Για την ανάλυση των τάσεων εφαρμόζονται είτε οι αναλυτικές εξισώσεις της μηχανικής των υλικών είτε, σε πιο σύνθετες καταστάσεις, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι υπολογισμοί της μηχανικής των θραύσεων αφορούν πρώτιστα τον προσδιορισμό της ανοχής του κατασκευαστικού στοιχείου στη βλάβη, δηλαδή στον υπολογισμό του κρίσιμου μεγέθους ρωγμής για την συγκεκριμένη γεωμετρία και φόρτιση. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για το αίτιο αστοχίας (εάν η αστοχία περιλαμβάνει θραύση) και για τον σκοπό αυτό έχει περιληφθεί και σε αρκετές προδιαγραφές, π.χ. API Fitness for Purpose,..

Στην περίπτωση της κόπωσης οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής. Σε περίπτωση που η πραγματική ζωή ήταν μικρότερη της προδιαγραφείσας, τότε οι υπολογισμοί αυτοί είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην αποκάλυψη πιθανών αιτιών, εάν για παράδειγμα υπήρξε υπερφόρτιση ή κάποιας μορφής ψαθυροποίηση του υλικού.

Τέλος στον ερπυσμό, με την εφαρμογή κατάλληλων μοντέλων, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η επίδραση της τάσης και η επίδραση της θερμοκρασίας ιδιαίτερα εάν για το υλικό που αστόχησε είναι διαθέσιμα τα διαγράμματα του τύπου Larson-Miller.

Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί συνδυάζονται με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων για την διαμόρφωση σεναρίων αστοχίας.

1.4.11 Προσδιορισμός αιτίου αστοχίας

Ο αντικειμενικός σκοπός μιας ανάλυσης αστοχίας είναι ο προσδιορισμός του αιτίου της αστοχίας. Κατά την διάρκεια εφαρμογής της διαδικασίας διαμορφώνονται διαφορετικά σενάρια αστοχίας. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων και των υπολογισμών βοηθούν στον αποκλεισμό κάποιων σεναρίων και την τελική διαμόρφωση του επικρατέστερου σεναρίου αστοχίας. Εάν πρόκειται για μία απλή περίπτωση αστοχίας, όπου το αίτιο είναι κατά κάποιο τρόπο προφανές από τα αρχικά στάδια της ανάλυσης, τότε η εφαρμογή των υπολοίπων σταδίων της διαδικασίας θα βοηθήσει στην επιβεβαίωση του συγκεκριμένου σεναρίου. Εάν πρόκειται για μία σύνθετη περίπτωση αστοχίας τότε κατά την διάρκεια της διαδικασίας διαμορφώνονται σενάρια τα οποία είτε επιβεβαιώνονται από τα ευρήματα των επόμενων σταδίων, είτε αποκλείονται. Σε όλες τις περιπτώσεις η τελική γνώμη για το αίτιο της αστοχίας θα πρέπει να είναι επιστημονικά άρτια και να βασίζεται σε σενάρια αστοχίας, τα οποία επιβεβαιώνονται από τους εργαστηριακούς ελέγχους και τους υπολογισμούς.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνουμε ώστε να μην καταλήγουμε σε συμπεράσματα από μεμονωμένα ευρήματα των εργαστηριακών ελέγχων. Για παράδειγμα, εάν σε μία μεταλλογραφία βρεθεί ότι το υλικό έχει υποστεί απανθράκωση, να μην καταλήξουμε αμέσως στο συμπέρασμα ότι το υλικό υπέστη υπερθέρμανση και απώλεσε άνθρακα με αποτέλεσμα να μειωθεί η αντοχή του. Είναι δυνατόν στην συνέχεια της διαδικασίας να βρεθούν άλλα στοιχεία τα οποία να ανατρέψουν αυτή την εκδοχή, ως αίτιο αστοχίας και να δείξουν ότι απλά η απανθράκωση ήταν ένα παράπλευρο φαινόμενο.

1.5 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 5, αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα:

Τα Κεφάλαια 2-4 αποτελούν το κυρίως μέρος της εργασίας. Πρόκειται για τα τρία (3) Case Studies, τα οποία μελετήσαμε κατά τη διάρκεια της εργαστηριακής έρευνας και έχουν ως εξής:

Κεφάλαιο 2: Αστοχία Αυλών Εναλλάκτη Θερμότητας

Κεφάλαιο 3: Αστοχία Αυλών Φούρνου Reformer

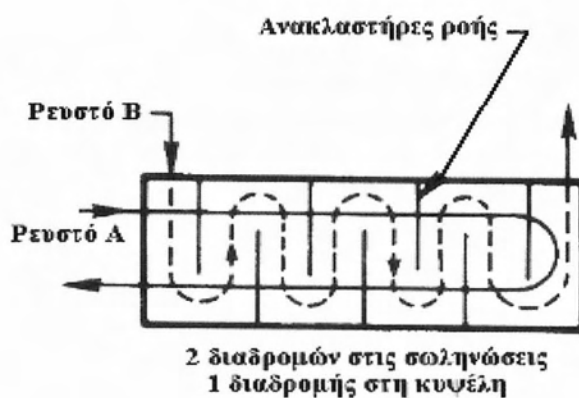
Κεφάλαιο 4: Μελέτη Προβληματικού Χάλυβα Μπιγιέτας

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μία σύνοψη της διπλωματικής εργασίας, με τα αποτελέσματα κάθε Case Study.

2. Αστοχία Αυλών Εναλλάκτη Θερμότητας

2.1 Εισαγωγή

Το Εργαστήριο Υλικών παρέλαβε τον Οκτώβριο του 2006, δύο (2) αυλούς από Ελληνικό Δωλιστήριο προερχόμενους από εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος είναι της μορφής:



Σχήμα 2.1: Διάταξη Εναλλάκτη

Οι εναλλάκτες θερμότητας συνήθως χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν θερμότητα από ατμό, νερό ή άλλο αέριο σε κάποιο υγρό ή αέριο. Ορισμένα από τα κριτήρια με βάση τα οποία γίνεται η επιλογή υλικών για τους εναλλάκτες θερμότητας είναι η αντοχή στη διάβρωση, η θερμική αγωγιμότητα και το κόστος.

Οι αυλοί σε ένα εναλλάκτη θερμότητας μεταφέρουν θερμότητα από το ρευστό που βρίσκεται στο εσωτερικό τους σε αυτό που βρίσκεται στο εξωτερικό τους, ή αντιστρόφως. Προκειμένου να υπάρχει αντοχή στη διάβρωση, οι σωληνώσεις πρέπει να είναι ανθεκτικές σε ομοιόμορφη διάβρωση, σε τρηματική διάβρωση (pitting), σε εργοδιάβρωση (SCC), σε επιλεκτική διάβρωση και στο σχηματισμό οξειδίων.

Πριν αρχίσουμε την ανάλυση της αστοχίας του εναλλάκτη, πρέπει να συλλέξουμε μια σειρά από πληροφορίες. Αρχικά πρέπει να μάθουμε το όνομα και τη λειτουργία της μονάδας. Έπειτα το μέγεθος, την τυποποίηση και τις προδιαγραφές του υλικού κατασκευής. Θα πρέπει επίσης να έχουμε σχέδια της μονάδας και της αστοχίας. Όσον αφορά στο περιβάλλον (εσωτερικό και εξωτερικό) θα πρέπει να γνωρίζουμε τη μέγιστη και την ελάχιστη

θερμοκρασία, ενώ για τα περιεχόμενα που έρχονται σε επαφή με τους αυλούς πρέπει να γνωρίζουμε την κοινή ονομασία, τη χημική σύσταση, τη συγκέντρωση, τις προσμίξεις, το pH, την ταχύτητα, τον αερισμό, καθώς και το αν έρχονται σε επαφή με άλλα υλικά. Για την αστοχία πρέπει να μας είναι γνωστά ο τύπος της, η θέση της, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες δημιουργήθηκε αλλά και η διάρκεια ζωής της. Τέλος, θα πρέπει να μάθουμε πιθανές ασυνήθιστες συνθήκες που υπήρξαν πριν την αστοχία, καθώς και τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν κατά την κατασκευή, τη συντήρηση αλλά και κατά τη θερμική κατεργασία.

2.1.1 Συνθήκες Λειτουργίας

Οι συνθήκες λειτουργίας του εναλλάκτη δόθηκαν ως εξής:

- Στο Κέλυφος (Shell) η θερμοκρασία εισόδου είναι $T_{in}=38^{\circ}\text{C}$ και η αντίστοιχη πίεση $P_{in}=8 \text{ kg/cm}^2$, ενώ η θερμοκρασία εξόδου είναι $T_{out}=215^{\circ}\text{C}$ και η αντίστοιχη πίεση $P_{out}=5.2 \text{ kg/cm}^2$.

Στο εσωτερικό του κελύφους κυκλοφορεί υγρό με σύσταση αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1: Σύσταση υγρού στο κέλυφος

Συστατικό	kg*mol/h	%mol
H ₂ O	0,03	0,15
H ₂	0,46	2,37
H ₂ S	1,45	7,47
CH ₄	0,09	0,46
C ₂ H ₆	0,08	0,41
C ₃ H ₈	0,11	0,57
n-But	0,07	0,36
Iso-But	0,06	0,31
GasOil	17,07	87,90

- Στους Αυλούς (Tubes) η θερμοκρασία εισόδου είναι $T_{in}=260^{\circ}\text{C}$, η θερμοκρασία εξόδου είναι $T_{out}=215^{\circ}\text{C}$ και η πίεση $P=5.2 \text{ kg/cm}^2$.

Στο εσωτερικό των αυλών ρέει αέριο με σύσταση αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Σύσταση υγρού στους αυλούς

Συστατικό	kg*mol/h	%mol
H ₂ O	0.89	0.16
H ₂	476.9	88.05
H ₂ S	27.04	4.99
CH ₄	12.93	2.39
C ₂ H ₆	3.02	0.56
C ₃ H ₈	1.3	0.24
n-But	0.28	0.05
Iso-But	0.31	0.06
GasOil	18.41	3.40
CO	0.01	
N ₂	0.55	0.1

2.1.2 Υλικό Κατασκευής

Οι προδιαγραφές των υλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν οι αυλοί (S32750) και το κέλυφος (S32760) του εναλλάκτη είναι ASTM A789 και ASTM A240. Η χημική ανάλυση και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, φαίνονται στους Πίνακες 2.3 και 2.4 αντίστοιχα.

Πίνακας 2.3: Χημική Ανάλυση (% κ.β.)

UNS	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	N ₂	Other	PRE range(*)
S32750	0.03	1.2	0.02	0.035	1.0	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	0.5Cu	37.7-47.6
S32760	0.03	1.0	0.01	0.03	1.0	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	0.30	0.5-1.0Cu, 0.5W	40(c)

(*) Ο αριθμός PRE (Pitting Resistance Equivalent) δημιουργήθηκε για να έχουμε μία ενδεικτική τιμή της αντοχής σε pitting των ανοξειδωτων χαλύβων. Η αντοχή σε pitting καθορίζεται κυρίως από τη σύσταση τους και τα στοιχεία που παίζουν σημαντικό ρόλο σε αυτό είναι το χρώμιο (Cr), το μολυβδαίνιο (Mo) και το άζωτο (N). Έτσι υπολογίζοντας την επίδραση του καθενός έχουμε τον τύπο: $PRE = \%Cr + 3.3(\%Mo) + 16(\%N)$.

Πίνακας 2.4: Μηχανικές Ιδιότητες

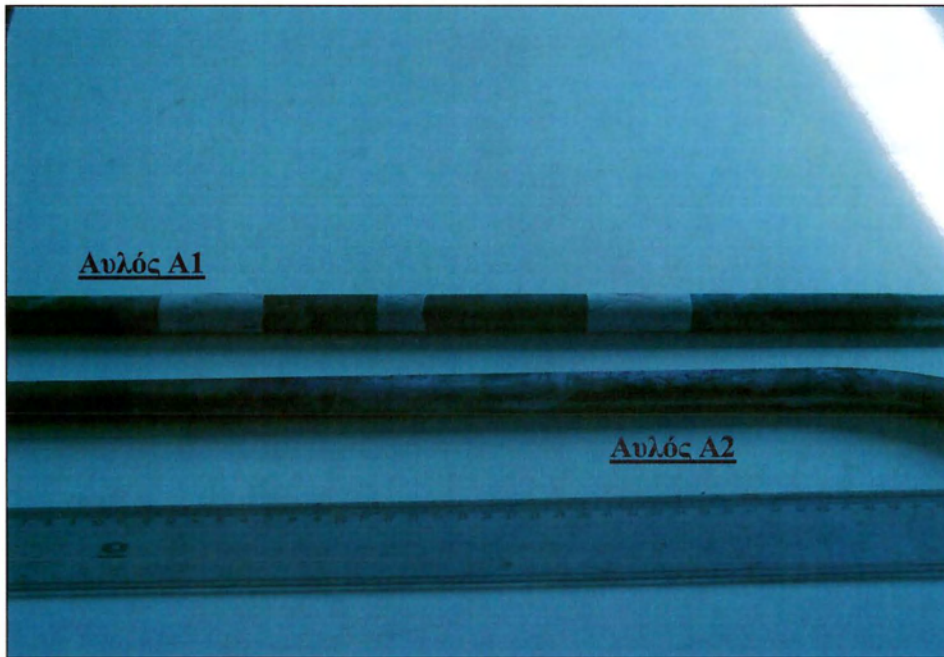
UNS	Minimum yield strength		Minimum tensile strength		Elongation (min)	Hardness	
	MPa	ksi	MPa	ksi	%	HB	HRC
S32750	550	80	800	116	15	310	32
S32760	550	80	750	109	25	200-270	...

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες Duplex, δηλαδή η κατηγορία χαλύβων στην οποία ανήκουν τα υλικά κατασκευής του κελύφους και των αυλών, έχουν μία δομή που αποτελείται από φερριτική bcc και ωστενίτη fcc. Η ακριβής ποσότητα της κάθε φάσης είναι συνάρτηση της σύνθεσης και της θερμικής κατεργασίας. Τα περισσότερα κράματα σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν ίση ποσότητα από κάθε φάση για την ισχυροποίηση τους. Τα κυριότερα κραματικά στοιχεία είναι το χρώμιο και το νικέλιο, αλλά μπορούν να προστεθούν άζωτο, μολυβδαίνιο, χαλκός, πυρίτιο και βολφράμιο για να προκύψει η επιθυμητή ισορροπία και να αποκτήσει το υλικό την προκαθορισμένη αντοχή στην διάβρωση.

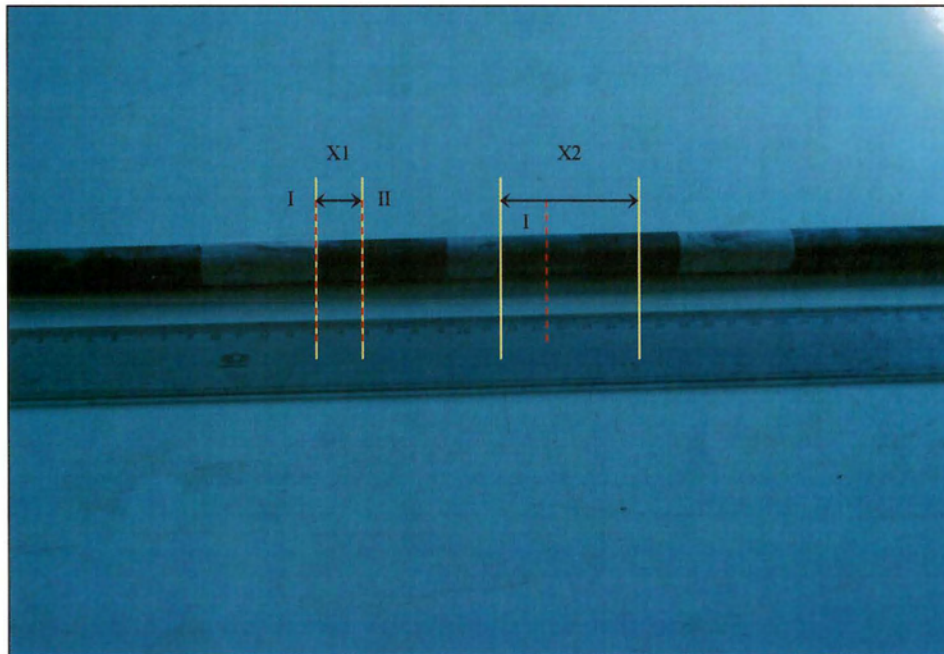
Η αντοχή στη διάβρωση των ανοξείδωτων χαλύβων Duplex είναι παρόμοια με των ωστενιτικών χαλύβων που περιέχουν αντίστοιχα κραματικά στοιχεία. Ωστόσο, οι ανοξείδωτοι χάλυβες Duplex έχουν μεγαλύτερη ελαστικότητα και αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά και μεγαλύτερη αντοχή σε εργοδιάβρωση σε σχέση με τους ισοδύναμους ωστενιτικούς. Η σκληρότητα των ανοξείδωτων χαλύβων Duplex κυμαίνεται ανάμεσα σε αυτή των ωστενιτικών και σε αυτή των φερριτικών χαλύβων.

2.2 Προετοιμασία Μελέτης

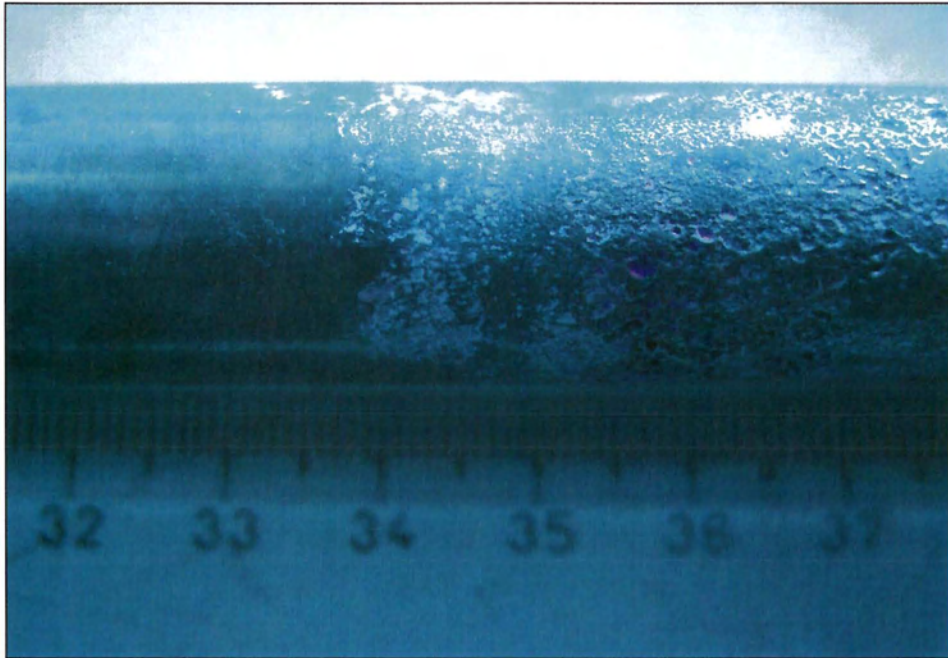
Οι δύο αυλοί παραλήφθηκαν όπως φαίνονται στην Εικόνα 1 και ονομάστηκαν A1 και A2. Με τον έλεγχο διεισδυτικών υγρών που προηγήθηκε στο διωλιστήριο προσδιορίστηκαν δύο ρωγμές (X1 και X2) στον A1 (Εικόνα 2.2) και τρηματική διάβρωση (pitting) στον A2 (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.1: Αυλοί Α1 και Α2



Εικόνα 2.2: Θέσεις ρωγμών στον Αυλό Α1 και θέσεις κοπής δοκιμίων



Εικόνα 2.3: Περιοχή που υπέστη pitting ο Αυλός Α2

Οι αστοχίες στους εναλλάκτες θερμότητας συνήθως συνδέονται με τις ατέλειες στο υλικό και τη μέθοδο κατασκευής των αυλών, τις συγκολλήσεις, τα στάδια δημιουργίας, τον ακατάλληλο σχεδιασμό, τα ακατάλληλα υλικά, τα είδη ελέγχων που διενεργούνται από τον προμηθευτή και τον χρήστη αλλά και από το περιβάλλον της μονάδας μετά την κατασκευή της· συμπεριλαμβανομένου των συνθηκών που επικρατούν κατά την αποθήκευση, τη μεταφορά, το πρώτο ξεκίνημα της μονάδας, τη συνηθισμένη λειτουργία της, αλλά και τις συνθήκες που επικρατούν κατά τις παύσεις λειτουργίας, τακτικές και μη. Πιο συγκεκριμένα, οι πιο κοινές αστοχίες στους εναλλάκτες είναι το pitting, η εργοδιάβρωση, η κόπωση, η ομοιόμορφη διάβρωση, οι ρωγμές, η επιλεκτική διάβρωση και η μηχανική διάβρωση.

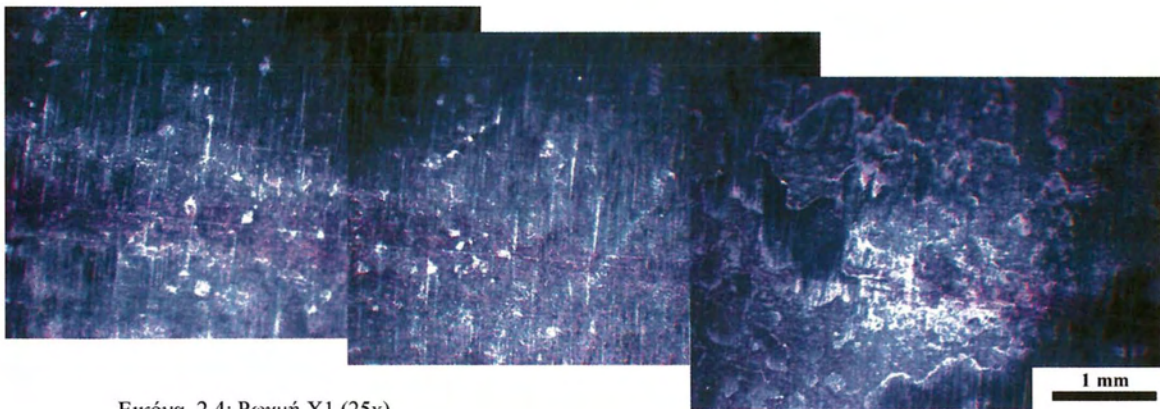
Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να εξακριβώσει τα αίτια της αστοχίας και να υποδείξει πιθανές λύσεις για την αποφυγή παρόμοιων καταστάσεων στο μέλλον.

2.3 Αποτελέσματα

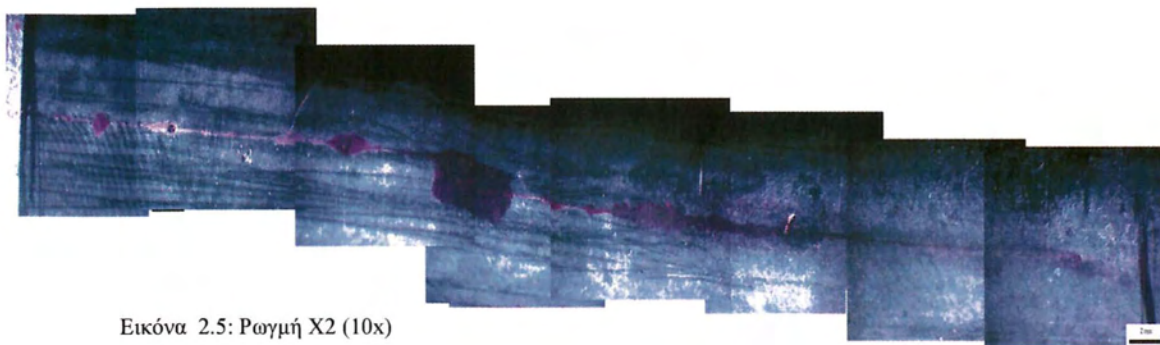
2.3.1 Οπτικός έλεγχος

- Αυλός Α1

Επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη των δύο ρωγμών και μετρήθηκε το μήκος τους, σε 10mm περίπου για την X1 (Εικόνα 2.4) και 73mm περίπου για την X2 (Εικόνα 2.5).



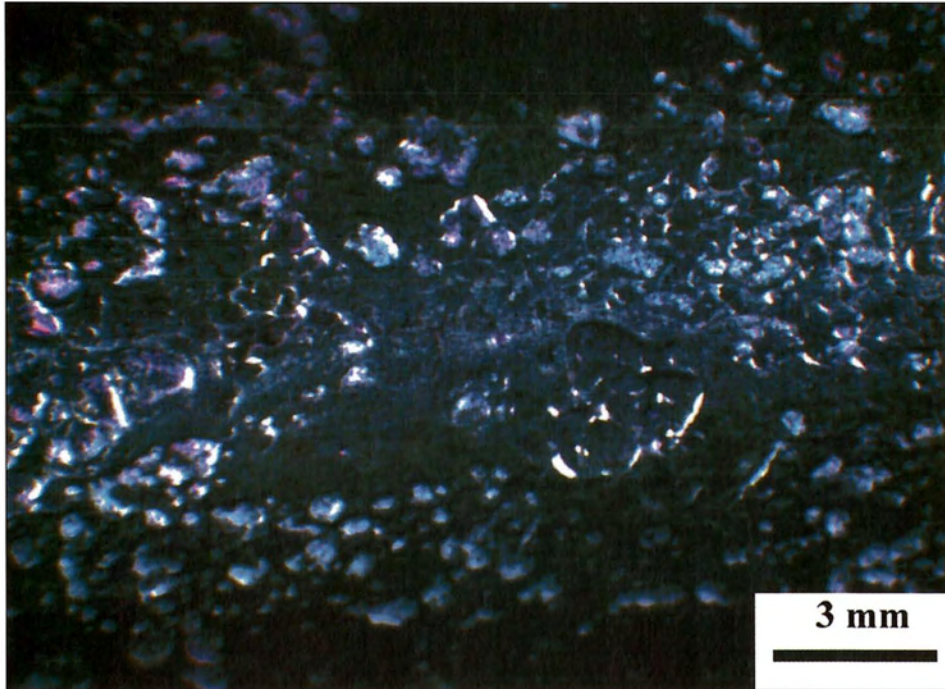
Εικόνα 2.4: Ρωγή X1 (25x)



Εικόνα 2.5: Ρωγή X2 (10x)

- Αυλός A2

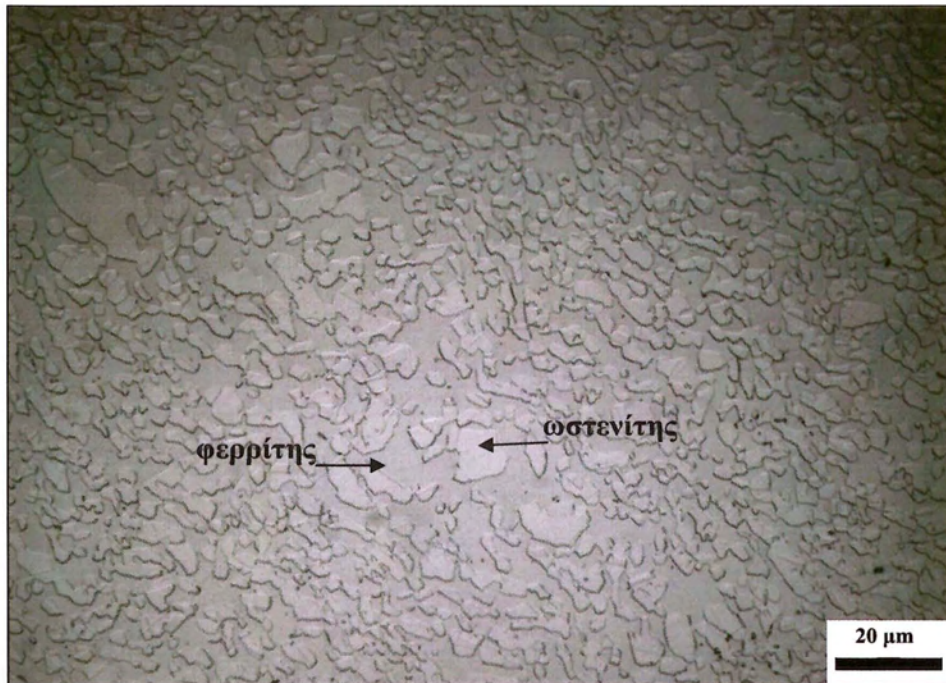
Μετρήθηκε το μήκος του pitting σε 85mm περίπου και εκτεινόταν περιμετρικά στο 60% περίπου του αυλού. Η διάμετρος των μικροσπών έφτανε μέχρι και τα 2,75mm (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Pitting Αυλού A2 (6,5x)

2.3.2 Μεταλλογραφικός έλεγχος

Το υλικό που μελετάμε είναι ένας ανοξείδωτος χάλυβας duplex, πρόκειται δηλαδή για φερρίτη bcc και ωστενίτη fcc. Οι δύο φάσεις βρίσκονται σε ίση ποσότητα περίπου στο υλικό, με τον φερρίτη να αποτελεί τη μήτρα (Εικόνα 2.7).



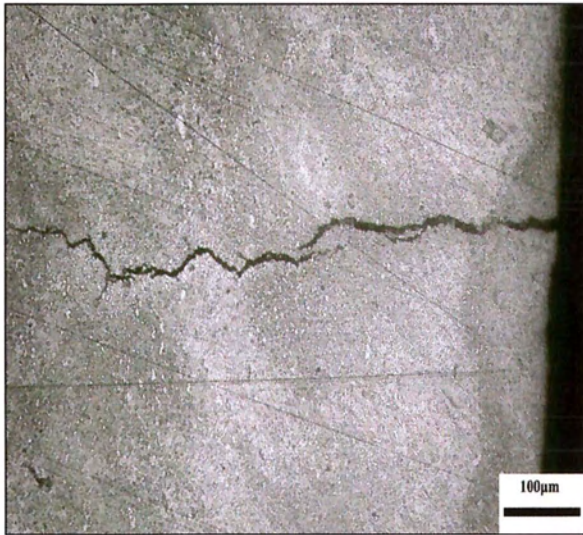
Εικόνα 2.7: Μικροδομή ανοξείδωτου χάλυβα Duplex (1000x)

- Αυλός A1

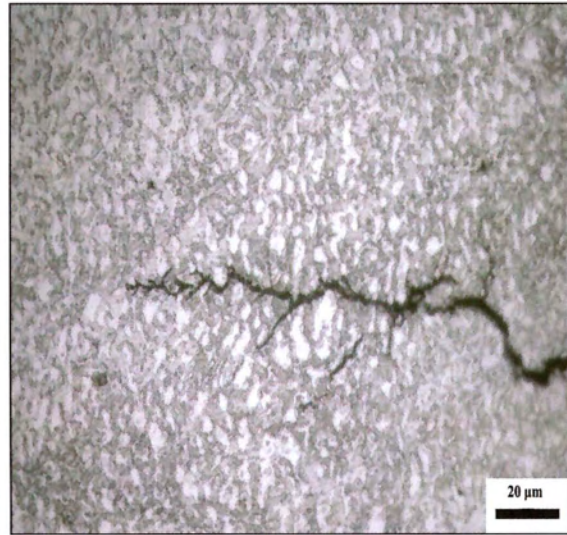
Ελήφθησαν δύο δοκίμια από τη ρωγμή X1 (τα X1_I και X1_II,) και ένα δοκίμιο από τη X2 (το X2_I), όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.2. Αφού έγινε χημική προσβολή με το αντιδραστήριο (50% HCl Acid – 25% Acetic – 25% HNO₃) ακολούθησε ο έλεγχος.

Το δοκίμιο X1_I τελικά δεν περιείχε τη ρωγμή και έτσι δεν μπορέσαμε να πάρουμε κάποια πληροφορία από τον μεταλλογραφικό έλεγχο.

Μελετώντας το δοκίμιο X1_II, διαπιστώσαμε ότι πρόκειται για μία ρωγμή που στο συγκεκριμένο σημείο διέσχιζε το 45% περίπου του πάχους του αυλού. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η διάδοση της ρωγμής γίνεται μέσα από την φερριτική φάση (Εικόνες 2.8 και 2.9). Η αρχή της ευρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια του αυλού και διαδίδεται προς το εσωτερικό του.

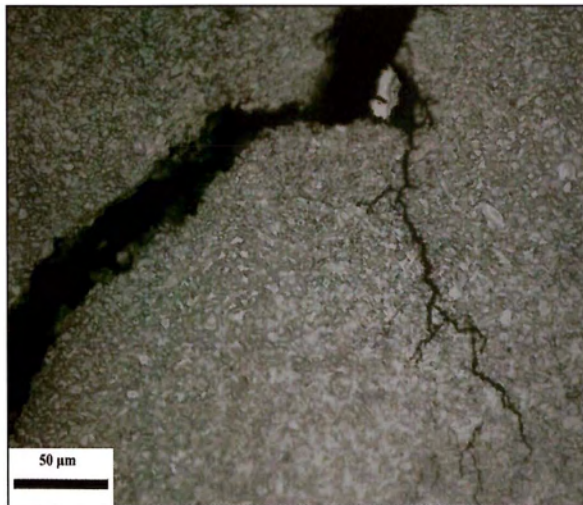


Εικόνα 2.8: Δοκίμιο X1_II (200x)

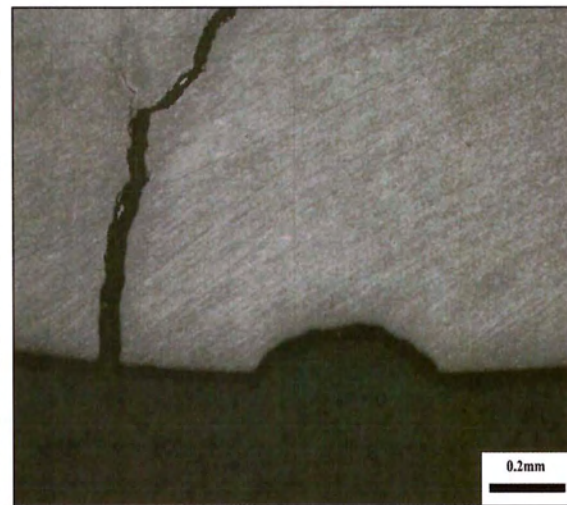


Εικόνα 2.9: Διάδοση ρωγμής X1 (1000x)

Μελετώντας το δοκίμιο X2_I έγινε εμφανές ότι πρόκειται για μία διαμπερή ρωγμή, η οποία εμφανίζει έντονες διακλαδώσεις (branching). Επίσης, κοντά στη ρωγμή διαπιστώθηκε και μία οπή από pitting, από τη βάση της οποίας ξεκινούν δύο μικρές ρωγμές (Εικόνες 2.10 και 2.11 αντίστοιχα).



Εικόνα 2.10: Διακλάδωση διαμπερούς ρωγμής X2_I (500x)

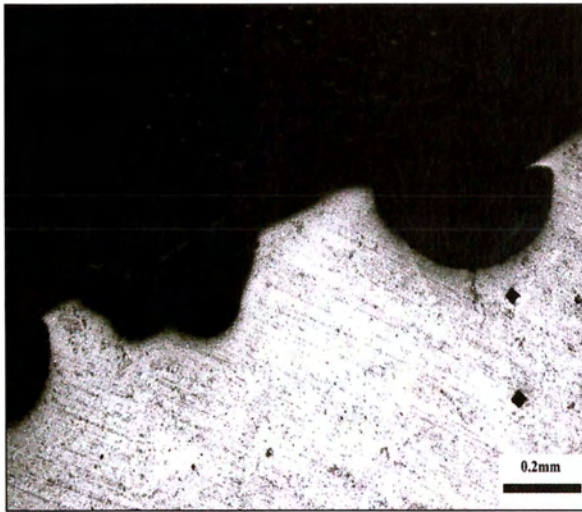


Εικόνα 2.11: Οπή pitting δίπλα στη ρωγμή X2 (100x)

- Αυλός A2

Ελήφθη ένα δοκίμιο σε εγκάρσια τομή και ένα δοκίμιο σε διαμήκη τομή. Από την εγκάρσια τομή διακρίναμε ότι η διάβρωση στο συγκεκριμένο σημείο έφτανε σε βάθος μέχρι

και στο 40% περίπου του πάχους του αυλού (Εικόνα 2.12). Παρατηρήθηκαν επίσης αρκετές μικρορωγμές σε όλη την περιφέρεια που εκτεινόταν το pitting, με τις περισσότερες από αυτές να ξεκινούν από τη βάση των οπών (Εικόνα 2.13).

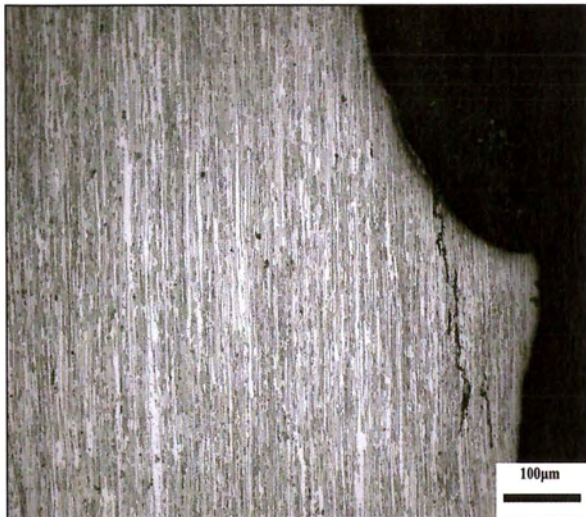


Εικόνα 2.12: Οπές pitting στην εγκάρσια τομή (100x)



Εικόνα 2.13: Μικρορωγμή στη βάση οπής (500x)

Από τη μελέτη της διαμήκουσ τομής, εκτός από τις οπές του pitting, παρατηρήθηκε και μία ρωγμή που διαδιδόταν κατά το διαμήκη άξονα του αυλού (Εικόνες 2.14 και 2.15).



Εικόνα 2.14: Ρωγμή κατά το διαμήκη άξονα (200x)

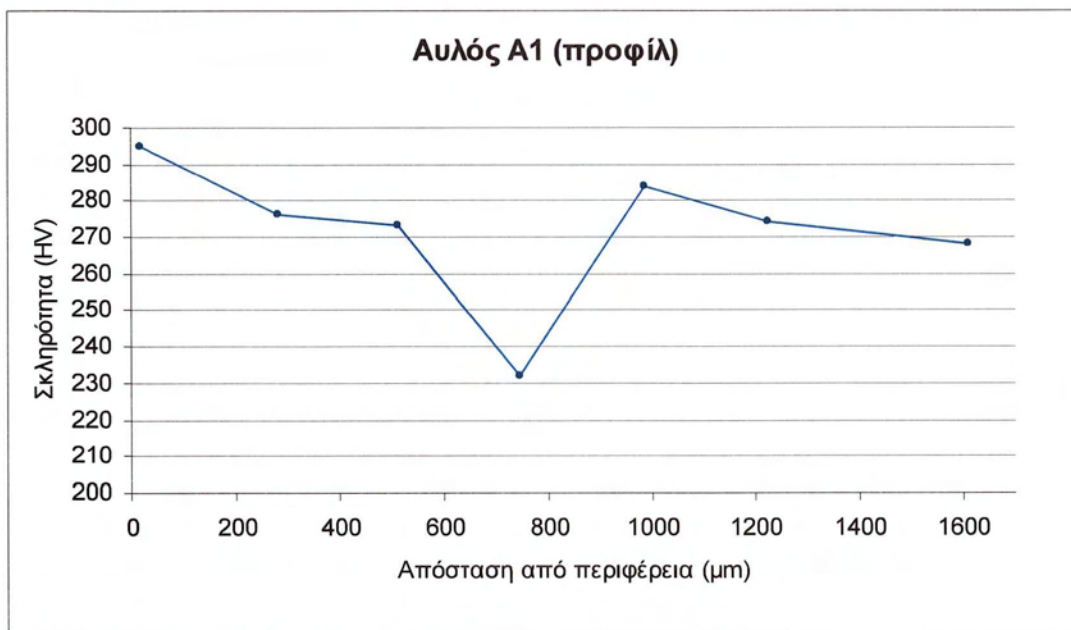


Εικόνα 2.15: Ρωγμή κατά το διαμήκη άξονα (1000x)

2.3.3 Μικροσκληρομέτρηση

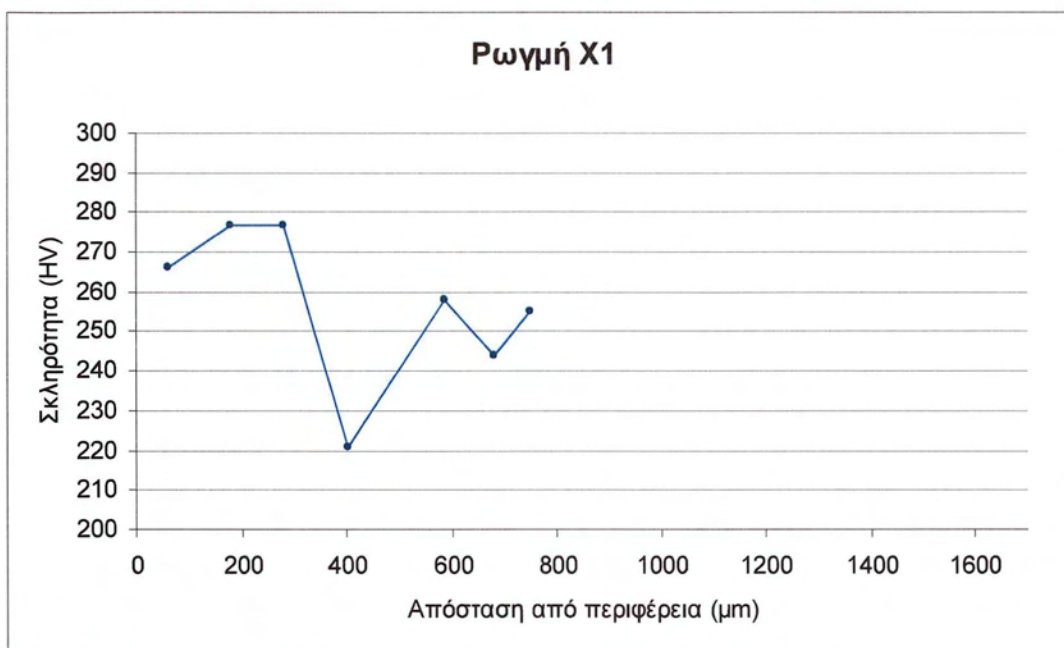
- Αυλός A1

Αρχικά έγιναν κάποιες μετρήσεις σε τυχαία θέση σε όλο το πάχος του αυλού για να πάρουμε μια γενική άποψη. Αν συμβουλευτούμε τον Πίνακα 4 με τις μηχανικές ιδιότητες που θα πρέπει να έχει το υλικό, όλες σχεδόν οι μετρήσεις ήταν σε ικανοποιητικά επίπεδα, κυμαίνονταν δηλαδή από 270 μέχρι 290 HV (Γράφημα 2.1).



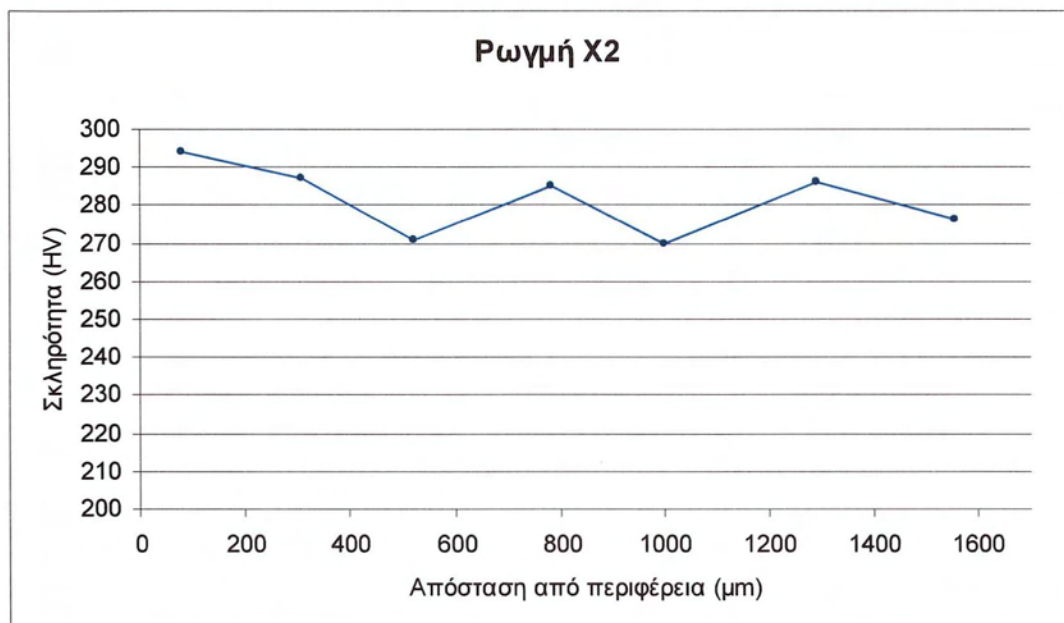
Γράφημα 2.1: Προφίλ σκληρότητας Αυλού A1

Έπειτα μετρήθηκε η σκληρότητα παράλληλα με τη ρωγμή στο δοκίμιο X1_II. Εκεί παρατηρήσαμε ότι οι μετρήσεις που κάναμε ήταν σε πιο χαμηλό επίπεδο κυμαίνονταν δηλαδή από 250 μέχρι 280 HV (Γράφημα 2.2).



Γράφημα 2.2: Σκληρότητα παράλληλα με τη ρωγμή X1

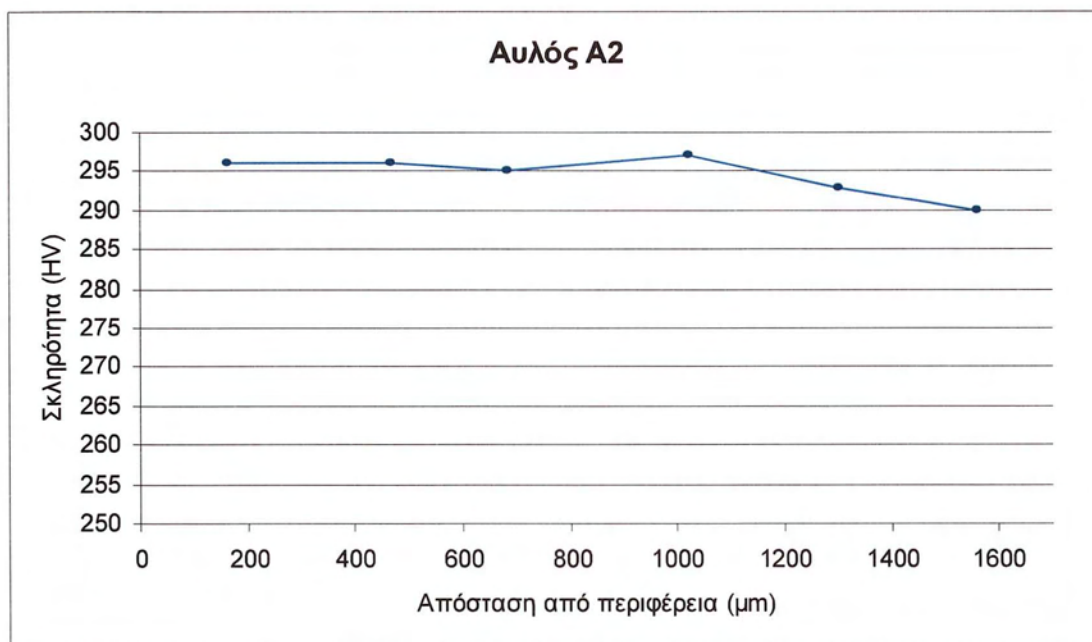
Όπως στην ρωγμή X1, έτσι και στην X2 μετρήθηκε η σκληρότητα παράλληλα, με βάση το δοκίμιο X2_I. Εκεί οι μετρήσεις μας δεν είχαν μεγάλες αποκλίσεις και κυμαίνονταν σε ομαλά επίπεδα, δηλαδή από 270 μέχρι 290 HV (Γράφημα 2.3).



Γράφημα 2.3: Σκληρότητα παράλληλα με τη ρωγμή X2

- Αυλός A2

Έγιναν και πάλι μετρήσεις σε τυχαίες θέσεις σε όλο το πάχος του αυλού για να δημιουργήσουμε το προφίλ του. Αυτή τη φορά οι μετρήσεις παρουσίασαν μικρή απόκλιση και κυμάνθηκαν από 290 έως 296 HV (Γράφημα 2.4).

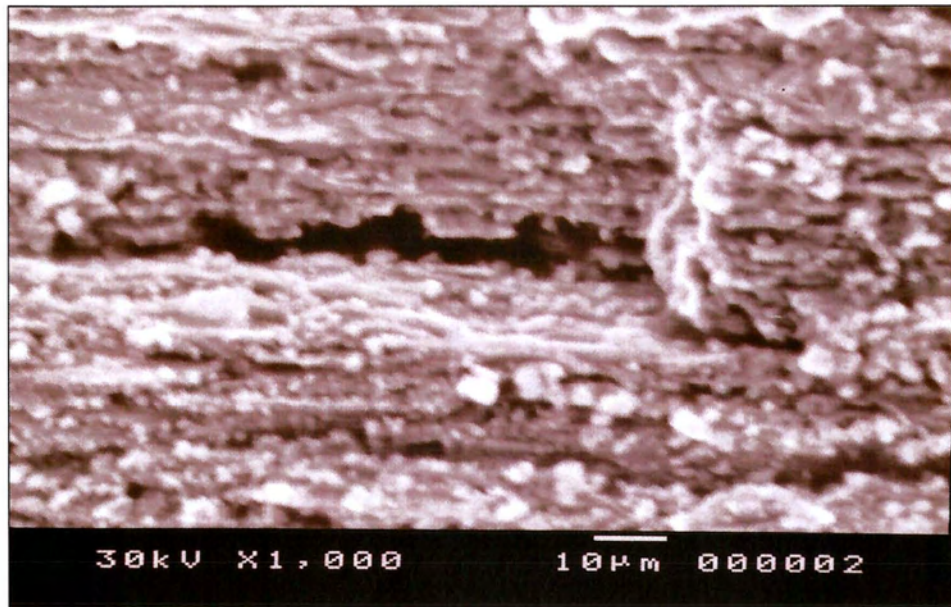


Γράφημα 2.4: Προφίλ σκληρότητας Αυλού A2

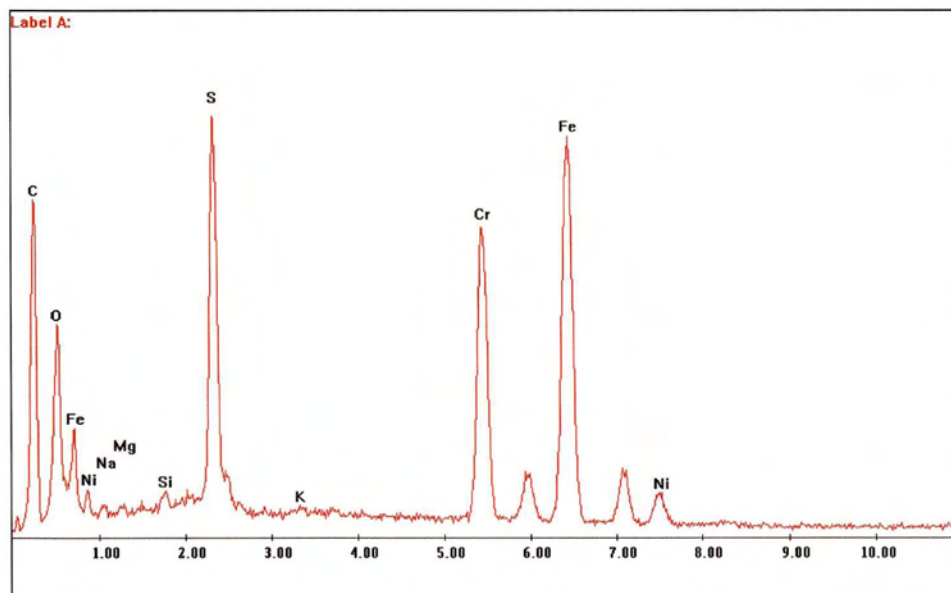
2.3.4 Χημική Ανάλυση

- Εσωτερικό ρωγμής X1

Τα σωματίδια που παρατηρήθηκαν στο εσωτερικό της ρωγμής X1 αναλύθηκαν με το EDX του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Η ανάλυση των σωματιδίων που παρατηρούνται στην Εικόνα 2.16 παρουσιάζεται στο Γράφημα 2.5. Πρόκειται για ενώσεις πλούσιες σε θείο (S) το οποίο προέρχεται από το περιβάλλον λειτουργίας.



Εικόνα 2.16: Επιφάνεια θραύσης. Διακρίνονται σωματίδια που προέρχονται από το περιβάλλον λειτουργίας της εξωτερικής πλευράς του αυλού.

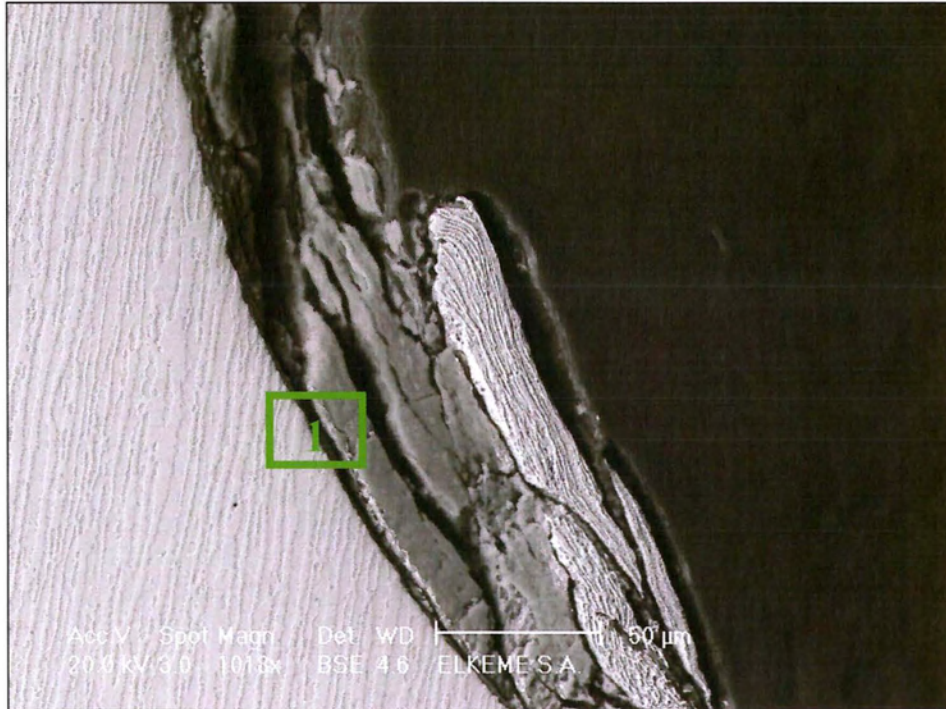


Γράφημα 2.5: Ανάλυση EDX σωματιδίων από το εσωτερικό της ρωγμής.

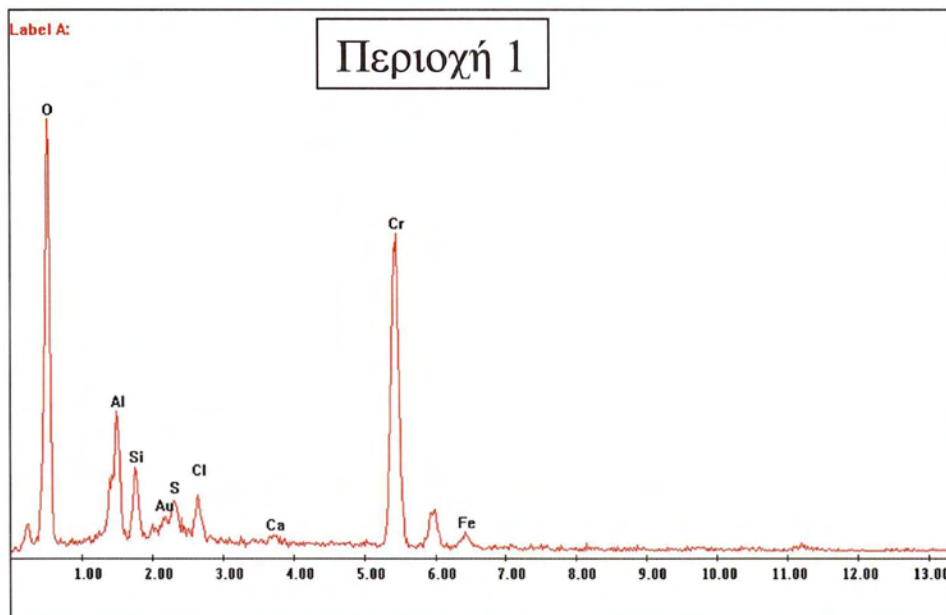
- Ανάλυση μεταλλογραφικών δοκιμίων

Αναλύθηκαν με το EDX του SEM οι επικαθίσεις που παρατηρήθηκαν στα pits (Εικόνα 2.17), καθώς και οι περιοχές στην όδευση της ρωγμής στο εσωτερικό του αυλού (Εικόνα

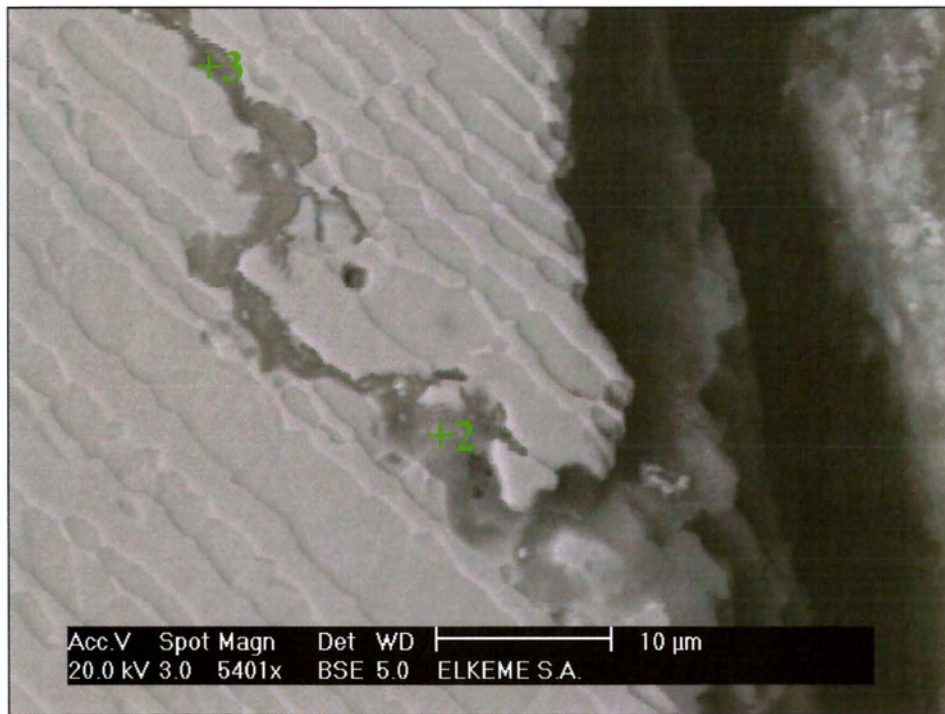
2.18). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Γραφήματα 2.6-2.8. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τις αναλύσεις εντοπίζεται τοπικά σημαντική παρουσία χλωρίου.



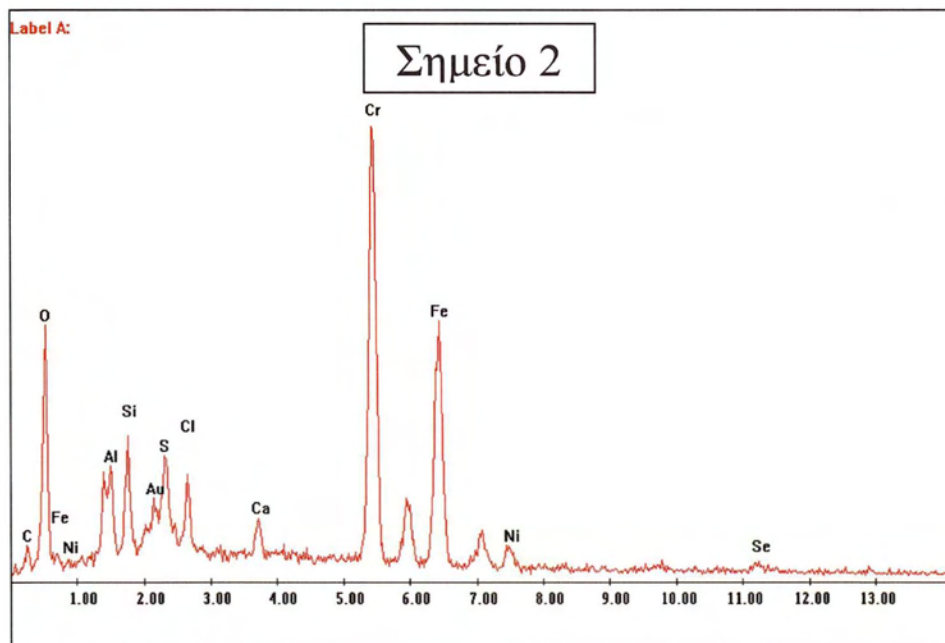
Εικόνα 2.17: Περιοχή ανάλυσης επικαθήσεων



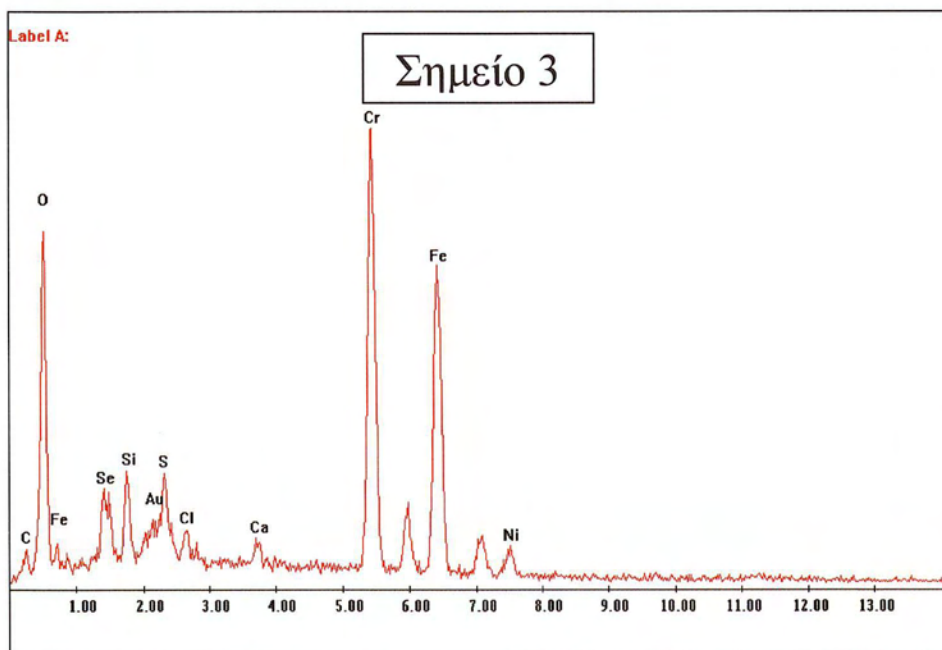
Γράφημα 2.6: Ανάλυση EDX σωματιδίων της περιοχής (1) της Εικόνας 16



Εικόνα 2.18: Σημεία ανάλυσης στην πορεία όδευσης της ρωγμής από την εξωτερική επιφάνεια προς το εσωτερικό του αυλού.



Γράφημα 2.7: Ανάλυση EDX σωματιδίων του σημείου (2) της Εικόνας 18



Γράφημα 2.8. Ανάλυση EDX σωματιδίων του σημείου (3) της Εικόνας 18

2.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, τα πιο πάνω αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

- Βρέθηκε έντονο και εντοπισμένο pitting στην εξωτερική επιφάνεια του αυλού.
- Σε πολλά pits ξεκινούν ρωγμές από τον πυθμένα τους
- Βρέθηκαν ρωγμές (μη διαμπερείς) καθώς και η διαμπερής ρωγμή, που ξεκινούν από την εξωτερική επιφάνεια των αυλών (shell-side)
 - Οι ρωγμές διαδίδονται κατά το πάχος του αυλού με συχνές διακλαδώσεις (branching)
 - Η όδευση των ρωγμών πραγματοποιείται μέσα από την φάση του φερρίτη στον χάλυβα duplex
 - Στις περισσότερες ρωγμές εντοπίστηκε χλώριο, που υποδηλώνει την δημιουργία μικροπεριβάλλοντος χλωριόντων. Το χλώριο πιθανόν να προέρχεται από το χλωριούχο αμμώνιο που εισέρχεται στον εναλλάκτη με το ρεύμα του Gas Oil.

Τα πιο πάνω στοιχεία οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός αστοχίας (ρηγματώση) είναι εργοδιάβρωση από χλωριόντα (Stress Corrosion Cracking / Chloride stress



cracking). Οι συγκεκριμένοι χάλυβες duplex έχουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε pitting και εργοδιάβρωση σε σχέση με τους κοινούς ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Παρ' όλα αυτά δεν είναι απρόσβλητοι. Σε περίπτωση που δημιουργηθεί το κατάλληλο μικροπεριβάλλον συγκέντρωσης χλωρίου ή/και στασιμότητα ροής (πιθανόν πίσω από τα baffle plates), τότε είναι δυνατόν να υποστούν pitting και εργοδιάβρωση.

2.5 Προτάσεις

Για την αποφυγή παρόμοιας αστοχίας στο μέλλον δεν θεωρείται σκόπιμη μία αλλαγή του υλικού. Οι ενέργειες πρέπει να στραφούν στον έλεγχο του εισερχόμενου ρεύματος, ούτως ώστε να περιοριστεί όσο είναι δυνατόν η παρουσία και συγκέντρωση χλωρίου στην επιφάνεια των αυλών. Σε περίπτωση συντήρησης συνιστάται προσεκτικό πλύσιμο με επεξεργασμένο (για μείωση χλωριόντων) νερό.

3. Αστοχία Αυλών Φούρνου Reformer

3.1 Εισαγωγή

Το Εργαστήριο Υλικών παρέλαβε από Ελληνικό Διυλιστήριο δύο αυλούς προερχόμενους από φούρνο reformer (Εικόνα 3.1) μονάδας παραγωγής υδρογόνου. Ο ένας ήταν αυτός που αστόχησε (Εικόνες 3.2 & 3.3) και ο άλλος ήταν ένας από τους υπόλοιπους που αλλαγήκανε προληπτικά. Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη του δεύτερου αυλού, ώστε να διαπιστωθεί εάν το πρόβλημα είχε αρχίσει να εμφανίζεται και στους υπόλοιπους, πέραν αυτού που αστόχησε.



Εικόνα 3.1: Φούρνος reformer (διακρίνονται οι αναρτημένοι αυλοί)

3.1.1 Σύντομη περιγραφή της μονάδας

Ο φούρνος του reformer περιέχει 40 αυλούς τοποθετημένους περιφερειακά. Οι αυλοί είναι κατασκευασμένοι από το υλικό Mnaurite 36X και είναι αναρτημένοι από μία σιδηροκατασκευή στην κορυφή του φούρνου ώστε να μπορούν να διαστέλλονται και να συστέλλονται ελεύθερα. Η εισαγωγή και η εξαγωγή των αερίων από τους αυλούς πραγματοποιείται μέσω εύκαμπτων pig tails από Incolloy 800HT. Οι αυλοί είναι γεμάτοι με καταλύτη νικελίου. Στο κάτω μέρος των αυλών εισέρχεται LPG με ατμό. Με την αντίδραση, παρουσία του καταλύτη, παράγεται υδρογόνο, το οποίο διαφεύγει από τα pig tails στο επάνω μέρος των αυλών. Στο τμήμα αυτό ο αυλός κλείνει με φλάντζα από απλό ανθρακοχάλυβα. Για την προστασία της φλάντζας υπάρχει ένας κύλινδρος που περιέχει μόνωση. Ο κύλινδρος καταλήγει σε ένα διάτρητο basket, που αποτρέπει την πρόσκρουση στερεών επάνω στον κύλινδρο με τη μόνωση.

3.1.2 Μηχανισμοί διάβρωσης στους αυλούς reformer

- Υπερθέρμανση

Είναι ευρέως γνωστό ότι ο κύριος μηχανισμός διάβρωσης, που μειώνει τη διάρκεια ζωής των αυλών, είναι ο ερπυσμός. Αυτό εμφανίζεται στα μέταλλα κάτω από πίεση σε υψηλές θερμοκρασίες και σχηματίζεται κατά τη λειτουργία. Εάν ακολουθούνται οι συνιστάμενες συνθήκες, ο ερπυσμός εμφανίζεται αργά για μία περίοδο περίπου 11 ετών (100.000 hr) ή περισσότερο. Εάν, εντούτοις, οι σωλήνες είναι υπερθερμασμένοι η ζωή τους θα επηρεαστεί. Αυτό δεν οδηγεί γενικά στην άμεση αστοχία αλλά θα οδηγήσει βεβαίως σε μια μείωση της ζωής. Ανάλογα με το βαθμό υπερθέρμανσης η μείωση μπορεί να είναι δραματική. Αυτό φαίνεται πολύ καλά από τα στοιχεία του Πίνακα 3.1, ο οποίος παρουσιάζει τη δραματική επίδραση της λογαριθμικής σχέσης μεταξύ της θερμοκρασίας και της διάρκειας ζωής.

Πίνακας 3.1. Μείωση στη διάρκεια ζωής με αύξηση της θερμοκρασίας
(για κράμα HP Nb Modified)

Θερμοκρασία (°C)	Διάρκεια ζωής
860	10 έτη
880	5 έτη
900	2,5 έτη
925	11 μήνες
950	4,5 μήνες
975	2 μήνες
1000	4 εβδομάδες
1050	5,5 μέρες
1100	1 μέρα
1150	8 ώρες
1200	2 ώρες

Μπορεί να φανεί ότι πολύ μικρή αύξηση στη θερμοκρασία των σωλήνων κατά τη διάρκεια μιας μακριάς χρονικής περιόδου είναι ικανή να μειώσει τη διάρκεια ζωής σημαντικά. Αυτό συχνά δεν εκτιμάται όταν αυξάνονται οι θερμοκρασίες για να διατηρήσουν τις παραγωγές όταν ο καταλύτης γίνεται λιγότερο ενεργός. Ωστόσο, η πολύ μεγαλύτερη επίδραση είναι οι γρήγορες αυξήσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια των αποτυχιών ανεφοδιασμού αερίου ή ατμού. Η απουσία της επίδρασης ψύξης της ενδοθερμικής αντίδρασης μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες που θα προκαλέσουν μια πολύ σύντομη θεωρητική διάρκεια ζωής. Στις θερμοκρασίες γύρω από 1235°C, εμφανίζεται η αρχική τήξη του εύτηκτου καρβιδίου και το υλικό γίνεται πλαστικό. Είναι επίσης σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι τα αποτελέσματα της υπερθέρμανσης είναι αθροιστικά. Εάν, εντούτοις, οι σωλήνες χρησιμοποιούνται κάτω από τους συνθήκες σχεδιασμού, η υπόλοιπη ζωή θα παραταθεί λόγω του πιο αργού ποσοστού ερπυσμού.

- Θερμική ανακύκλωση (Thermal Cycling)

Αυτό είναι ένας επιπλέον συμβάλλοντας παράγοντας στον επιταχυνόμενο ερπυσμό. Όταν οι σωλήνες θερμαίνονται και ψύχονται, οι πιέσεις αυξάνονται προσωρινά μέσω του

τοιχώματος και συνεπώς ένα ποσοστό της διάρκειας ζωής χάνεται. Οι κλίσεις της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων των αυλών μπορούν να είναι σημαντικές. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας η πίεση που παράγεται από τη διαφορετική διαστολή χαλαρώνει μέσω του ερπυσμού. Οι αλλαγές της θερμοκρασίας προς τα πάνω η κάτω θα επαναφέρουν κάποια πίεση.

- Κάμψη σωλήνων

Αυτό είναι άλλο ένα σχετικά κοινό πρόβλημα. Η θέρμανση στη θερμοκρασία λειτουργίας οδηγεί στη γραμμική διαστολή, η οποία πρέπει να προσαρμοστεί στο σχέδιο του φούρνου. Μερικά παλαιότερα σχέδια φούρνων είναι ευαίσθητα λόγω της ανεπαρκούς ή ανύπαρκτης τάσης από την κορυφή που οδηγεί σε ένα σημαντικό περιορισμό στη στέγη των φούρνων. Οι σύγχρονοι φούρνοι γενικά σχεδιάζονται πολύ καλύτερα. Με την τάση να κυμαίνεται περίπου στο 80% του βάρους των σωλήνων, ενισχύεται η κάθετη διαστολή χωρίς αδικαιολόγητα να αυξηθεί η πίεση. Σε μερικά σχέδια, ένα σύστημα ελατηρίων θα βοηθήσει να αποτραπεί η πίεση που δημιουργείται ως αποτέλεσμα της κάμψης.

- Θερμικό σοκ

Το θερμικό σοκ δημιουργεί εξαιρετικά μεγάλες τάσεις καθώς ο αυλός τείνει να συστέλεται κάτω από περιορισμό. Αυτό θα οδηγήσει σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις στην καταστροφή του σωλήνα. Αυτό έχει αποδειχθεί ότι εμφανίζεται μέσω του νερού του λέβητα στο εσωτερικό των καυτών σωλήνων ή μέσω των όμβριων υδάτων στο εξωτερικό επάνω από τη στέγη του φούρνου.

- Stress Corrosion Cracking

Μερικά σχέδια φούρνων που διαθέτουν ένα πιο ψυχρό νεκρό διάστημα στην κορυφή ή/και το κατώτατο σημείο των αυλών, μπορούν να είναι ευαίσθητα στο SCC. Εάν ο ατμός καταφέρνει να συμπυκνώνεται και να επανα-εξατμίζεται σε αυτές τις περιοχές, μπορεί να υπάρξει σημαντική ποσότητα ακαθαρσιών που συγκεντρώνονται από την εξάτμιση. Αυτό

μπορεί να είναι ιδιαίτερα σοβαρό στα σχέδια που έχουν δύστηκτο κεραμικό υλικό σε επαφή με τον ατμό.

3.1.3 Βελτιωμένα κράματα για κατασκευή αυλών reformer

Δεδομένου ότι η κατασκευή των αυλών του καταλύτη μπορεί να ανέλθει σε 25% του συνολικού κόστους του φούρνου, υπάρχει ένα μεγάλο κίνητρο για τη βελτιστοποίηση του σχεδίου χημικά. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις στην ικανοποίηση των διαδικαστικών και των λειτουργικών απαιτήσεων. Μια από τις πιο σημαντικές βελτιώσεις στο κόστος των reformer είναι η αυξανόμενη εφαρμογή των ισχυρότερων υλικών σωλήνων, όπως τα κράματα HP-Mod. Στα νέα σχέδια των reformer, τα κράματα HP-Mod έχουν επιτρέψει την αύξηση του μεγέθους των αυλών reformer, ιδιαίτερα εκείνων που σχεδιάζονται για τη διαδικασία υψηλής πίεσης της αμμωνίας. Με το κράμα HK-40 η διάμετρος των σωλήνων reformer περιοριζόταν από το πάχος των τοιχωμάτων των σωλήνων. Οι υπερβολικά παχιοί σωλήνες είναι υπεύθυνοι για την επιταχυνόμενη εμφάνιση ερπυσμού, ως αποτέλεσμα των μεγάλων διαφορών θερμοκρασίας κατά μήκος του τοιχώματος. Η χρήση HP-40 Mod Nb έχει επιτρέψει στον εσωτερικό όγκο των σωλήνων να αυξηθεί εντυπωσιακά, χωρίς αύξηση στο πάχος των τοιχωμάτων, προκαλώντας αύξηση χωρητικότητας κατά 30% σε 40% για τον ίδιο αριθμό σωλήνων, με οριακά υψηλότερο κόστος.

Βασικά, τα κράματα που χρησιμοποιούνται λόγω υψηλής θερμοκρασίας στηρίζονται στην αύξηση της αντοχής στον ερπυσμό από το σχηματισμό των καρβιδίων στη μικροδομή. Υπάρχουν δύο κύριες μορφές καρβιδίων:

- Πρωτογενή καρβίδια, τα οποία διαμορφώνονται στα σύνορα των κόκκων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης.
- Δευτερογενή καρβίδια, τα οποία καθιζάνουν στο εσωτερικό των κόκκων κατά τη λειτουργία.

Τα δευτερογενή καρβίδια είναι οι κύριοι συνεισφέροντες στην αντοχή ερπυσμού. Από τις πρώτες ώρες λειτουργίας, η μικροδομή των νέων αυλών θα αλλάξει, καθώς δευτερογενή καρβίδια καθιζάνουν μέσα στους ωστενιτικούς κόκκους (μια διαδικασία γνωστή ως "γήρανση"). Κάθε μικρό μόριο καρβιδίου ενεργεί ως εμπόδιο για να αποτρέψει τη διάδοση του ερπυσμού μέσω της μικροδομής. Επομένως, όσο πιο ομοιόμορφη είναι αυτή η διασπορά

των δευτερογενών καρβιδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή στον ερπυσμό. Καθώς ο χρόνος λειτουργίας ή/και οι θερμοκρασίες λειτουργίας αυξάνονται, τα δευτερογενή καρβίδια διασκορπίζονται και αυξάνουν το μέγεθός τους. Με την απώλεια δευτερογενών καρβιδίων από τη μήτρα ωστενίτη, η αντοχή ερπυσμού μειώνεται.

Ενώ αυτή η απώλεια δευτερογενών καρβιδίων εμφανίζεται αργά στις κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας (κάτω από 950° C (1742° F)), εμφανίζεται ταχύτερα στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια η υπερθέρμανση για μόλις έναν σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί να είναι καταστρεπτική για τη διάρκεια ζωής των αυλών. Αυτή η ευαισθησία στην υπερθέρμανση είναι πιο κοινή με του παλαιότερους τύπους κραμάτων, όπως το 'HK 40'. Η ανάπτυξη των κραμάτων επομένως έχει συγκεντρωθεί στην παραγωγή κραμάτων που έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στην απώλεια δευτεροβάθμιων καρβιδίων. Η προσθήκη κραματικών στοιχείων, όπως το νικέλιο και το νιόβιο, εξασφαλίζουν ότι τα δευτεροβάθμια καρβίδια θα είναι λεπτότερα και σταθερότερα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στις υψηλές θερμοκρασίες και θα έχουν έτσι μεγαλύτερη αντοχή ερπυσμού από το απλούστερο, Nb-free 'HK 40' που ήταν το πρώτο που αναπτύχθηκε 40 έτη πριν.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η βελτιωμένη μεταλλουργία των νέων κραμάτων επιτρέπει στους φούρνους reformer να λειτουργούν σε όλο και υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας, πίεσης και ροής θερμότητας. Γενικά, τα πλεονεκτήματα χρήσης ενός τέτοιου κράματος (όπως το HP-40 Mod Nb) είναι:

- Χαμηλότερες θερμοκρασίες αυλών στην εξωτερική τους επιφάνεια
- Λεπτότερα τοιχώματα αυλών
- Χαμηλότερες θερμικές τάσεις
- Αποδοτικότερη χρήση καυσίμων

Αυτό είναι επειδή το υλικό υψηλότερης αντοχής απαιτεί ένα μικρότερο ελάχιστο πάχος τοιχωμάτων για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Το πάχος των τοιχωμάτων των αυλών υπολογίζεται κανονικά χρησιμοποιώντας το τυποποιημένο πρότυπο σχεδιασμού API RP530. Αυτό συστήνει ότι η επιτρεπόμενη πίεση πρέπει να είναι η στατιστικά ελάχιστη πίεση (η χαμηλότερη γραμμή της κανονικής ζώνης διασποράς). Αφού είναι γνωστή η θερμοκρασία σχεδίου, είναι δυνατό να καθοριστεί η μέση πίεση για λειτουργία 100.000 ωρών σε αυτή τη θερμοκρασία. Μερικοί μηχανικοί θα χρησιμοποιήσουν ένα ποσοστό της μέσης πίεσης (π.χ. 80% της μέσης τιμής) ως επιτρεπόμενη πίεση. Ωστόσο, αυτή η ταυτόχρονη μελέτη των τριών

τιμών θερμοκρασία - τάση - διάρκεια ζωής, είναι ένα σύνθετο θέμα και συνήθως χρησιμοποιείται η στατιστική μελέτη βασισμένη στα συμπεράσματα που εξάγονται από την τεχνική των Larson-Miller, με τη βοήθεια υπολογιστή για να δώσει την πραγματική ελάχιστη τιμή του τοιχώματος.

Ο καθορισμός της θερμοκρασίας είναι σημαντικός. Η θερμοκρασία αερίου είναι η κανονική βάση για τον έλεγχο της διαδικασίας (καταλύτη και πρώτης ύλης). Ωστόσο η βάση για την απόδοση του σχεδίου των αυλών είναι η θερμοκρασία στην εξωτερική τους επιφάνεια. Όσο πιο θερμός είναι ο αυλός, τόσο χαμηλότερη είναι η αντοχή στο ερπυσμό και αντίστροφα. Αυτό μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το πάχος των σωλήνων και τη λειτουργία του φούρνου. Στην πράξη, η ζωή του σωλήνα δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία στην επιφάνεια αλλά και από τις πιέσεις που ασκούνται σε αυτόν.

Η σημαντικότερη ιδιότητα ενός κράματος αυλών reformer είναι η 100.000 ωρών αντοχή ερπυσμού που ορίζεται ως 'Η πίεση που μπορεί να αντέξει το κράμα για μια διάρκεια ζωής 100.000 ωρών στη θερμοκρασία σχεδίου πριν την αστοχία ερπυσμού'. Δεδομένου ότι έχουν αναπτυχθεί ισχυρότερα κράματα, η 100.000 ωρών αντοχή ερπυσμού έχει οδηγηθεί σε πολύ μεγάλη αύξηση.

3.1.4 Αξιολόγηση κατάστασης & πρόβλεψη ζωής αυλών reformer

Οι προβλέψεις αξιολόγησης και διάρκειας ζωής των σωλήνων reformer υδρογόνου απαιτούν συγκεκριμένη επιθεώρηση και υπολογισμούς πολλών παραμέτρων για να παρέχουν στους χειριστές των εγκαταστάσεων ρεαλιστικά στοιχεία. Μια σειρά μη καταστρεπτικών ελέγχων χρησιμοποιείται για να καθορίσει την κατάσταση των σωλήνων. Αυτά τα αποτελέσματα συνδυάζονται με μια σειρά αιτιοκρατικών υπολογισμών και μετρήσιμων στοιχείων για την πρόβλεψη της υπολειπόμενης ζωής.

Οι σωλήνες των reformer που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες καθαρισμού, πετροχημικών και λιπάσματος κατασκευάζονται με τη φυγοκεντρική διαδικασία χύτευσης και από ανθεκτικά στη θερμότητα ωστενιτικά κράματα όπως το HK-40, το HP-40, και τα HP-Nb Mod. Μια πρόβλεψη της διάρκειας ζωής για 100.000 ώρες λειτουργίας, είναι το φυσιολογικό χρονικό κριτήριο για την εξέταση της απόσυρσης των σωλήνων. Πολλοί χειριστές φούρνων έχουν τέτοιες απαιτήσεις σωλήνων για να αλλάξουν τη φιλοσοφία συντήρησής τους από αξιολόγηση βασισμένη στο χρόνο, σε αξιολόγηση βασισμένη στις συνθήκες. Με κόστος

αρκετών χιλιάδων Ευρώ ανά σωλήνα και με την αντικατάστασή τους να στοιχίζει 1-4 εκ. €, ένα σημαντικό ποσό κεφαλαίου μπορεί να καταβληθεί αθέλητα εάν οι σωλήνες αποσυρθούν είτε πάρα πολύ νωρίς είτε πάρα πολύ αργά.

Η μεταλλουργική εξέταση των σωλήνων που αφαιρούνται από τη λειτουργία, έχει δείξει χαρακτηριστικά τη συσσώρευση καρβιδίων, αλλά κανένας διακριτός ερπυσμός δεν δημιουργεί κενά ή σχισμές. Αυτό παρέχει την ευκαιρία να βελτιωθεί ο κύκλος ζωής των φούρνων reformer από την επέκταση της διάρκειας ζωής των σωλήνων, χρησιμοποιώντας κριτήρια βασισμένα στις συνθήκες. Από το να αφαιρεθούν οι σωλήνες από τη λειτουργία για τον τεμαχισμό και τη μεταλλουργική εξέταση σε κάθε συντήρηση των εγκαταστάσεων, είναι συμφέρον να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές μη-καταστρεπτικού ελέγχου - NDE (Non-Destructive Examinations) για την εξέταση της κατάστασης των σωλήνων. Τα δεδομένα λειτουργίας που απαιτούνται για τον υπολογισμό της κατάστασης των σωλήνων μέσω ανάλυσης δεν είναι συνήθως διαθέσιμα. Ο κατάλληλος προσδιορισμός της κατάστασης των σωλήνων και της τελικής διάρκειας ζωής του, απαιτεί συγκεκριμένες τοπικές εξετάσεις. Τα μειονεκτήματα της αφαίρεσης των σωλήνων από τη λειτουργία σε μια δειγματοληψία για να καθοριστεί η ακεραιότητά τους, περιλαμβάνουν:

- αφαίρεση καταλυτών
- πρόωρη απόσυρση λειτουργικών ακόμα σωλήνων
- καθυστερημένη αφαίρεση μη-λειτουργικών σωλήνων
- δαπάνες συντήρησης.

Εντούτοις, η κατάσταση του δείγματος του σωλήνα μπορεί να είναι αντιπροσωπευτική του συνολικού αριθμού σωλήνων στο φούρνο αλλά μπορεί και όχι. Μια διαδικασία που βρίσκεται σε λειτουργία, για να αλλάξει από μία φιλοσοφία βασισμένη στο χρόνο σε μία βασισμένη στις συνθήκες, απαιτεί την εμπιστοσύνη στις μεθόδους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την κατάσταση των σωλήνων. Η εξαγωγή των σωλήνων σε μια συντήρηση που γίνεται κοντά στο τέλος διάρκειας ζωής του σχεδίου τους και η υποβολή τους σε μεταλλουργική έρευνα θα ήταν αρκετά καλή πρακτική. Μερικές εγκαταστάσεις έχουν υιοθετήσει επίσης τη χρήση ορισμένων τεχνικών NDE για να εκτιμούν τις αλλαγές στους σωλήνες. Η τεχνική που χρησιμοποιείται στην πράξη εξαρτάται άμεσα από τα εξής:

- κόστος

- προτιμήσεις μεμονωμένων εγκαταστάσεων (περιορισμένη γνώση τεχνολογιών)
- ιστορική εμπειρία στη συγκεκριμένη θέση
- διαθεσιμότητα των αναλυθέντων στοιχείων από τις δοκιμές αυλών reformer
- γνώση των διαφορετικών τεχνολογιών NDE (δυνατότητες και αδυναμίες)
- διαθεσιμότητα των ειδικών υπηρεσιών

Για να μειωθούν τα περιστατικά αφαίρεσης σωλήνων φούρνων με αξιολόγηση βασισμένη στις συνθήκες και για να βελτιωθεί η γενική αξιοπιστία της ζωής των σωλήνων, η χρήση των τεχνικών NDE σε κανονική βάση κατά τη διάρκεια των συντηρήσεων των φούρνων reformer είναι ευεργετική. Η κατάσταση ενός σωλήνα reformer προκύπτει από την αντίδραση ενός NDE αισθητήρα σε μια αλλαγή στις ιδιότητες του υλικού. Υπό αυτήν τη μορφή, υπάρχουν ορισμένα όρια στον εντοπισμό, την ταξινόμηση και το χαρακτηρισμό των ρωγμών που εξαρτώνται άμεσα από τα γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος δοκιμής, που αποτελούνται από το περιβάλλον, τον εξοπλισμό, τον αισθητήρα, το υλικό υπό δοκιμή και φυσικά το χειριστή.

Μη καταστρεπτικές τεχνικές αξιολόγησης κατάστασης

Ο κατάσταση των σωλήνων reformer μπορεί να προκύψει τοπικά από την ποιοτική NDE αξιολόγηση, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες τεχνικές:

- Διαμετρική αύξηση (η διάμετρος αλλάζει με τον ερπυσμό σε μερικές περιπτώσεις)
- Μέτρηση πάχους τοιχωμάτων (προφανής μείωση στο πάχος των τοιχωμάτων με τον ερπυσμό)
- Μεταλλογραφία Ρέπλικας (τελικά στάδια της ζημίας ερπυσμού, δηλαδή μακρο-ρωγμές)
- Ραδιογραφία (τελικά στάδια της ζημίας ερπυσμού, δηλαδή μακρο-ρωγμές)
- Ρεύμα Αυτεπαγωγής - Eddy Current (αποκρίνεται στη μετακίνηση χρωμίου λόγω της υπερθέρμανσης και των αλλαγών αγωγιμότητας)
- Υπέρηχοι (αποκρίνεται στη μείωση και τη διασπορά)

Συνδυασμός NDE τεχνικών & 'H' SCAN Ό τεχνολογίας

Η ανασκόπηση των NDE τεχνικών που αναφέρονται παραπάνω επεξηγεί μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που συνδέονται με κάθε μεμονωμένη τεχνική. Εκτενείς δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί για να καθορίσουν την ισχύ και τη βελτιστοποίηση των διάφορων τεχνικών. Συμπεραίνεται ότι καμία τεχνική δε μπορεί σε όλες τις περιπτώσεις να παρέχει αυτόνομες πληροφορίες που θα επιτρέψουν την πλήρη ποσοτική αξιολόγηση της κατάστασης των σωλήνων. Είναι επομένως συνετό να συνδυαστούν οι NDE τεχνικές για να βελτιωθεί η γενικότερη αξιοπιστία της αξιολόγησης κατάστασης των αυλών reformer. Ο βέλτιστος συνδυασμός τεχνικών NDE εξαρτάται από τα εξής:

- τύπο υλικού
- τύπο πιθανής ζημίας
- κατάσταση επιφάνειας του υλικού
- επιτρεπόμενο χρονικό πλαίσιο για την ανάλυση των δεδομένων
- κόστος

Το κοινό στοιχείο στη λήψη των NDE δεδομένων είναι η χρήση ενός μηχανισμού μεταφοράς που διαπερνά το μήκος ενός σωλήνα. Οι ακόλουθοι αισθητήρες NDE μπορούν να φορτωθούν επάνω σε έναν τέτοιο μηχανισμό μεταφοράς για την ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων:

- Υπερήχων (μείωση, διασπορά και πάχος τοίχων)
- Eddy Current
- Μέτρησης Προφίλ (Profilometry)

Διαρκεί περίπου 1 ώρα για να στηθεί ένα τέτοιο σύστημα on-site και 2-4 λεπτά ανά σωλήνα για τη συλλογή των δεδομένων και για να γίνει μια προσωρινή εκτίμηση της κατάστασης. Οι ειδικοί αξιολογούν κάθε σωλήνα και ορίζουν έναν βαθμό ζημίας για κάθε σωλήνα. ο οποίος καθορίζεται στο χειρότερο τμήμα του. Αυτοί οι βαθμοί ορίζονται με βάση τη σύγκριση κάθε σωλήνα με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από δείγματα που υποβάλλονται σε μεταλλογραφία στο εργαστήριο.

Πρόβλεψη χρόνου ζωής σωλήνων

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές μέθοδοι για να προβλέψουν τη διάρκεια ζωής σε ερπυσμό των αυλών reformer. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για την πρόβλεψη αυτή είναι βασισμένη στον υπολογισμό της πίεσης χρησιμοποιώντας έναν απλό τύπο και στον χαρακτηρισμό των δεδομένων τάσης αστοχίας των υλικών χρησιμοποιώντας μια παράμετρο χρόνου-θερμοκρασίας. Προηγμένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται μερικές φορές για να προβλέψουν τη διάρκεια ζωής των σωλήνων. Χρησιμοποιείται επίσης ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και λεπτομερή μοντελοποίηση του υλικού που έχει υποστεί ερπυσμό αλλά και της συμπεριφοράς μεταξύ πίεση-ρήξης. Η πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη των προηγμένων τεχνικών είναι το πρόγραμμα υπολογιστών rcTUBE™ που αναπτύχθηκε ειδικά για την πρόβλεψη διάρκειας ζωής σε ερπυσμό αυλών reformer.

Συμπερασματικά

Η κατάσταση των αυλών δεν μπορεί να καθοριστεί από μια αυτόνομη τεχνική, δεδομένου ότι ο βαθμός της ζημίας μέσα σε έναν σωλήνα μπορεί να μην αποκαλυφθεί με κάποια συγκεκριμένη NDE τεχνική. Η αξιοπιστία της NDE αξιολόγησης της κατάστασης των αυλών φούρνων reformer μπορεί να βελτιωθεί με το συνδυασμό ποικίλων προηγμένων NDE τεχνικών ('H' SCAN Ò Technology) οι οποίες ελέγχουν χωριστά διαφορετικές φυσικές παραμέτρους. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τεχνικής, όταν λειτουργούν το ένα ενάντια στο άλλο, μειώνουν τα λανθασμένα αποτελέσματα, βελτιώνουν την αξιολόγηση της κατάστασης των σωλήνων και μπορούν να αυξήσουν τη γενικότερη αξιοπιστία των φούρνων.

Η διάρκεια ζωής των αυλών που έχει προβλεφθεί χρησιμοποιώντας τις απλές μεθόδους σχεδιασμού δεν απεικονίζει την πραγματική διάρκεια λειτουργίας. Τα εξειδικευμένα πρότυπα ανάλυσης πίεσης και πρόβλεψης ζωής, όπως το λογισμικό rcTUBE™, παρέχουν ρεαλιστικές προβλέψεις για τη διάρκεια ζωής λειτουργίας. Αυτά τα εξειδικευμένα πρότυπα δεν είναι κατάλληλα για τον υπολογισμό της κατάστασης των σωλήνων εν λειτουργία, εκτός αν οι συνθήκες λειτουργίας του παρελθόντος είναι πολύ καλά γνωστές, το οποίο τυπικά δε συμβαίνει.

3.1.5 Περιγραφή της αστοχίας

Μετά από προγραμματισμένο σταμάτημα για επισκευή στηριγμάτων γραμμής εξόδου του φούρνου Παραγωγής Υδρογόνου (Steam Reformer), η Μονάδα βρισκόταν σε φάση κανονική λειτουργίας. Την 29/3/2006 έγινε προγραμματισμένη επιθεώρηση με θερμογραφία του φούρνου. Οι θερμοκρασίες στην κορυφή των αυλών ήταν αποδεκτές (<900 °C). Στην συνέχεια και κατά την οπτική επιθεώρηση στην γραμμή εξόδου (outlet ring) παρατηρήθηκε τοπικά διαρροή στον αυλό No.19 στο τμήμα αυτού εκτός του φούρνου (Εικόνα 3.2). Η διαρροή έγινε αντιληπτή από ελαφρό συριγμό αλλά και από την τοπική καταστροφή της μόνωσης στην περιοχή της διαρροής.

Οι συνθήκες λειτουργίας κατά την φάση του συμβάντος είναι:

- θερμοκρασία λειτουργίας (process): 815°C
- πίεση λειτουργίας (process): 24,5Kg/cm²
- θερμοκρασία αυλού (skin temperature) στην κορυφή του αυλού: 876°C

Άμεσα ξεκίνησε η διαδικασία κράτησης της Μονάδας Παραγωγής Υδρογόνου, η οποία περιλαμβάνει τα εξής:

1. Μείωση θερμοκρασίας με ρυθμό 40 °C/hr
2. Διακοπή τροφοδοσίας LPG στους 750 °C, με συνέπεια την πτώση πίεσης της μονάδας σταδιακά στα 2 Kg/cm².
3. Συνέχιση της μείωσης της θερμοκρασίας με ρυθμό 40 °C/hr έως τους 440 °C.
4. Διακοπή ατμού, και συνέχιση της ψύξης με ανακυκλοφορία αζώτου με τον ίδιο ρυθμό, έως την τελική ψύξη.

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος με διεισδυτικά υγρά για τον εντοπισμό της ρωγμής που προκάλεσε την διαρροή (Εικόνα 3.3). Διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για μία ρωγμή με προσανατολισμό κάθετο στον άξονα του αυλού. Αργότερα ανιχνεύτηκε και μία δεύτερη μη διαμπερής ρωγμή 3 cm υψηλότερα από την πρώτη ρωγμή. Πριν την κοπή του τμήματος του αυλού για περαιτέρω ανάλυση της αστοχίας πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφία ρέπλικας σε διάφορες θέσεις επί του αυλού και επί του pig tail για μία αρχική αξιολόγηση της μικροδομής του υλικού.

Αναφορικά με τις κρατήσεις στην περίοδο λειτουργίας της Μονάδας ισχύουν τα εξής:

- Ημερομηνία εκκίνησης Μονάδας: 1990
- Προγραμματισμένα shut down: 19
- Μη προγραμματισμένα shut down λόγω power failures: τουλάχιστον 20 την τελευταία 5ετία
- Εκτιμώμενος συνολικός χρόνος λειτουργίας αυλών: ~96.000 ώρες



Εικόνα 3.2: Διαρροή από τον αυλό που αστόχησε



Εικόνα 3.3: Έλεγχος αυλού με διεισδυτικά υγρά

3.1.6 Μεταβλητές λειτουργίας

- Θερμοκρασία εισόδου

Η θερμοκρασία εισόδου είναι μεταξύ 607°C (σε περίπτωση τροφοδοσίας φυσικού αερίου) και 650°C σε περίπτωση τροφοδοσίας νάφθας ή LPG. Υψηλότερες θερμοκρασίες πρέπει να αποφευχθούν δεδομένου ότι αυξάνουν το ποσοστό θερμικής διάσπασης στην είσοδο και περιορίζονται από το μηχανικό σχεδιασμό της εισόδου. Λογικά η χαμηλότερη θερμοκρασία θα αυξήσει το θερμικό καθήκον στον αναμορφωτή, συνεπώς η ροή της θερμότητας και οι θερμοκρασίες των καταλυτικών τουμπών (tube skin temp) θα αυξηθούν επάνω από τις κανονικές τιμές τους.

- Θερμοκρασία εξόδου

Η κανονική θερμοκρασία εξόδου είναι 875°C . Υψηλότερες θερμοκρασίες θα αυξήσουν τη μετατροπή των υδρογονανθράκων, καθώς επίσης και τη θερμοκρασία tube skin, με συνέπεια πιο σύντομη διάρκεια ζωής των τουμπών.

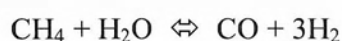
Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, η μετατροπή υδρογονανθράκων μειώνεται και έτσι λιγότερο υδρογόνο ανά κιλό υδρογονάνθρακα παράγεται και η λειτουργία είναι λιγότερο οικονομικά συμφέρουσα. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες θα αυξήσουν επίσης το ποσοστό ροής μεθανίου προς την μονάδα PSA. Χαμηλότερες από την κανονική θερμοκρασίες εξόδου είναι δυνατές, αλλά σε μειωμένη τροφοδοσία ή απόδοση. Η ελάχιστη θερμοκρασία εξόδου πρέπει να κρατηθεί υψηλότερη από 750° C.

Συγκρίσιμα στοιχεία πρέπει να ληφθούν σε κανονική βάση στην ίδια ροή τροφοδοσίας κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία εξόδου αναλογίας και την αναλογία ατμού – υδρογονανθράκων.

Με τη σύγκριση της περιεκτικότητας σε μεθάνιο στο ρεύμα εξόδου του αναμορφωτή είναι δυνατό να αξιολογήσει κανείς την γήρανση του καταλύτη. Το θερμικό καθήκον του αναμορφωτή είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας εισόδου καθώς και εξόδου, της πίεσης και της σύστασης. Ο ρυθμός της αντίδρασης είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών του καταλύτη.

Μια χρήσιμη προσέγγιση είναι να αξιολογηθεί η πρόοδος της αντίδρασης συγκρινόμενη με αυτή της χημικής ισορροπίας, προκειμένου να υπάρξει μια εκτίμηση της απόστασης από την καλύτερη δυνατή σύσταση εξόδου στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Ο φούρνος αναμόρφωσης σχεδιάζεται θεωρώντας 11° C απόσταση από την ισορροπία της ακόλουθης αντίδρασης:



Τα παραπάνω υιοθετούνται για τις συνθήκες τέλους του κύκλου (E.O.R) που είναι ο πλέον επιβαρυνμένες από απόψεως σχεδιασμού. Στις συνθήκες του κύκλου (S.O.R) η απόσταση από την ισορροπία είναι συνήθως 5° C.

Σε κανονικές συνθήκες η απόσταση από την ισορροπία κυμαίνεται ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές. Η αξιολόγηση της απόστασης από την ισορροπία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας είναι ένας χρήσιμος δείκτης για το πώς ο καταλύτης αναμόρφωσης ενεργεί συγκριτικά με το σχεδιασμό.

Γενικά, στις σχεδιαστικές τιμές τροφοδοσίας, ένας φούρνος αναμόρφωσης θα εμφανίσει προσέγγιση ως προς την ισορροπία μεθανίου αρκετά χαμηλότερη από αυτή του

σχεδιασμού. Μια ακριβής εκτίμηση της απόδοσης ενός αναμορφωτή μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση ενός συμβατικού υπολογισμού ισορροπίας.

3.1.7 Υλικό κατασκευής

Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι αυλοί του φούρνου reformer είναι το Manaurite 36X. Πρόκειται για ένα κράμα ανθεκτικό στη θερμότητα με μεγάλη αντοχή στον ερπυσμό.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Αντοχή στον ερπυσμό

Η εξαιρετική αντοχή αυτού του κράματος στον ερπυσμό το κάνει οικονομικό κατά τη χρήση, μιας και παρά τη μεγάλη περιεκτικότητα του σε ευγενή κραματικά στοιχεία, η πυκνότητα και το βάρος των χυτών είναι πολύ μικρότερα από αυτών που κατασκευάζονται με παλιότερες ποιότητες που είναι ανθεκτικές στη θερμότητα. Αυτό δεν συνεπάγεται μόνο χαμηλότερο κόστος, αλλά και μικρότερα έξοδα λειτουργίας αφού η θερμική αγωγιμότητα είναι καλύτερη και υπάρχει μικρότερη θερμική αδράνεια.

- Λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες

Παρέχει πολύ μεγαλύτερη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες (overheating) από τα κοινά κράματα και μπορεί να αντέξει έως και 1100° C (1995° F). Στοιχεία όπως Pb Sn, Zn, As περιορίζονται σε περιεκτικότητα μικρότερη από 50 ppm έκαστο, ώστε να εξασφαλιστεί μεγάλη αντοχή στον ερπυσμό και την οξείδωση.

- Καθόλου Σχηματισμός σ-φάσης

- Ολκιμότητα

Η ολκιμότητα του υλικού μετά από γήρανση είναι μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών κραμάτων.

- Πολύ καλή αντοχή στην ενανθράκωση και στην οξείδωση

- Καλή Συγκολλησιμότητα

- Εφαρμογές

Αυλοί από φούρνο reformer αμμωνίας, αυλοί από φούρνο reformer μεθανόλης, αναμόρφωση σε υψηλές θερμοκρασίες, γάντζοι και στηρίγματα για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες κ.α.

Χημική σύσταση

Το Manaurite 36X είναι ένα κράμα σιδήρου, άνθρακα, νικελίου και χρωμίου. Η τυπική χημική του σύσταση είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 3.1. Χημική Ανάλυση (% κ.β.)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Nb	P – S
0.35/0.45	≤1.50	≤1.50	23-27	33-35	<1.5	<0.03 each

Το νιόβιο (Nb) συμπεριλαμβάνεται για να παρέχει υψηλή αντοχή στον ερπυσμό και ολκιμότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

Δομή

- Υλικό as cast

Η μικροδομή δείχνει μια ωστενιτική δομή με λαμελοειδή εύκτητα κύρια καρβίδια (eutectic primary), που αναγνωρίζονται ως καρβίδια χρωμίου και νιόβιου.

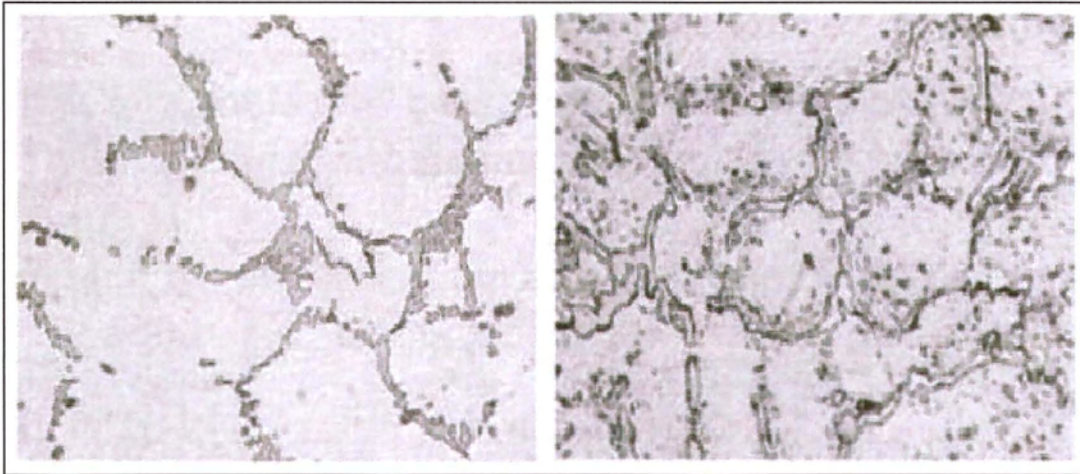
- Μετά από γήρανση

Η καθίζηση δευτερογενών σύνθετων καρβιδίων (καρβίδια χρωμίου και νιόβιου) εμφανίζεται στα σύνορα των κόκκων των κύριων καρβιδίων αλλά και μέσα στους κόκκους.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες και για μικρό διάστημα γήρανσης, η κατανομή αυτών των ιζημάτων είναι περισσότερο ετερογενής. Με την πάροδο μιας ώρας στους 950° C, τα περισσότερα συγκεντρώνονται γύρω από τα καρβίδια νιόβιου.

Συγκεκριμένα, η πυκνή συσσώρευση γίνεται λιγότερο συμπαγής στους 950° C, παρόλο που τα κύρια καρβίδια χρωμίου γύρω από τα οποία είναι συγκεντρωμένα, διογκώνονται και

παραμορφώνονται. Τα καρβίδια νιόβιου γενικά συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο. Τέλος, όταν η θερμοκρασία γήρανσης αυξάνεται, ο συνδυασμός τους επιταχύνεται.



Εικόνα 3.4: Υλικό as cast (αριστερά) και υλικό μετά από γήρανση (δεξιά)

Φυσικές ιδιότητες

- Ειδική βαρύτητα: 0,29 lbs./cu.inch. (8.05)
- Σημείο τήξης: 1350° C (2460° F)
- Θερμική αγωγιμότητα: 1050° → 0,025 Cal/cm² / cm/s/°C
20° → 0,072 Cal/cm² / cm/s/°C
- Ηλεκτρική αντίσταση: 20° C → 105 microOhm/cm/cm²
- Συντελεστής διαστολής: 20° C - 850° C → 18.5 mm/mm/°C (10⁻⁶)
20° C - 950° C → 18.9 mm/mm/°C (10⁻⁶)
20° C - 1050° C → 19.3 mm/mm/°C (10⁻⁶)
20° C - 1150° C → 19.7 mm/mm/°C (10⁻⁶)

Πίνακας 3.2: Ειδική θερμότητα

°C	°F	Cal/g/°C ή BTU/lb/°F
20	68	0,112
100	212	0,117
200	392	0,124
300	572	0,130
400	752	0,137
500	932	0,143
600	1112	0,150
700	1292	0,157
800	1472	0,163
900	1652	0,170
1000	1832	0,177
1100	2012	0,183
1200	2192	0,190

Πίνακας 3.3: Μέτρο ελαστικότητας

°C	°F	Mpa	Ksi
20	68	161900	23470
800	1472	106000	15360
900	1652	101000	14650
1000	1832	97100	14080
1100	2012	93200	13510

- Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού (UTS): 450 MPa minimum
- Τάση διαρροής: 250 MPa minimum
- Επιμήκυνση: 8% minimum για φυγοκεντρικά χυτούς σωλήνες
6% minimum για στατικά (static) χυτά

Πίνακας 3.4: Δοκιμές εφελκυσμού σε διάφορες θερμοκρασίες σε as cast υλικό

Temperature		UTS		YS		E
°C	°F	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	%
750	1380	333	48.4	157	22.8	16
800	1470	265	38.2	147	21.3	20
850	1560	196	28.4	137	19.9	22
900	1650	147	21.3	118	17.1	30

950	1740	118	17.1	88	12.8	32
1000	1830	93	13.5	78	11.4	38
1050	1920	74	10.7	69	10.0	47
1100	2010	61	8.8	55	8.0	39

Πίνακας 3.5: Δοκιμές εφελκυσμού σε θερμοκρασία δωματίου μετά από γήρανση στους 820° C (1510° F)

Ageing time	TS		YS		E
	MPa	Ksi	MPa	Ksi	%
Hours					
500	589	85.3	353	51.2	5
1000	569	82.5	343	49.8	4
5000	530	76.8	324	46.9	3.5
10000	471	68.3	324	46.9	2.5

Πίνακας 3.6: Δοκιμές εφελκυσμού στους 820° C (1510° F) μετά από γήρανση στους 820° C (1510° F)

Ageing time	TS		YS		E
	MPa	Ksi	MPa	Ksi	%
Hours					
500	216	31.3	157	22.8	26
1000	226	32.7	157	22.8	23
5000	226	32.7	157	22.8	25
10000	226	32.7	157	22.8	28

Αντοχή σε οξείδωση

Το Mauraite 36X είναι ένα από τα πιο ανθεκτικά κράματα ενάντια στην οξείδωση.

Συγκολλησιμότητα

- Υλικό as cast

Γενικά, το φαινόμενο του ερπυσμού εμφανίζεται ολοκληρωτικά σε συγκολλήσεις και όσον αφορά στους αυλούς των reformer, οι τελευταίοι έχουν διάφορες συγκολλήσεις συμβολής. Οι συγκολλήσεις είναι σίγουρα εκτεθειμένες στις συνθήκες λειτουργίας, τάση και

θερμοκρασία, καθώς αυτές εφαρμόζονται στους αυλούς. Αυτό το γεγονός οδηγεί στην έρευνα μεθόδου συγκόλλησης συμβατής με την ποιότητα του βασικού μετάλλου.

Έτσι, για την ανάπτυξη της αποδοτικότητας της συγκόλλησης, έχουν αναπτυχθεί επενδεδυμένα αλλά και γυμνά ηλεκτρόδια συμβατά με τη σύνθεση του Manaurite 36X.

Το Manaurite 36X μπορεί να συγκολληθεί ανάλογα με τις διάφορες διαδικασίες που μπορούν να εφαρμοστούν, όπως:

- Η χειροκίνητη μέθοδος συγκόλλησης με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMA), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για γέμισμα.

- Μέθοδος TIG. Η συγκόλληση γίνεται με προστατευτικό (shielding) αέριο, κυρίως καθαρό αργό, και η μέθοδος μπορεί να γίνει συμβατή με κάθε μέθοδο TIG που θα προκύψει από δω και στο εξής.

Διάφορες δοκιμές έχουν αποκαλύψει σχετικά με την αντοχή των συγκολλήσεων στον ερπυσμό, ότι οι αυτόματες μέθοδοι TIG και MIG είναι ανώτερες συγκριτικά με τη χειροκίνητη μέθοδο με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, και η αντοχή τους μπορεί να φτάσει σε σημεία πάνω από το 80% αυτής του βασικού μετάλλου. Τέτοιες σημαντικές παραδοχές έχουν επηρεάσει την έκταση της χρήσης των αυτόματων μεθόδων και κυρίως της MIG.

Αναφορικά με τη συγκόλληση αυλό με αυλό, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου. Η μέθοδος αυτή έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Δεν χρειάζεται υλικό συμπλήρωσης καθώς η συγκόλληση επιτυγχάνεται με την τήξη του υπάρχοντος μετάλλου.

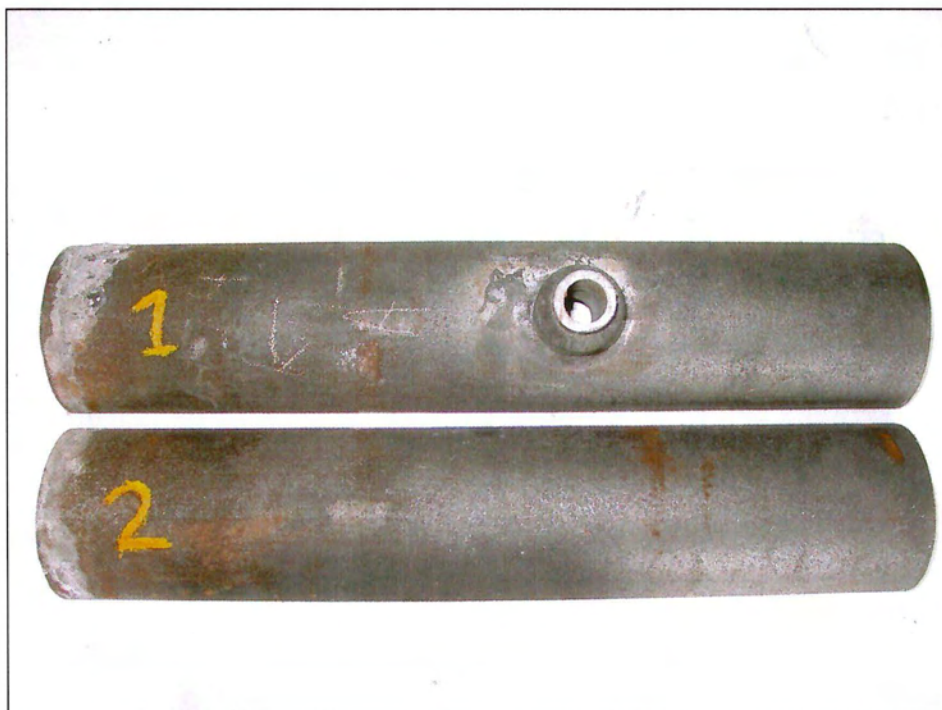
- Μπορεί να δώσει στις συγκολλήσεις αντοχή στον ερπυσμό ανάλογη του υπάρχοντος μετάλλου.

- Μετά από γήρανση

Η συγκολλησιμότητα του υλικού που έχει υποστεί γήρανση παραμένει καλή και επιτρέπει επιδιόρθωση.

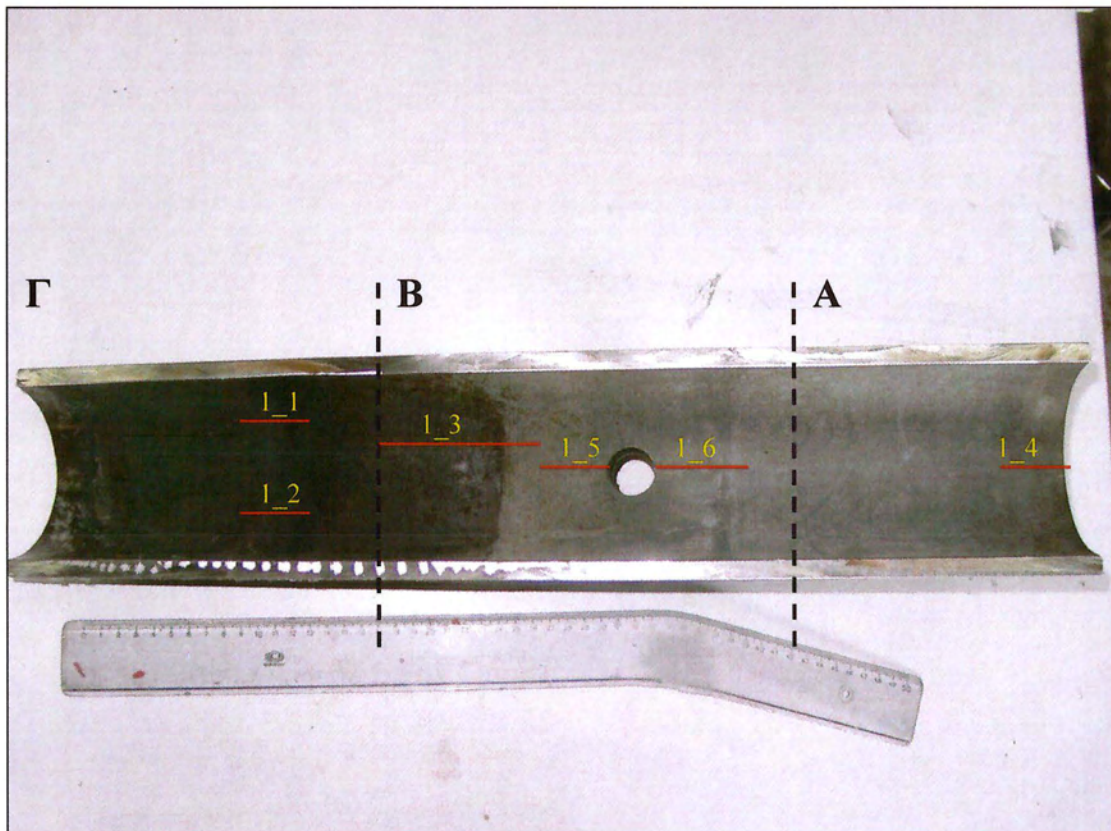
3.2 Προετοιμασία Μελέτης

Ο αυλός που παραλήφθηκε, ήταν ένας από αυτούς που αντικαταστάθηκαν προληπτικά μετά την αστοχία του αυλού Νο 19. Ο αυλός ήταν αρχικά κομμένος σε δύο ημικυλινδρικά τμήματα, 1 και 2, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5. Ο αυλός όπως αρχικά παραλήφθηκε

Η μελέτη βασίστηκε στο κομμάτι 1, το οποίο ήταν αυτό που είχε και το rig tail. Αρχικά τεμαχίστηκε σε 3 μέρη, Α, Β και Γ, για την εύκολη χρήση του στο κοπτικό μηχάνημα και έπειτα μελετήθηκε οπτικά για να επιλεγθούν οι θέσεις κοπής των δοκιμίων. Εσωτερικά του αυλού παρατηρήθηκαν 3 περιοχές που είχαν διαφορετική απόχρωση και είχαν επίσης αισθητή διαφορά στην τραχύτητα της επιφάνειας, η μία έφτανε 5 cm περίπου κάτω από το rig tail, η άλλη ξεκινούσε 7 cm περίπου πάνω από αυτό και η άλλη ήταν η περιοχή γύρω από το rig tail. Αποφασίστηκε λοιπόν να κοπούν δοκίμια και από τις 3 αυτές περιοχές. Οι περιοχές αυτές καθώς και οι θέσεις κοπής των 6 συνολικά δοκιμίων φαίνονται στην Εικόνα 3.6.



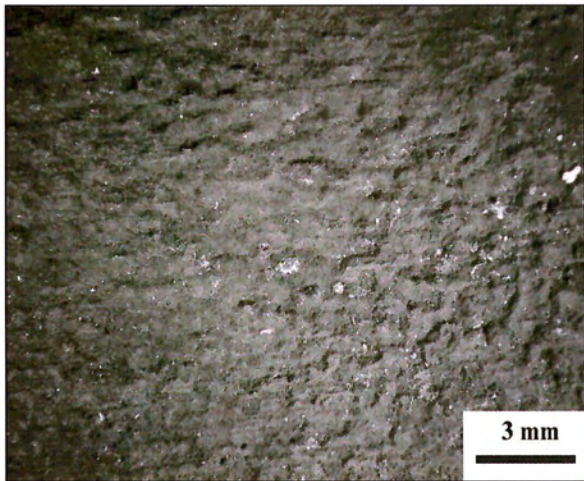
Εικόνα 3.6: Κομμάτια στα οποία τεμαχίστηκε ο αυλός και θέσεις κοπής δοκιμίων.

3.3 Αποτελέσματα

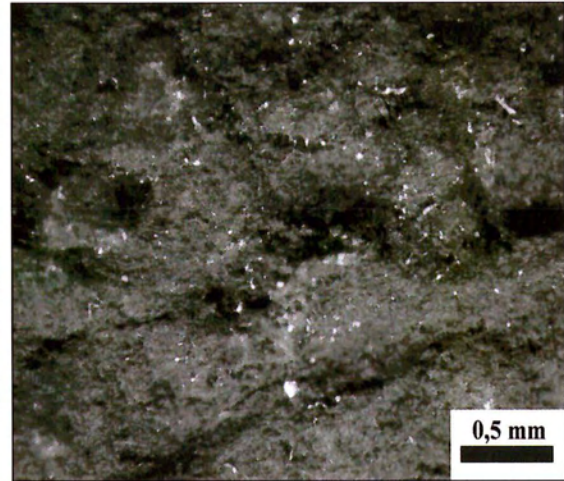
3.3.1 Οπτικός έλεγχος

Τα δοκίμια 1_1 και 1_2 προέρχονται όπως φαίνεται από την ίδια περιοχή και εμφάνιζαν τα ίδια χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια παραθέτονται φωτογραφίες που λήφθηκαν από το δοκίμιο 1_2.

Στις Εικόνες 3.7 και 3.8 φαίνεται με αρκετή λεπτομέρεια η τραχύτητα της σκούρας επιφάνειας που διακρίναμε και με γυμνό μάτι.

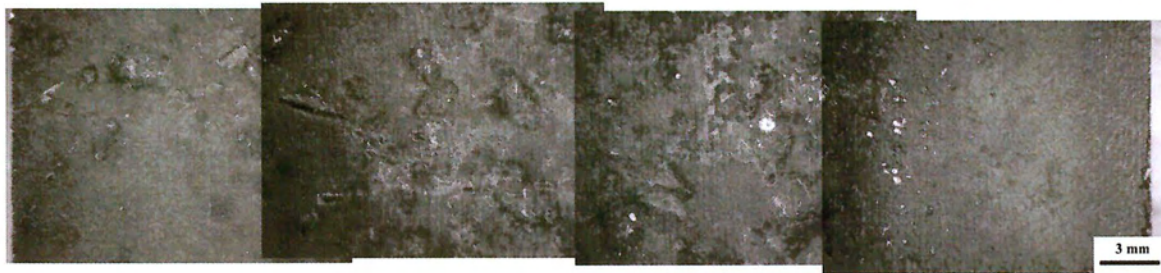


Εικόνα 3.7: Επιφάνεια δοκιμίου 1_2 (6,5x)



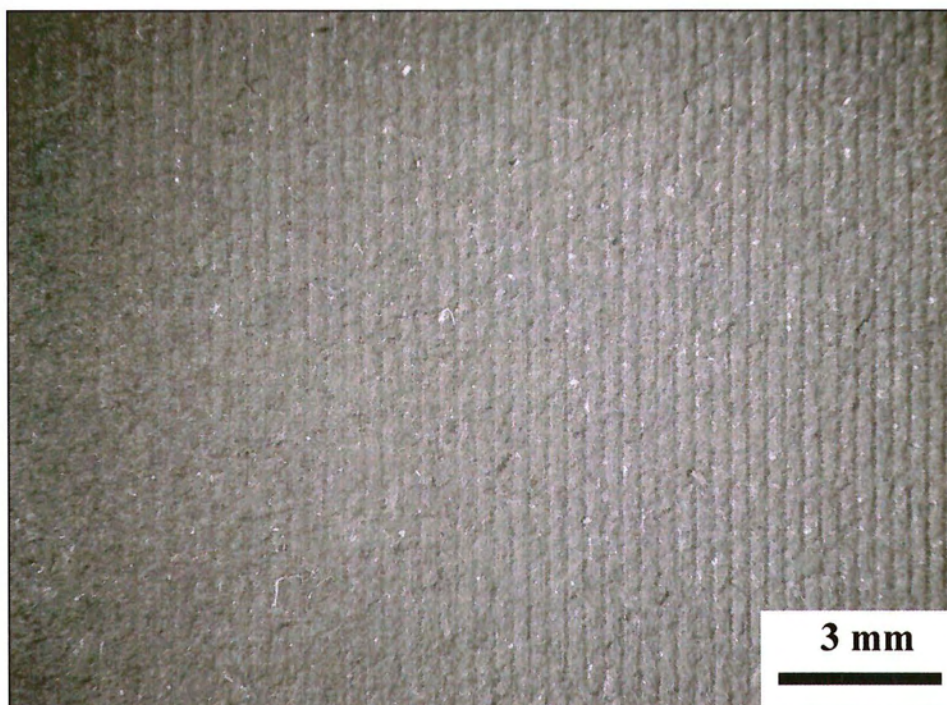
Εικόνα 3.8: Επιφάνεια δοκιμίου 1_2 (40x)

Το δοκίμιο 1_3 κόπηκε κάθετα στη διεπιφάνεια που φαίνεται να χωρίζει τη σκούρα περιοχή επάνω από το rig tail και αυτή που βρίσκεται γύρω από αυτό, με τέτοιο τρόπο ώστε να μελετηθούν και οι δύο.



Εικόνα 3.9: Επιφάνεια κοπής δοκιμίου 1_3 με τη σκούρα επιφάνεια αριστερά (6.5x)

Το δοκίμιο 1_4 προήλθε από την περιοχή που βρίσκεται κάτω από το rig tail και η επιφάνεια δεν εμφάνιζε οπτικά κάποια ιδιαιτερότητα ανάλογη των προηγούμενων.



Εικόνα 3.10: Επιφάνεια κοπής δοκιμίου 1_4 (6.5x)

Τα δοκίμια 1_5 και 1_6 προέρχονται από τη βάση του pig tail και περιέχουν τη συγκόλληση αυτού. Τα δύο αυτά δοκίμια παρουσίαζαν μικρές εσωτερικές ρωγμές, δηλαδή ρωγμές που δεν έφταναν σε κανένα από τα δύο άκρα του τοιχώματος. Ήταν όλες τους σε απόσταση από τη λίμνη συγκόλλησης και δεν φαινόταν να προέρχονται από αυτήν.



Εικόνα 3.11: Ρωγμή στο δοκίμιο 1_5 (16x)



Εικόνα 3.12: Ρωγμή στο δοκίμιο 1_6 (16x)

3.3.2 Μεταλλογραφικός έλεγχος

Η μικροδομή του υλικού Manaurite 36X, είναι δενδριτική. Οι δενδρίτες είναι προσανατολισμένοι γιατί αναπτύσσονται κατά το πάχος του αυλού, λόγω της φυγοκεντρικής χύτευσης. Τα σύνορα των κόκκων καλύπτονται από συνεχές φιλμ πρωτογενών καρβιδίων. Εκτός από τα πρωτογενή καρβίδια υπάρχουν καρβίδια και στο εσωτερικό των κόκκων, τα οποία είναι τα δευτερογενή καρβίδια που σχηματίζονται κατά την λειτουργία του αυλού με μία διαδικασία γήρανσης (aging).

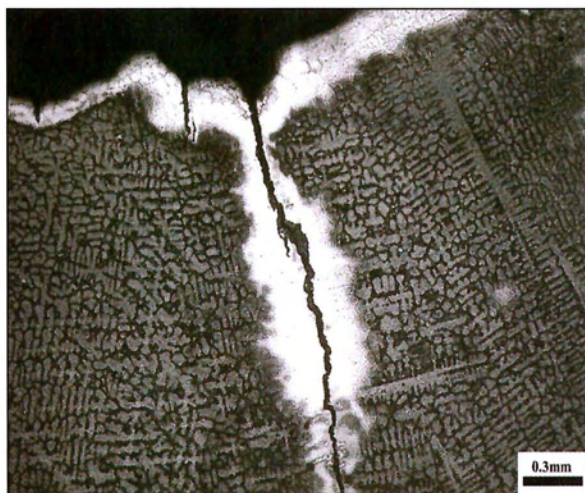


Εικόνα 3.13: Δομή Manaurite 36X μετά από γήρανση, διακρίνονται τα πρωτογενή καρβίδια (λευκά) και τα δευτερογενή σύνθετα καρβίδια (μαύρα)

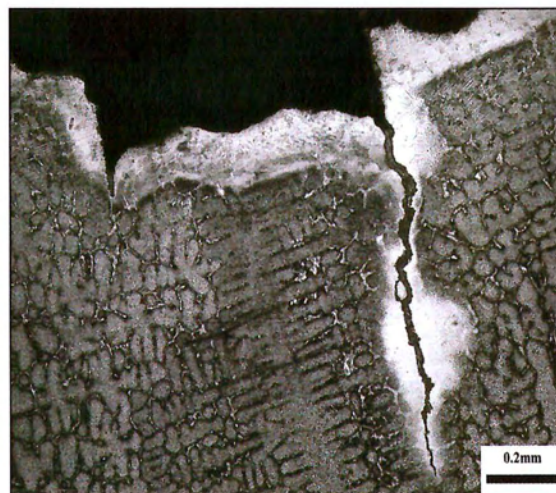
- Δοκίμιο 1-2

Στο δοκίμιο 1_2 το οποίο προέρχεται από τη σκούρα επιφάνεια του αυλού, δηλαδή πάνω από το rig tail, παρατηρήθηκε αρχικά ένα στρώμα διαβρωμένου υλικού που κάλυπτε όλη την επιφάνεια. Η επιφάνεια είναι αρκετά τραχιά με πολλές οπές από τις οποίες ξεκινάνε μικρές ρωγμές που φτάνανε σε βάθος μέχρι και τα 2 mm. Είναι εμφανές σε όλες τις φωτογραφίες ότι αυτό το στρώμα διαβρωμένου υλικού (λευκή περιοχή) εμφανίζεται με το

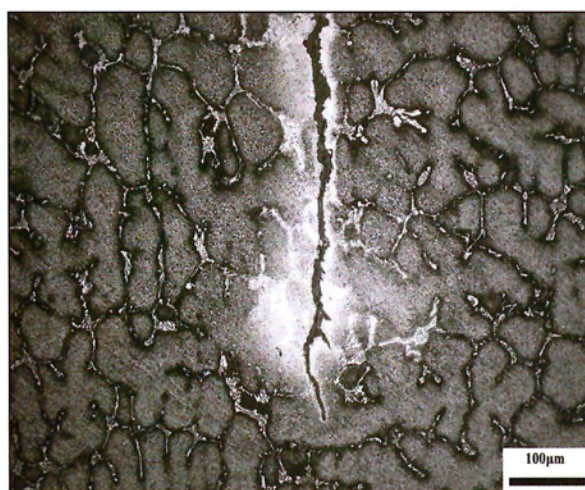
ίδιο περίπου πάχος και στα τοιχώματα όλων των ρωγμών, δηλαδή σε κάθε επιφάνεια που είναι εκτεθειμένη στο εσωτερικό περιβάλλον του αυλού. Τέλος, η όδευση των ρωγμών φαίνεται να είναι διακρυσταλλική.



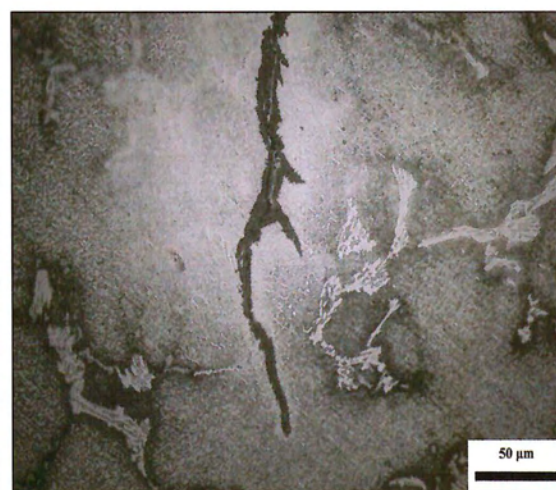
Εικόνα 3.14: Ρωγμή 2mm με εμφανές το στρώμα (λευκή περιοχή) διαβρωμένου υλικού (50x)



Εικόνα 3.15: Οπή και ρωγμή στη βάση αυτής (100x)



Εικόνα 3.16: Όδευση ρωγμής 1mm (200x)



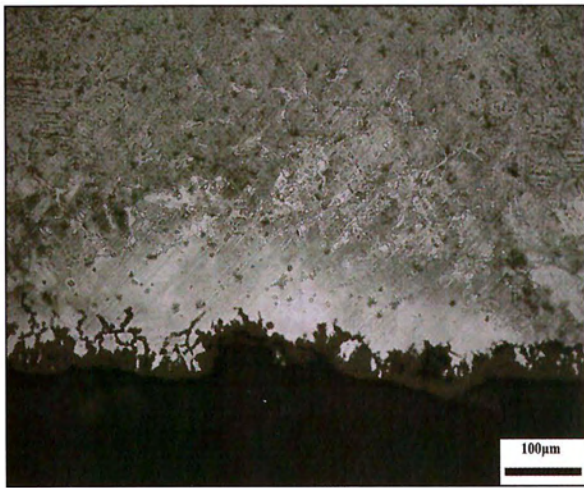
Εικόνα 3.17 Όδευση της ίδιας ρωγμής όπου φαίνεται να είναι διακρυσταλλική (500x)

- Δοκίμιο 1-3

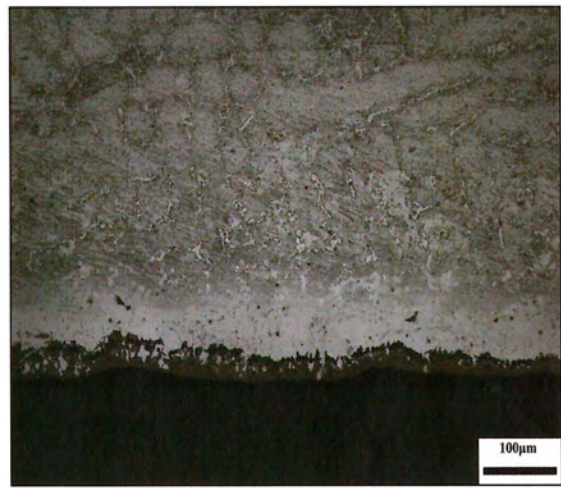
Όπως αναφέραμε προηγουμένως, το δοκίμιο 1_3 κόπηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να περιέχει και τις δύο επιφάνειες, τη σκούρα που βρίσκεται πάνω από το rig tail και την πιο ανοιχτόχρωμη που βρίσκεται γύρω από αυτό.

Στην Εικόνα 3.18 λοιπόν βλέπουμε τη σκούρα επιφάνεια, στην Εικόνα 3.20 έχουμε την επιφάνεια γύρω από το rig tail, ενώ στην Εικόνα 3.19 βλέπουμε την περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα σε αυτές και μοιάζει με διεπιφάνεια.

Δεν έμοιαζαν να έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, με το στρώμα διαβρωμένου υλικού (λευκό) να διακρίνεται σε όλες. Η μόνη παρατήρηση που θα μπορούσε να γίνει είναι ότι καθώς περνάμε από τη σκούρα στην πιο ανοιχτόχρωμη επιφάνεια, το στρώμα αυτό φαίνεται να γίνεται πιο λεπτό.



Εικόνα 3.18: Σκούρα επιφάνεια του δοκιμίου 1_3 (200x)



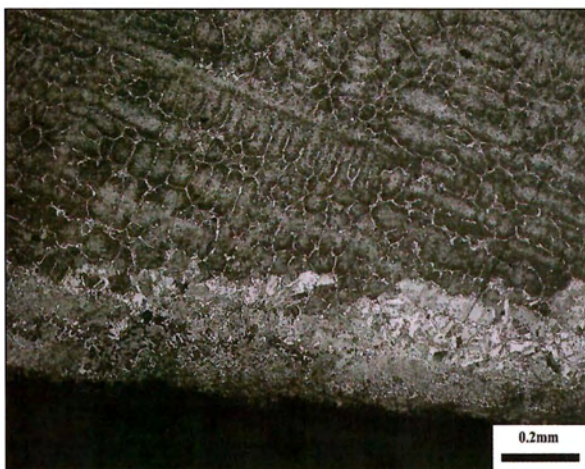
Εικόνα 3.19: Μεσαία επιφάνεια (διεπιφάνεια) του δοκιμίου 1_3 (200x)



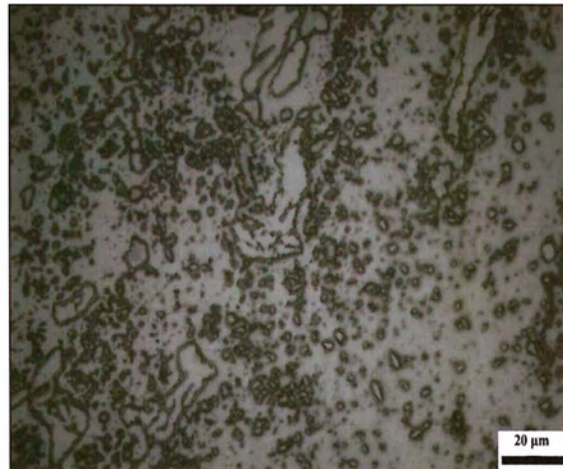
Εικόνα 3.20: Ανοιχτόχρωμη επιφάνεια του δοκιμίου 1_3 (200x)

- Δοκίμιο 1-4

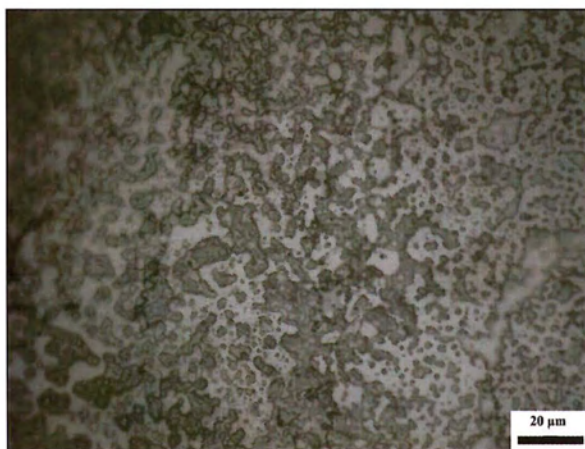
Κατά τον οπτικό έλεγχο, η επιφάνεια του δοκιμίου 1_4 δεν φαινόταν να έχει κάποια ατέλεια. Με τη μεταλλογραφία όμως διαπιστώσαμε ότι έχει και αυτή ένα λευκό στρώμα διαβρωμένου υλικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.21. Παρατηρούμε εύκολα ότι η δομή εσωτερικά είναι φυσιολογική (Εικόνα 3.22) αλλά στην εξωτερική διαβρωμένη επιφάνεια εμφανίζεται πολύ μεγαλύτερος αριθμός δευτερευόντων καρβιδίων (Εικόνα 3.23). Έχει ενδιαφέρον επίσης να δούμε στην Εικόνα 3.24 μια διαχωριστική επιφάνεια αυτών των δύο, με την φυσιολογική δομή να βρίσκεται αριστερά και τη διαβρωμένη δεξιά.



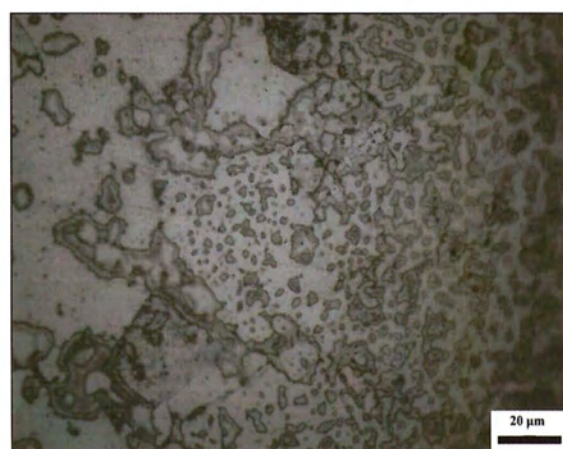
Εικόνα 3.21: Διαβρωμένο στρώμα στο δοκίμιο 1_4 (100x)



Εικόνα 3.22: Εσωτερική δομή δοκιμίου 1_4 (1000x)



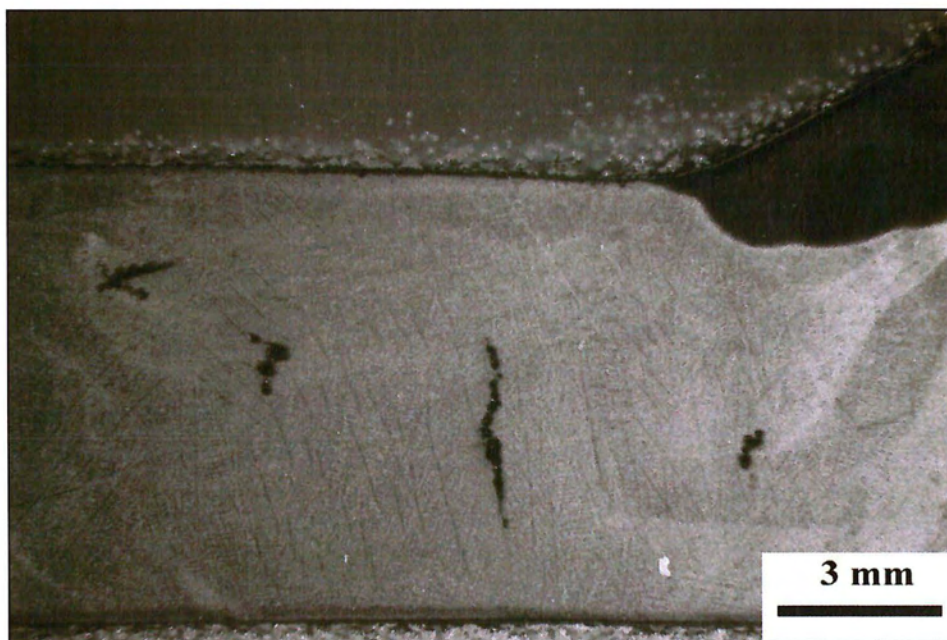
Εικόνα 3.23: Εξωτερική διαβρωμένη δομή δοκιμίου 1_4 (1000x)



Εικόνα 3.24. Διαχωριστική επιφάνεια τις κανονικής και της εξωτερικής διαβρωμένης δομής δοκιμίου 1_4 (1000x)

- Δοκίμιο 1-5

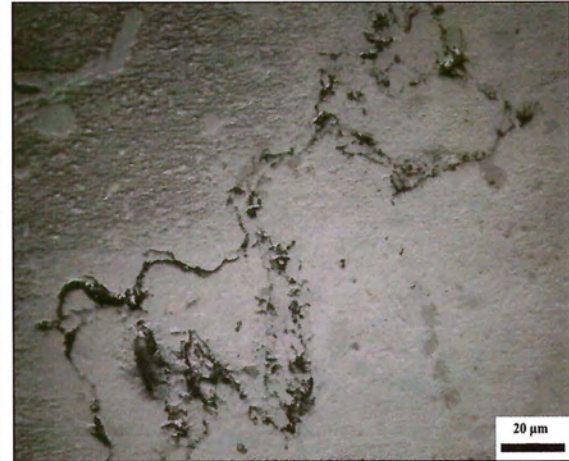
Στο δοκίμιο 1_5 παρατηρήθηκαν κάποιες ρωγμές οι οποίες ήταν μη διαμπερείς και ήταν σε απόσταση από τη λίμνη συγκόλλησης του pig tail (Εικόνα 3.25). Αρχικά βλέπουμε ότι παρόλο που οι ρωγμές είναι μη διαμπερείς, παρουσιάζουν και πάλι στην περίμετρο τους ένα λεπτό στρώμα διαβρωμένου υλικού (Εικόνα 3.26). Έπειτα διαπιστώθηκε εύκολα για τις ρωγμές αυτές ότι πρόκειται για πολύ μικρές οπές οι οποίες έπειτα ενώνονται με διαδοχικές ρωγμές σχηματίζοντας τελικά μία ρωγμή. Τέτοιες μικρές οπές υπήρχαν και μπροστά από την πορεία όδευσης της ρωγμής οι οποίες έδειχναν να είναι η αιτία της διάδοσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.28. Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στη ρωγμή της Εικόνας 3.29, οι οπές εμφανίζονταν στα σύνορα των κόκκων και η διάδοση της ρωγμής ήταν περικρυσταλλική.



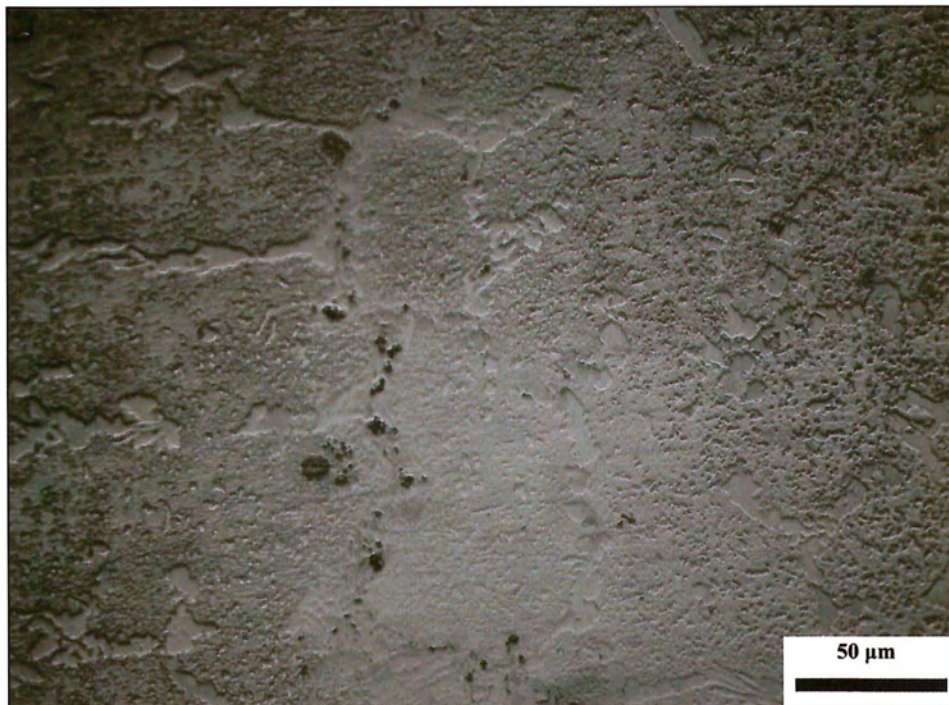
Εικόνα 3.25: Μη διαμπερείς ρωγμές κοντά στη συγκόλληση του pig tail (6.5x)



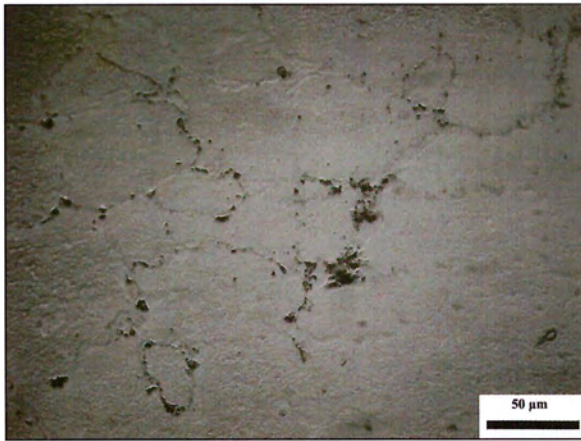
Εικόνα 3.26: Μεγάλη ρωγμή που διακρίνεται στο μέσο της Εικόνας X του δοκιμίου 1_5 (50x)



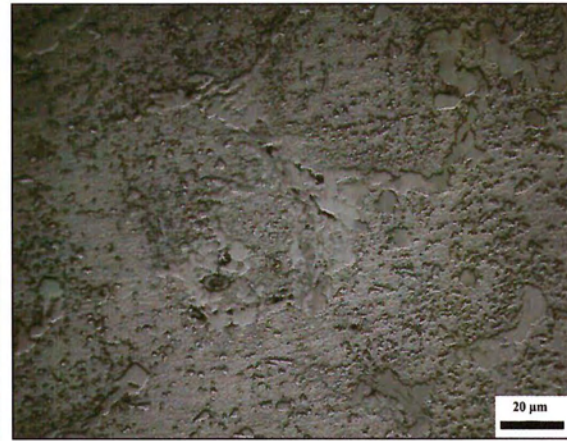
Εικόνα 3.27: Οπές και μικρές ρωγμές που ενώνονται διαδοχικά στο δοκίμιο 1_5 (1000x)



Εικόνα 3.28: Πολύ μικρές οπές στην πορεία όδευσης της μεγάλης ρωγμής του δοκιμίου 1_5 (500x)



Εικόνα 3.29 Οπές στα σύνορα των κόκκων και περικρυσταλλικές ρωγμές που τις ενώνουν (500x)



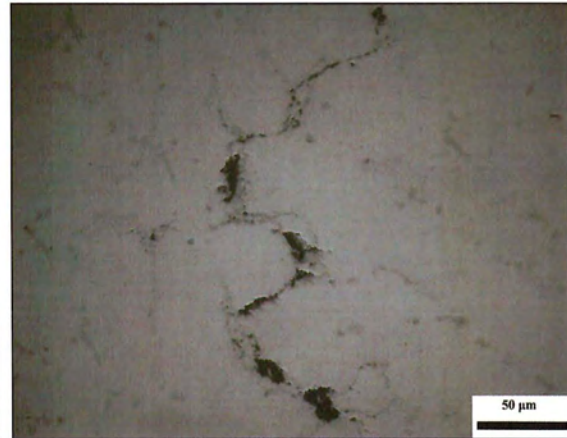
Εικόνα 3.30 Πολύ μικρές οπές μπροστά από τη διάδοση μιας ρωγμής (1000X)

- Δοκίμιο 1-6

Το δοκίμιο 1_6 το οποίο προέρχεται και αυτό από τη βάση συγκόλλησης του rig tail με τον αυλό, εμφάνιζε επίσης κάποιες μη διαμπερείς ρωγμές που ήταν παρόμοιες με αυτές του δοκιμίου 1_5. Δηλαδή ήταν μη διαμπερείς, αποτελούμενες από μικρές οπές που έπειτα ενώνονταν με διαδοχικές ρωγμές προς τον σχηματισμό μιας μεγαλύτερης ρωγμής και σε όλη την περίμετρο αυτής υπήρχε και πάλι ένα στρώμα διαβρωμένου υλικού. Παρακάτω δίνονται μερικές φωτογραφίες της μεγαλύτερης ρωγμής, αρχικά χωρίς χημική προσβολή (Εικόνες 3.31, 3.32) και έπειτα με χημική προσβολή (Εικόνες 3.33, 3.34). Τέλος δίνονται και δύο φωτογραφίες από μία οπή που υπήρχε στην αρχή του δεύτερου πάσου συγκόλλησης και οφειλόταν προφανώς σε ατελή τήξη (Εικόνες 3.35, 3.36).



Εικόνα 3.31: Ρωγμή στο δοκίμιο 1_6, χωρίς χημική προσβολή (50x)



Εικόνα 3.32: Οπές στα σύνορα κόκκων και περικρυσταλλικές ρωγμές που τις ενώνουν (500x)



Εικόνα 3.33: Ρωγμή στο δοκίμιο 1_6 με εμφανή την διαβρωμένη περιοχή (200x)



Εικόνα 3.34: Διάδοση ρωγμής στο δοκίμιο 1_6 (500x)



Εικόνα 3.35: Οπή στην αρχή του δεύτερου πάσου συγκόλλησης, χωρίς χημική προσβολή (50x)

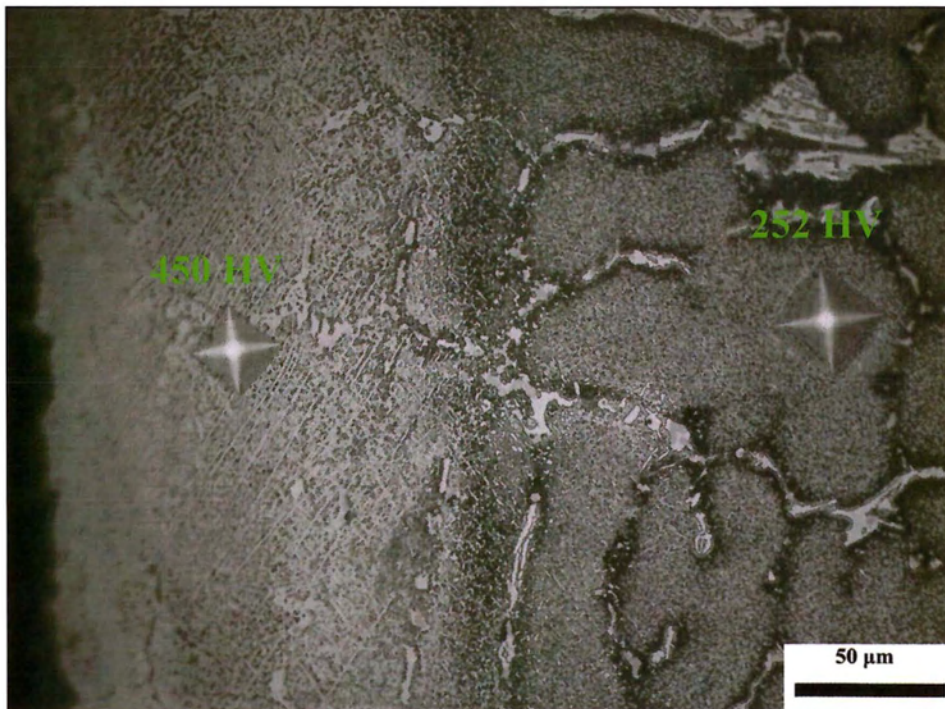


Εικόνα 3.36: Σημείο της οπής της Εικόνας X (500x)

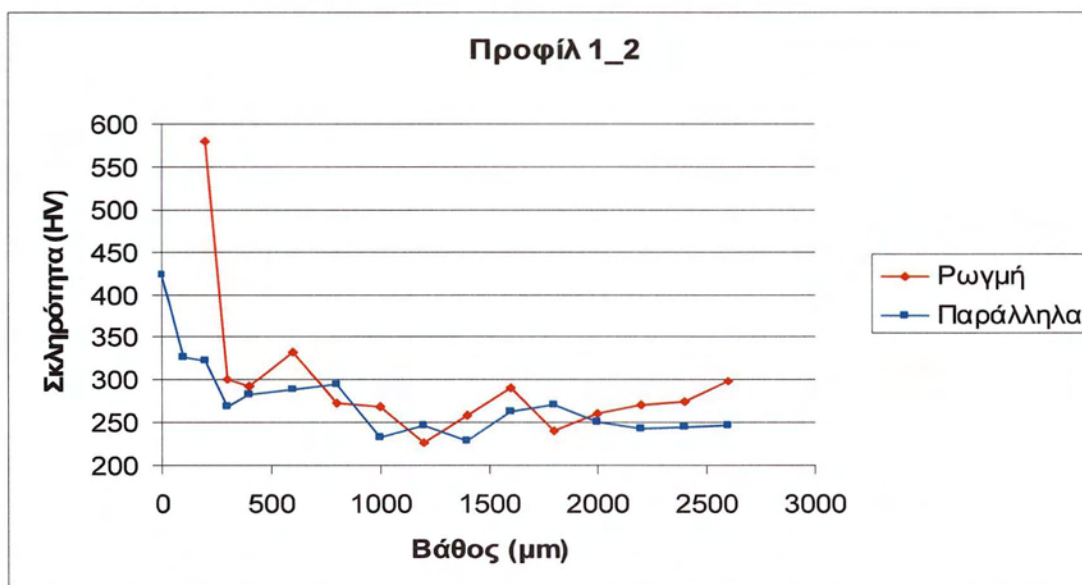
3.3.3 Μικροσκληρομέτρηση

- Δοκίμιο 1-2

Αρχικά μετρήθηκε και φωτογραφήθηκε (Εικόνα 3.37) η σκληρότητα της κανονικής δομής και αυτή της επηρεασμένης ζώνης που βρίσκεται στην εσωτερική επιφάνεια του αυλού. Έπειτα μετρήθηκε η σκληρότητα μέσα στην επηρεασμένη ζώνη της μεγαλύτερης ρωγμής που παρατηρήθηκε αλλά και στην κανονική δομή, παράλληλα με τη ρωγμή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίδονται στο Διάγραμμα 3.1, οι αποστάσεις μετρούνται από το εσωτερικό του αυλού προς το εξωτερικό. Είναι εμφανές ότι η διαβρωμένη επιφάνεια, είτε εσωτερική περιφέρεια του αυλού είτε στα τοιχώματα της ρωγμής έχει μεγαλύτερη σκληρότητα από την κανονική. Η υψηλότερη σκληρότητα υποδηλώνει ενανθράκωση.



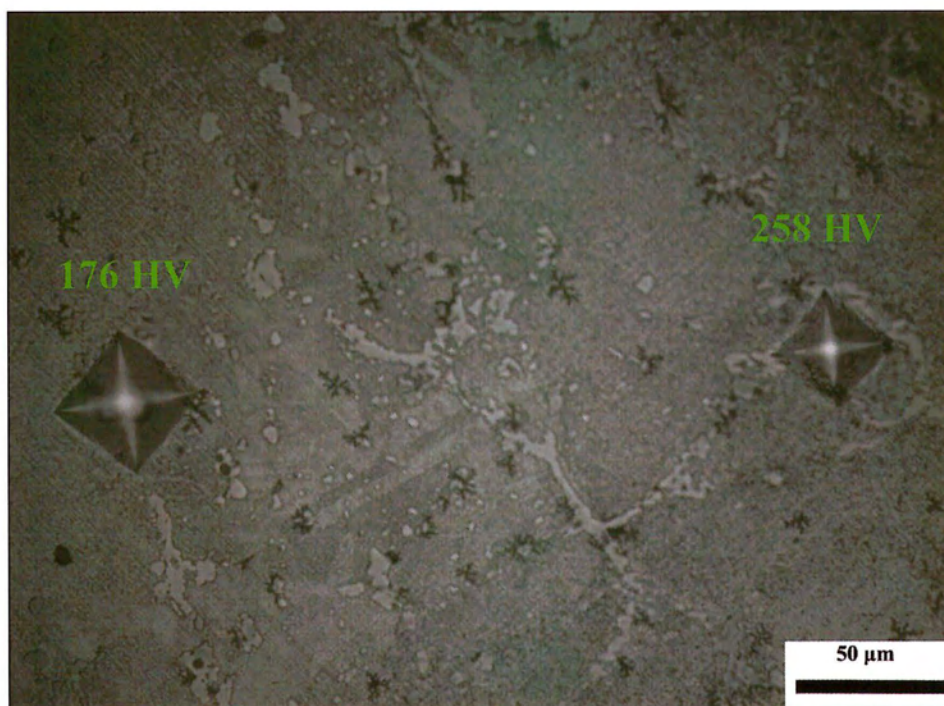
Εικόνα 3.37: Σκληρομέτρηση κανονικής δομής (δεξιά) και επηρεασμένης ζώνης (αριστερά) (500x)



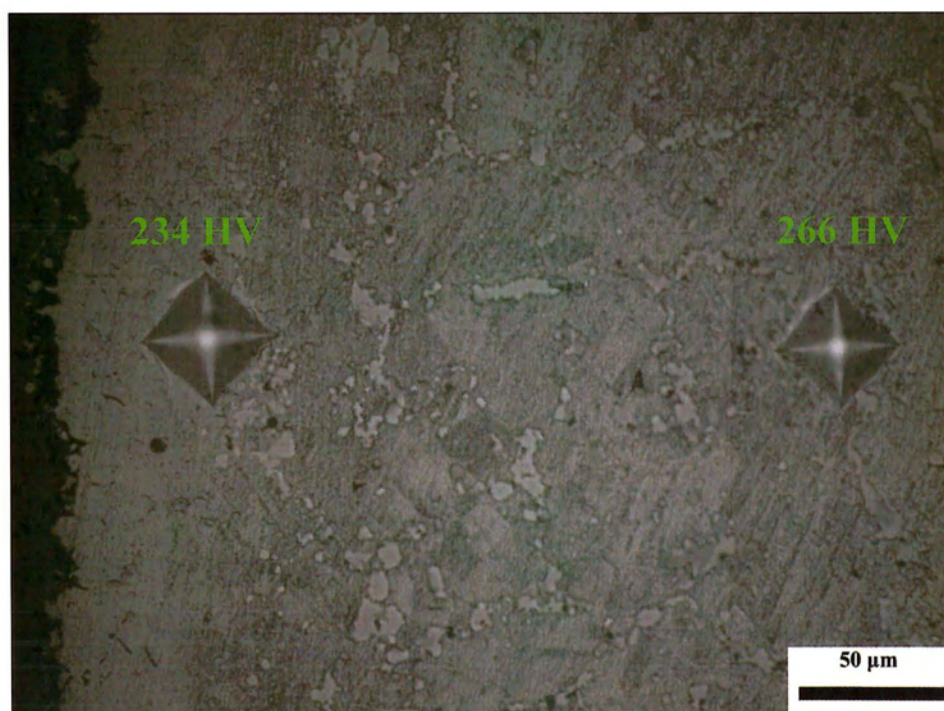
Διάγραμμα 3.1: Σκληρότητα δοκιμίου 1_2 μέσα στην επηρεασμένη ζώνη της ρωγμής και παράλληλα σε αυτή

- Δοκίμιο 1-3

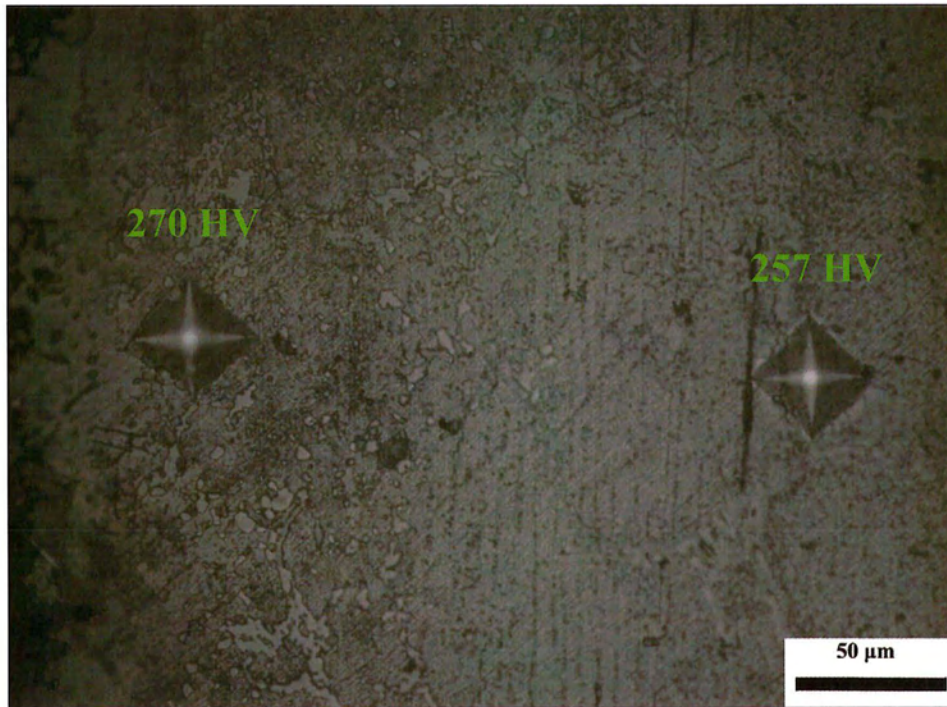
Στο δοκίμιο 1_3 μετρήθηκαν και φωτογραφήθηκαν η κανονική δομή και η εσωτερική διαβρωμένη επιφάνεια σε τρεις διαφορετικές περιοχές. Στην περιοχή που βρίσκεται κοντά στο *rig tail* (Εικόνα 3.38), στην επάνω σκούρα περιοχή του αυλού (Εικόνα 3.39), αλλά και σε εκείνη που βρίσκεται ενδιάμεσα τους (Εικόνα 3.40). Έπειτα μετρήθηκε η σκληρότητα της επηρεασμένης ζώνης κατά μήκος όλου του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα δίδονται στο Διάγραμμα 3.2, οι αποστάσεις μετρούνται από το άκρο του δοκιμίου που βρίσκεται κοντά στο *rig tail* προς το άνω μέρος του αυλού, δηλαδή την σκούρα επιφάνεια. Παρατηρούμε εύκολα ότι όσο προχωράμε προς το επάνω μέρος του αυλού, η σκληρότητα της επιφάνειας γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη, γεγονός που γίνεται εύκολα αντιληπτό και από τη γραμμή τάσης του διαγράμματος (κόκκινη καμπύλη).



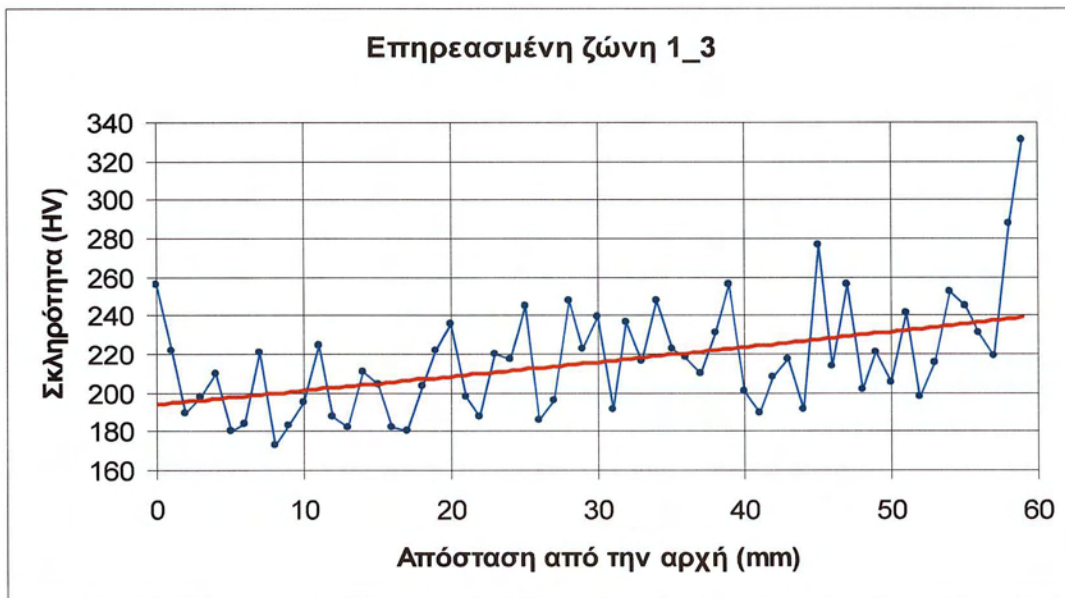
Εικόνα 3.38: Σκληρομέτρηση κανονικής δομής (δεξιά) και επηρεασμένης ζώνης (αριστερά) της περιοχής γύρω από το pig tail (500x)



Εικόνα 3.39: Σκληρομέτρηση κανονικής δομής (δεξιά) και επηρεασμένης ζώνης (αριστερά) της ενδιάμεσης περιοχής (500x)



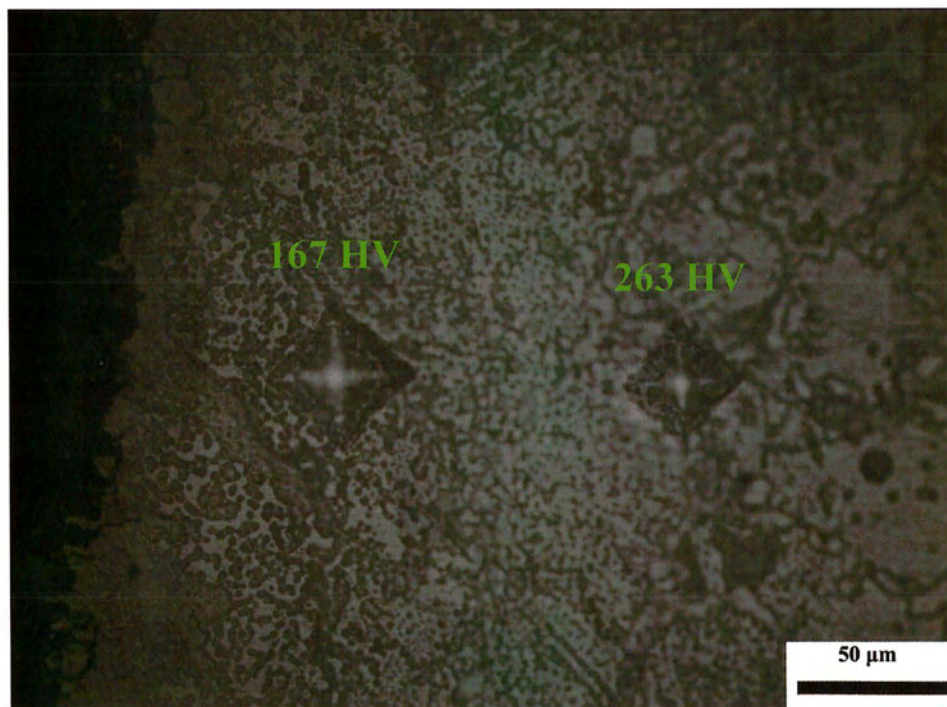
Εικόνα 3.40: Σκληρομέτρηση κανονικής δομής (δεξιά) και επηρεασμένης ζώνης (αριστερά) του επάνω μέρους του αυλού (500x)



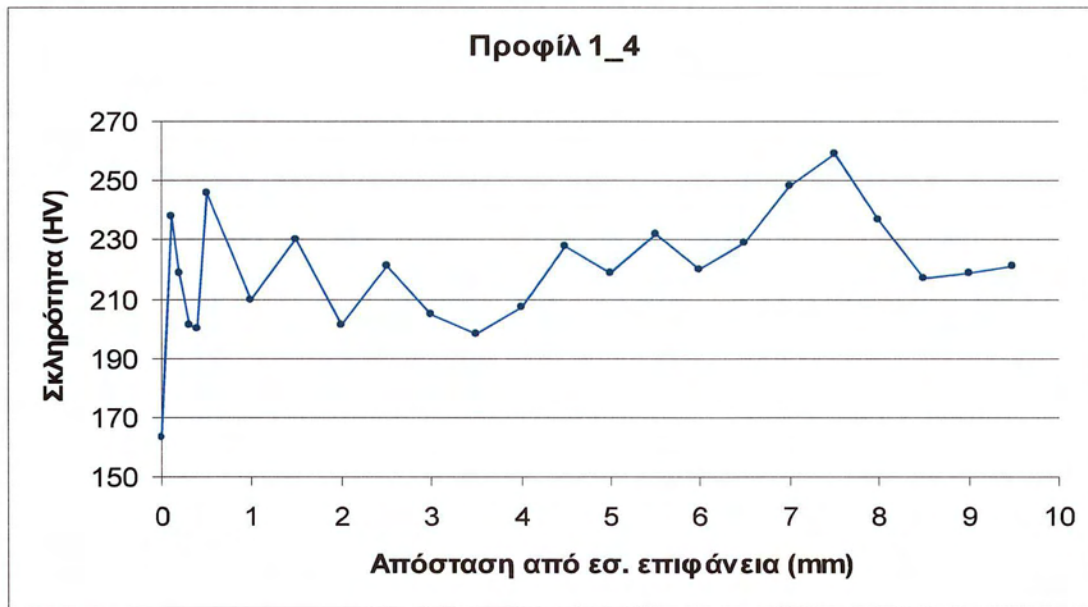
Διάγραμμα 3.2: Σκληρότητα επηρεασμένης επιφάνειας του δοκιμίου 1_3, με τις να μετρούνται από κάτω προς το άνω μέρος του αυλού

- Δοκίμιο 1-4

Στο δοκίμιο 1_4 μετρήθηκε και φωτογραφήθηκε και πάλι η κανονική δομή και η εσωτερική επηρεασμένη επιφάνεια (Εικόνα 3.41). Παρατηρούμε ότι σε αυτή την περιοχή του αυλού κάτω από το *rig tail* η επηρεασμένη επιφάνεια έχει μικρότερη σκληρότητα από την αντίστοιχη στην επάνω περιοχή του αυλού. Τέλος, έγιναν μετρήσεις σε όλο το προφίλ του αυλού, τα αποτελέσματα των οποίων δίδονται στο Διάγραμμα 3.3, με τις μετρήσεις να ξεκινάνε από την εσωτερική επιφάνεια προς την εξωτερική.



Εικόνα 3.41: Σκληρομέτρηση κανονικής δομής (δεξιά) και επηρεασμένης ζώνης (αριστερά) της επιφάνειας του δοκιμίου 1_4 (500x)



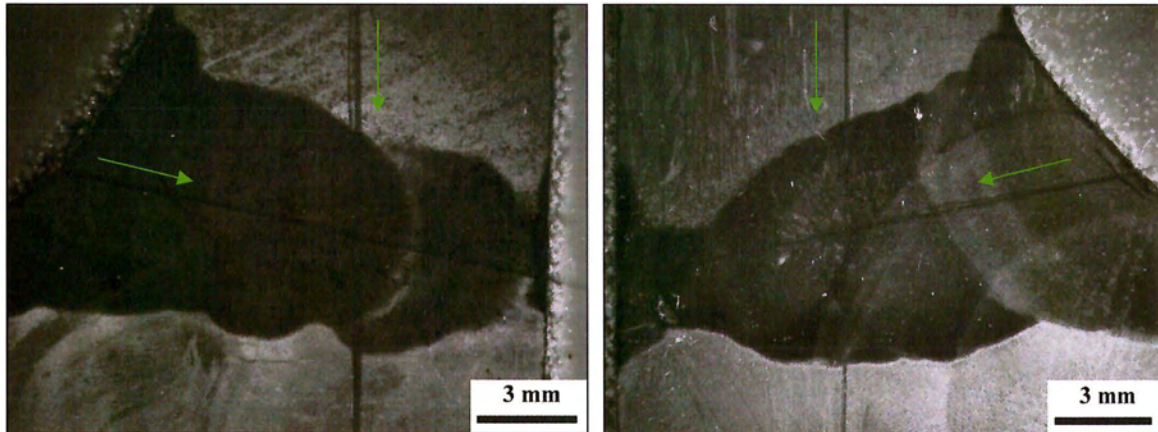
Διάγραμμα 3.3: Σκληρότητα δοκιμίου 1_4, από την εσωτερική επιφάνεια προς την εξωτερική

- Δοκίμια 1-5 & 1-6

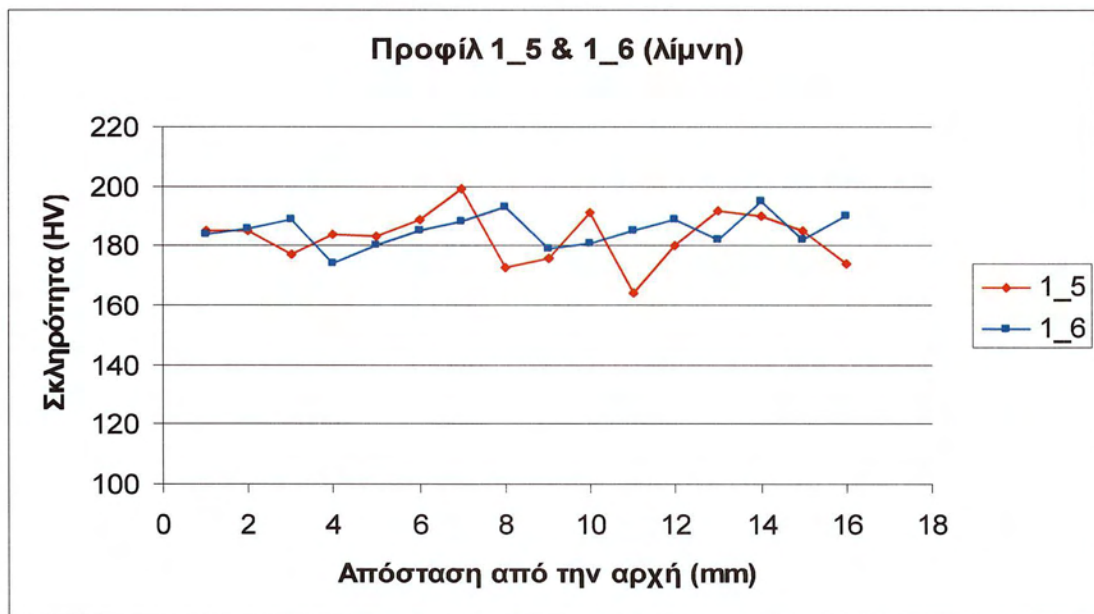
Τα δοκίμια 1_5 και 1_6 προέρχονται από το ίδιο μέρος του αυλού, από η συγκόλληση του pig tail. Γι' αυτό η σειρά των μετρήσεων που έγιναν σε αυτά ήταν ίδια και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ταυτόχρονα.

Αρχικά έγιναν μετρήσεις στη συγκόλληση. Ένα προφίλ της συγκόλλησης ξεκινώντας από το εσωτερικό της (τελευταίο πάσο) καταλήγοντας στη βάση της και ένα προφίλ ξεκινώντας από το πάνω μέρος των δοκιμίων, που είναι κομμάτι του pig tail, καταλήγοντας στο κάτω μέρος των δοκιμίων, που είναι η εσωτερική επιφάνεια του αυλού. Στις Εικόνες 3.42 & 3.43 φαίνονται οι ευθείες πάνω στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις για το κάθε δοκίμιο αντίστοιχα, με τα βελάκια να δείχνουν την αρχή και το τέλος των μετρήσεων. Στο Διάγραμμα 3.4 δίδονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων μέσα στη λίμνη συγκόλλησης και στο Διάγραμμα 3.5 τα αποτελέσματα των μετρήσεων από το pig tail προς το εσωτερικό του αυλού.

Τέλος, έγιναν κάποιες μετρήσεις γύρω από τις ρωγμές των δοκιμίων. Δύο μετρήσεις μέσα στην επηρεασμένη ζώνη στην περιφέρεια της συγκόλλησης και δύο στην περιοχή γύρω από αυτή για κάθε δοκίμιο. Τα αποτελέσματα δίνονται στις Εικόνες X και X μαζί με τα σημεία όπου έγιναν οι μετρήσεις.



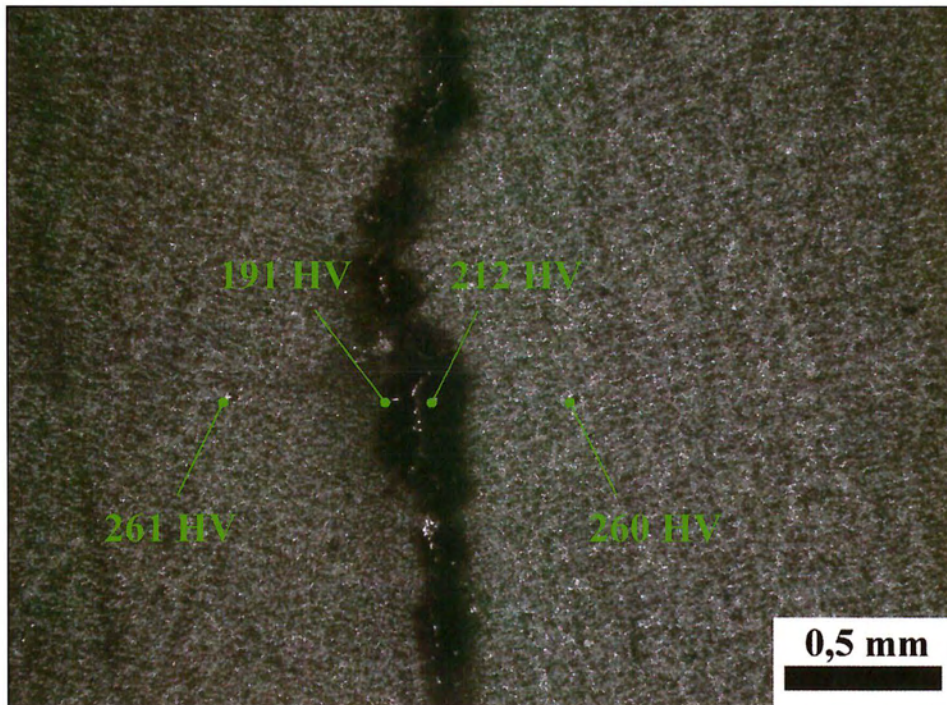
Εικόνες 3.42 & 3.43: Ευθείες πάνω στις οποίες έγιναν οι σκληρομετρήσεις για τα δοκίμια 1_5 (αριστερά) και 1_6 (δεξιά). Τα βέλη δείχνουν την αρχή και το τέλος των μετρήσεων (6,5x)



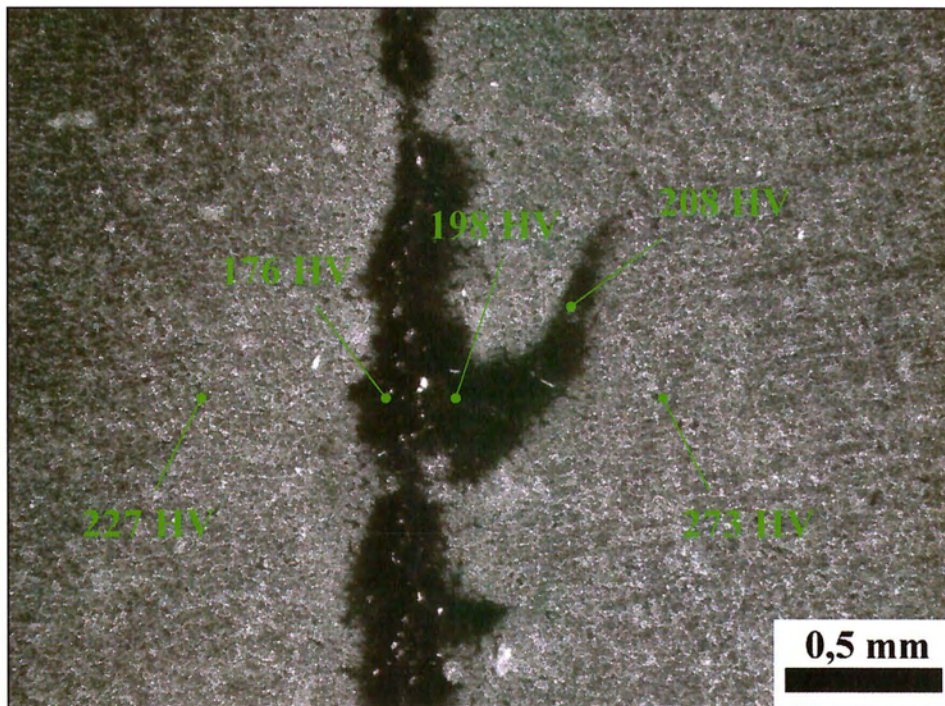
Διάγραμμα 3.4: Σκληρότητα δοκιμίων 1_5 και 1_6 μέσα στη λίμνη συγκόλλησης



Διάγραμμα 3.5: Σκληρότητα δοκιμίων 1_5 και 1_6 από το rig tail προς το εσωτερικό του αυλού



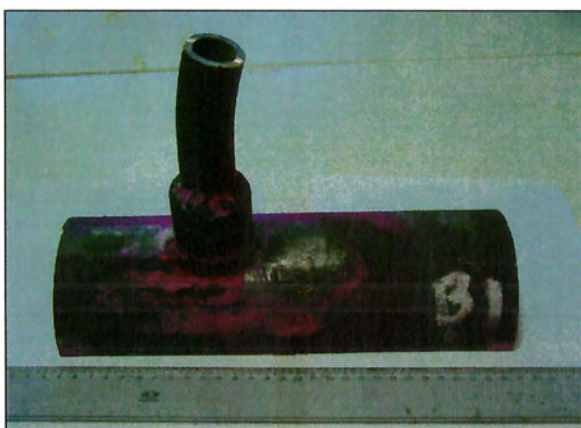
Εικόνα 3.44: Σκληρομέτρηση κανονικής δομής και επηρεασμένης ζώνης σε ρωγμή του δοκιμίου 1_5 (40x)



Εικόνα 3.45: Σκληρομέτρηση κανονικής δομής και επηρεασμένης ζώνης σε ρωγή του δοκιμίου 1_6 (40x)

3.3.4 Δοκιμές εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια που προέρχονταν από τα δύο τμήματα του αυλού No 19 που ήταν αυτός που είχε αστοχήσει αρχικά. Το ένα τμήμα προέρχεται από το άνω μέρος του αυλού, κοντά στο rig tail (Εικόνα X) και το δεύτερο μέσα από το φούρνο του reformer, radiant zone (Εικόνα X).



Εικόνα 3.46: Άνω μέρος του αυλού No 19.



Εικόνα 3.47: Μέρος του αυλού No 19 μέσα από το φούρνο reformer

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε θερμοκρασία δωματίου, στους 300°C και στους 500°C. Από κάθε τμήμα του αυλού κατασκευάστηκαν από τρία (3) δοκίμια εφελκυσμού για κάθε θερμοκρασία δοκιμής, σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 10002-1. Οι δοκιμές εφελκυσμού έγιναν σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 10002-1 για τα test σε θερμοκρασία δωματίου, και σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 10002-5 για τα test στις θερμοκρασίες 300°C και 500°C. Στις Εικόνες X και X φαίνεται η πειραματική διάταξη για τις δοκιμές σε υψηλή θερμοκρασία.



Εικόνες 3.48 & 3.49: Μηχανή εφελκυσμού για δοκιμές σε υψηλές θερμοκρασίες

Τα αποτελέσματα για το άνω μέρος του αυλού δίδονται στον Πίνακα 3.1 και για το τμήμα μέσα από το φούρνο του reformer στον Πίνακα 3.2 παρακάτω.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού για το άνω μέρος του αυλού (pig tail)

Δοκίμιο	Όριο Διαρροής $R_{p0,2}$ (N/mm ²)	Όριο θραύσης R_m (N/mm ²)	Επιμήκυνση A_5 (%)
<i>Θερμοκρασία δωματίου</i>			
1.1	-	466	0,04
1.2	-	465	0,04
1.3	-	467	0,03

<i>300° C</i>			
1.4	-	434	3,6
1.5	-	445	3,7
1.6	-	-	-
<i>500° C</i>			
1.7	-	427	4,5
1.8	-	446	5,2
1.9	-	462	5,4

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού για το τμήμα του αυλού μέσα από το φούρνο reformer

Δοκίμιο	Όριο Διαρροής $R_{p0,2}$ (N/mm ²)	Όριο θραύσης R_m (N/mm ²)	Επιμήκυνση A_5 (%)
<i>Θερμοκρασία δωματίου</i>			
2.1	-	420	0
2.2	-	403	0
2.3	-	375	0
<i>300° C</i>			
2.4	-	390	3,7
2.5	-	393	3,9
2.6	-	395	3,6
<i>500° C</i>			
2.7	-	411	4,9
2.8	-	400	5,0
2.9	-	410	5,1

Τα συμπεράσματα από τις παραπάνω δοκιμές εφελκυσμού είναι τα εξής:

- Η επιμήκυνση που μετρήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι ο αυλός έχει ψαθυροποιηθεί από την γήρανση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.
- Το υλικό ανακτά ένα μέρος της επιμήκυνσης στις δοκιμές σε υψηλότερες θερμοκρασίες, γεγονός που κρίνεται αναμενόμενο.

3.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

3.4.1 Ερπυσμός

Τυπικά ευρήματα ερπυσμού βρέθηκαν στην περιοχή που μελετήσαμε, κυρίως με την μορφή μικροοπών (voids). Αυτές οι μικροοπές περιορίζονται στα πρώτα 2-3 mm από την εσωτερική επιφάνεια του αυλού, ενώ δεν παρουσιάζουν κάποια κατευθυντικότητα ή ομαδοποίηση (clustering), που θα μπορούσε κάτω από κάποιες συνθήκες να δημιουργήσει ρηγματώση του αυλού. Έτσι φαίνεται ότι η βλάβη από ερπυσμό είναι περιορισμένη. Ένα πρόσθετο στοιχείο είναι ότι τα φαινόμενα αυτά οδηγούνται από την περιφερειακή τάση (hoop stress) και επομένως οι τυχόν ρηγματώσεις ερπυσμού αναμένονται να είναι παράλληλες στον άξονα του αυλού. Οι ρηγματώσεις που παρουσιάστηκαν στον συγκεκριμένο αυλό ήταν κάθετες στον άξονα του αυλού. Τα στοιχεία αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι ρηγματώσεις δεν οφείλονται σε κάποιο μηχανισμό ερπυσμού.

3.4.2 Υλικό κατασκευής

Ο μεταλλογραφικός έλεγχος έδειξε ότι το υλικό έχει τυπική δενδριτική δομή με δενδρίτες προσανατολισμένους κατά το πάχος του αυλού και με έντονο διαφορισμό. Επίσης έδειξε ότι ακόμα και μετά τα 10 και πλέον έτη λειτουργίας, το υλικό δεν έχει υποστεί σημαντική βλάβη από ερπυσμό.

Οι αυλοί κατασκευάζονται με φυγοκεντρική χύτευση. Δεν υπάρχουν σημαντικά ευρήματα για σφάλματα από την χύτευση, όπως πόροι, εγκλείσματα ή μικρορωγμές.

Δύο σημεία που πρέπει να τονιστούν είναι ο σχηματισμός δικτύου (network) πρωτογενών καρβιδίων στα σύνορα των κόκκων, με σημαντική πάχυνση των καρβιδίων αυτών και ο σχηματισμός διασποράς δευτερογενών καρβιδίων στο εσωτερικό των κόκκων. Η πάχυνση των πρωτογενών και ο σχηματισμός των δευτερογενών καρβιδίων οφείλεται στην πολύχρονη λειτουργία του αυλού σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που προκαλεί γήρανση (aging) του υλικού. Αναφέρεται ότι ο όρος γήρανση αντιστοιχεί στην καθίζηση του άνθρακα από τον ωστενίτη για τον σχηματισμό περισσότερου ιζήματος, που στην περίπτωση του Manaurite 36X είναι το καρβίδιο. Η γήρανση έχει προκαλέσει απώλεια της ολκιμότητας (ψαθυροποίηση) του υλικού. Οι μηχανικές δοκιμές, σε θερμοκρασία δωματίου, έδειξαν μία

ουσιαστικά μηδενική παραμένουσα επιμήκυνση, σε σύγκριση με το 10-13% της αρχικής επιμήκυνσης που είχε το υλικό πριν ο αυλός τεθεί σε λειτουργία, σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Συνοψίζοντας, σχετικά με την κατάσταση του υλικού κατασκευής, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων έδειξαν:

- Το υλικό δεν περιέχει σφάλματα από την διαδικασία παραγωγής (φυγοκεντρική χύτευση) που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην αστοχία
- Το υλικό έχει υποστεί σημαντική γήρανση
- Η γήρανση αυτή έχει οδηγήσει σε ψαθυροποίηση του υλικού στην θερμοκρασία δωματίου.

Η κατάσταση αυτή δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του υλικού σε ερπυσμό και επομένως την απόδοση (performance) του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ψαθυροποίηση είναι όμως σημαντικός παράγοντας στις περιπτώσεις που το υλικό υφίσταται απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές (trips, shut-downs και start-ups), δηλαδή όταν το υλικό υφίσταται την κατάσταση του θερμικού σοκ (thermal shock).

3.4.3 Ενανθρακωμένη και απανθρακωμένη ζώνη

Η μεταλλογραφική εξέταση έδειξε ότι η εσωτερική επιφάνεια του αυλού στο επάνω τμήμα, πάνω από το pig tail, έχει υποστεί σημαντική ενανθράκωση. Μάλιστα σε αρκετές περιοχές υπάρχουν ενδείξεις metal dusting με αποφλοίωση του υλικού και σχηματισμό κρατήρων. Η ενανθρακωμένη ζώνη έχει βάθος περίπου 0.2 mm. Σε αυτό το επιφανειακό στρώμα ενανθράκωσης υπάρχει μεγάλη πυκνότητα καρβιδίων στο εσωτερικό των κόκκων με αποτέλεσμα η σκληρότητα στην ζώνη αυτή να φθάνει το 200% της μέση τιμής σκληρότητας του υλικού.

Στο υπόλοιπο τμήμα του αυλού, παρατηρήθηκε μία επιφανειακή ζώνη απανθράκωσης, με βάθος 0.2 mm και σκληρότητα περίπου στο 65% της μέση τιμής σκληρότητας του υλικού. Η απανθράκωση αυτή πιθανόν να οφείλεται στην συνεχή ροή υδρογόνου, το οποίο διαφεύγει από το pig tail.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η ρωγμή που προκάλεσε την διαρροή στον αυλό που αστόχησε, αλλά και οι υπόλοιπες ρωγμές που βρέθηκαν κατά την μεταλλογραφική εξέταση

του αυλού της συγκεκριμένης έρευνας, εντοπίζονται στην διεπιφάνεια των δύο περιοχών, δηλαδή της απανθρακωμένης με την ενανθρακωμένη ζώνη. Η ενανθρακωμένη ζώνη έχει διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής από την απανθρακωμένη ζώνη γεγονός που ενισχύει τις θερμικές τάσεις και τον σχηματισμό ρωγμών στην περιοχή αυτή. Μία ακόμα επίδραση της ενανθράκωσης είναι η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων στο υλικό από τον σχηματισμό των καρβιδίων. Τα καρβίδια έχουν μικρότερη πυκνότητα από τον χάλυβα και επομένως καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο από το μέταλλο που αντικαθιστούν, όταν σχηματίζονται. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων, καθιστώντας το υλικό επιρρεπές σε ρηγμάτωση στα τμήματα που, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχει υποστεί ψαθυροποίηση.

3.4.4 Θερμικές τάσεις

Όλες οι ρωγμές που βρέθηκαν με τον μεταλλογραφικό έλεγχο έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά:

- Έχουν όλες τον ίδιο προσανατολισμό, κάθετα στον άξονα του αυλού
- Είναι περικρυσταλλικές κατά μήκος των καρβιδίων
- Βρέθηκαν όλες στην διεπιφάνεια ενανθρακωμένης και απανθρακωμένης περιοχής.

Το γεγονός ότι ο προσανατολισμός των ρωγμών είναι κάθετος στον άξονα του αυλού, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ρωγμές αυτές σχηματίστηκαν κάτω από την επίδραση αξονικών εφελκυστικών τάσεων. Οι τάσεις αυτές προκαλούνται από το ίδιο βάρος του αυλού και κυρίως από τις συστολοδιαστολές κατά την θέρμανση και ψύξη του αυλού (θερμικές τάσεις). Για την αποφυγή υψηλών θερμικών τάσεων, οι αυλοί του reformer είναι αναρτημένοι ώστε να μπορούν να διαστέλλονται και να συστέλλονται ελεύθερα. Παρ' όλα αυτά δεν είναι δυνατή η πλήρης αποφυγή των θερμικών τάσεων, μιας και οι αυλοί κατά την απότομη θέρμανση (start-up) και κατά την απότομη ψύξη (shut-down) εμφανίζουν θερμοκρασιακές κλίσεις (διαφορές θερμοκρασίας) τόσο κατά το μήκος όσο και κατά το πάχος, λόγω των έντονων ρυθμών θέρμανσης ή ψύξης. Οι τάσεις αυτές, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το υλικό έχει ψαθυροποιηθεί από την γήρανση και την παρουσία εσωτερικών τάσεων από την

ενανθράκωση μπορεί να οδηγήσει σε ρηγμάτωση του αυλού. Μάλιστα το φαινόμενο αναμένεται πιο έντονο στην διεπιφάνεια απανθρακωμένης και ενανθρακωμένης ζώνης.

3.4.5 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα πιο πάνω, φαίνεται ότι πρόκειται για θερμικό σοκ, το οποίο προήλθε από τα εξής:

- Ανάπτυξη θερμικών τάσεων λόγω έντονων θερμοκρασιακών κλίσεων
- Ψαθυροποίηση του υλικού λόγω γήρανσης.

Για να υπάρξει αστοχία από θερμικό σοκ πρέπει να υπάρχουν ταυτόχρονα δύο προϋποθέσεις: υψηλές θερμικές τάσεις από σχετικά απότομα shutdowns και start-ups ή από λειτουργικά upsets και υλικό με πολύ χαμηλή ολκιμότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στην περίπτωση των συγκεκριμένων αυλών, φαίνεται ότι ικανοποιούνται και οι δύο προϋποθέσεις.

Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι το φαινόμενο του θερμικού σοκ στον αυλό βρίσκεται στα αρχικά στάδια και δεν έχει εξελιχθεί όσο στον αυλό που αστόχησε. Η επιτάχυνση του φαινομένου στον αυλό που αστόχησε, πιθανόν να οφείλεται σε κάποιο ιδιαίτερο θερμικό ιστορικό του συγκεκριμένου αυλού (π.χ υπερθέρμανση).

3.5 Προτάσεις

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η αστοχία δεν προκλήθηκε από ερπυσμό. Το υλικό μπορεί ακόμα να λειτουργήσει χωρίς πρόβλημα ερπυσμού για αρκετό διάστημα. Όμως η ψαθυροποίηση του υλικού λόγω γήρανσης θέτει κάποιους περιορισμούς σε αυτό το ενδεχόμενο. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν στην ανάπτυξη θερμικών τάσεων που είναι δυνατόν να προκαλέσουν την εμφάνιση του θερμικού σοκ σε άλλους αυλούς. Εφόσον δεν μπορεί να διασφαλιστεί η λειτουργία του συστήματος χωρίς συμβάντα που προκαλούν έντονες θερμοκρασιακές διαφορές, προτείνεται η αντικατάσταση των αυλών σε προγραμματισμένο στάδιο συντήρησης.

Για το διάστημα που μεσολαβεί μέχρι την αντικατάσταση των αυλών, απαιτείται μία συντηρητική αντιμετώπιση που περιλαμβάνει:

- Έλεγχο της αντίστοιχης περιοχής αστοχίας στους αυλούς με NDT, μετά από shutdown.

- Επιβολή χαμηλών ρυθμών ψύξης και θέρμανσης του reformer, τουλάχιστον κάτω από 40°C/h, ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 700°C.

Μία επιπρόσθετη πρόταση είναι να μελετηθεί η αντικατάσταση (σε συμφωνία με τον κατασκευαστή) του επάνω τμήματος των αυλών με άλλο, ώστε να μην δημιουργούνται οι έντονες συνθήκες ενανθράκωσης, που σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης συνέβαλαν στην αστοχία.

4. Αστοχία Χάλυβα Μπιγιέτας

4.1 Εισαγωγή

Το Εργαστήριο Υλικών παρέλαβε από εταιρία θερμικής επεξεργασίας χαλύβων δείγματα προβληματικού χάλυβα. (Εικόνα 1) που αποτελούσαν τμήμα μιας ισχυροποιημένης σφυρήλατης ράβδου διαμέτρου 450mm και μήκους περίπου 5800mm.



Εικόνα 4.1: Αρχικά δείγματα προβληματικού χάλυβα.

Το πρόβλημα παρουσιάστηκε όταν κατά την κοπή της ράβδου διαμετρικά, έσπασε επανειλημμένα η κορδέλα του μηχανήματος κοπής. Η επιστολή της εταιρίας αναφέρεται στον κόκκινο δακτύλιο που διακρίνεται καθώς και στον διαφορετικό χρωματισμό του υλικού εκατέρωθεν αυτού. Αναφέρεται επίσης ότι η μελέτη της εταιρίας έδειξε ότι το πρόβλημα ήταν ο διαφορισμός του υλικού, κάτι το οποίο παρουσιάστηκε μόνο στη μισή διατομή του υλικού,

δηλαδή το υπόλοιπο ημικύκλιο από αυτό που στάλθηκε δεν παρουσιάζει κανένα πρόβλημα. Τέλος, σημειώνεται ότι πέραν της ανόπτησης του χαλυβουργείου, έγινε και από την εταιρία μία ανόπτηση στους 450° C για 8 h.

4.1.1 Ατέλειες στην μικροδομή και διαφορισμός των χυτών

Κατά τη χύτευση, το υγρό μέταλλο εισάγεται στο καλούπι, όπου στερεοποιείται. Εάν με τη χύτευση προσδίδεται στο στερεό και το τελικό του σχήμα, τότε το στερεό ονομάζεται χυτό (casting). Εάν όμως το στερεοποιημένο στερεό αποτελεί ένα ημιέτοιμο προϊόν που πρόκειται να υποβληθεί σε άλλες κατεργασίες διαμορφώσεως (π.χ. σφυρηλάτηση ή διέλαση), για να αποκτήσει το τελικό του σχήμα και ιδιότητες, τότε ονομάζεται πλίνθωμα (ingot) ή μπιγιέτα (billet). Και στις δύο περιπτώσεις η μικροδομή του στερεοποιημένου μετάλλου αποτελείται από τρεις διαφορετικές ζώνες, που αφορούν στη μορφολογία και το μέγεθος των κόκκων: την εξωτερική ψυχρή ζώνη (chill zone), την κιονοειδή ζώνη (columnar zone) και την κεντρική ισοαξονική ζώνη (equiaxed zone). Η ψυχρή ζώνη οφείλει το όνομα της στο γεγονός ότι το υγρό μετά την εισαγωγή του στο καλούπι ψύχεται απότομα στα σημεία, όπου έρχεται σε επαφή με τα ψυχρά τοιχώματα του καλουπιού. Η ταχύτητα πυρηνώσεως είναι μεγάλη και σχηματίζονται πολλοί μικροί κρύσταλλοι. Εάν η θερμοκρασία εισαγωγής του υγρού στο καλούπι είναι μικρή, τότε όλο το υγρό είναι δυνατόν να βρεθεί κάτω από τη θερμοκρασία liquidus, οπότε οι μικροί κρύσταλλοι της ψυχρής ζώνης αναπτύσσονται ενώ ταυτόχρονα σχηματίζονται νέοι κρύσταλλοι σε όλη τη μάζα του υγρού. Στην περίπτωση αυτή όλο το χυτό θα έχει ισοαξονική δομή.

Εάν αντίθετα η θερμοκρασία εισαγωγής του υγρού είναι μεγάλη, τότε στο κέντρο του χυτού η θερμοκρασία του υγρού υπερβαίνει την liquidus, γεγονός που δεν επιτρέπει την πυρηνώση νέων κρυστάλλων. Έτσι σχηματίζονται μόνο οι κρύσταλλοι της ψυχρής ζώνης. Στη συνέχεια οι κρύσταλλοι αυτοί αναπτύσσονται δενδριτικά. Εδώ ο ρόλος που παίζει η συστασιακή επέρψυξη είναι σημαντικός. Η συστασιακή υπέρψυξη στο ένα άκρο του χυτού δεν αλληλεπιδρά με αυτή στο απέναντι άκρο και έτσι οι δενδρίτες αναπτύσσονται σε ελεύθερα. Οι δενδρίτες αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις, π.χ. <100> για τα μέταλλα του κυβικού συστήματος. Οι κρύσταλλοι με τη διεύθυνση <100> παράλληλη με τη διεύθυνση της θερμορής αναπτύσσονται γρηγορότερα από τους δενδρίτες άλλων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Έτσι δημιουργείται η κιονοειδής δομή. Με την πρόοδο της

στερεοποιήσεως, το κέντρο του χυτού εμπλουτίζεται στο δεύτερο συστατικό προκαλώντας ισχυρή συστασιακή υπέρψυξη. Η κατάσταση αυτή οδηγεί στην πυρήνωση πολλών νέων κρυστάλλων, που αναπτύσσονται μεν δενδριτικά αλλά όχι κατευθυντικά δημιουργώντας έτσι την ισοαξονική ζώνη. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ο σχηματισμός της ισοαξονικής ζώνης στο κέντρο του χυτού οφείλεται τόσο σε πυρήνωση νέων κρυστάλλων όσο και σε ένα μηχανισμό πολλαπλασιασμού κρυστάλλων. Ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει την αποκοπή δευτερογενών ή τριτογενών κλάδων των δενδριτών, που μεταφέρονται από ρεύματα συναγωγής στο κεντρικό τμήμα του χυτού. Τα αποκομμένα τμήματα των δενδριτών αναπτύσσονται και συμβάλουν στη δημιουργία της κεντρικής ισοαξονικής ζώνης. Εδώ ο ρόλος της συναγωγής είναι σημαντικός. Αφ'ενός μεταφέρει τα αποκομμένα τμήματα των δενδριτών και αφ'ετέρου διασκορπίζει τη θερμότητα του υπέρθερμου υγρού έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάπτυξη των κρυστάλλων στο κέντρο του χυτού.

Οι συνθήκες στερεοποιήσεως επιδρούν σημαντικά στη μορφολογία της δενδριτικής δομής και ιδιαίτερα στην απόσταση μεταξύ των δενδριτικών κλάδων, DAS (dendrite arm spacing). Όσο μικρότερο το DAS, τόσο πιο λεπτόκοκκη θα είναι η μικροδομή του χυτού, γεγονός που βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες. Η ταχύτητα ψύξεως χαρακτηρίζεται από το γινόμενο GR, το οποίο έχει μονάδες °C/Sec. Αύξηση της ταχύτητας ψύξεως, δηλαδή του γινομένου GR, οδηγεί σε μείωση του DAS με συνέπεια την εκλέπτυνση της δενδριτικής δομής σύμφωνα με τη σχέση:

$$DAS = \mu_1 / (GR)^n$$

όπου μ_1 μία σταθερά και ο εκθέτης n είναι περίπου ίσος με $\frac{1}{2}$. Εάν θεωρήσουμε ως ΔT_s το θερμοκρασιακό εύρος της στερεοποιήσεως (δηλαδή τη διαφορά liquidus και solidus) τότε ο τοπικός χρόνος στερεοποιήσεως είναι:

$$t_f = \Delta T_s / GR$$

οπότε έχουμε:

$$DAS = \mu_2 t_f^n$$

δηλαδή το DAS αυξάνεται με τον τοπικό χρόνο στερεοποιήσεως.

Σε πολλά βιομηχανικά κράματα είναι δυνατόν μία από τις τρεις ζώνες, που αναφέραμε παραπάνω να απουσιάζει. Στους ανοξείδωτους χάλυβες η μικροδομή είναι συνήθως κιονοειδής, ενώ στα κράματα Al-Si, που έχουν υποστεί εκτέπνωση κόκκου, η μικροδομή είναι ισοαξονική. Αντίθετα στους χαμηλά κραματωμένους χάλυβες παρατηρούνται και οι τρεις ζώνες. Τέλος, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η μικροδομή που περιγράψαμε παραπάνω, είναι η μικροδομή του στερεοποιημένου μετάλλου (as-cast). Συνήθως η δομή αυτή τροποποιείται με θερμικές κατεργασίες, οι οποίες ακολουθούν την χύτευση. Οι κατεργασίες αυτές απιφέρουν μετακίνηση των συνόρων των κόκκων ή ενεργοποιούν διάφορους μετασχηματισμούς φάσεων για τη διαμόρφωση της τελικής μικροδομής.

Ένα σημαντικό επακόλουθο της στερεοποίησης ενός χυτού είναι η μεταβολή της συστάσεως από σημείο σε σημείο. Αυτή η ανομοιομορφία της συστάσεως ονομάζεται διαφορισμός (segregation). Εάν η ανομοιομορφία εμφανίζεται στην κλίμακα των διαστάσεων του χυτού, τότε πρόκειται για μακροδιαφορισμό. Εάν η μεταβολή της συστάσεως εντοπίζεται στην κλίμακα των δενδριτικών περιοχών, τότε πρόκειται για μικροδιαφορισμό. Ο μακροδιαφορισμός οφείλεται σε διάφορους παράγοντες κυριότεροι των οποίων είναι η συστολή του χυτού λόγω της στερεοποίησης, διαφορές πυκνότητας στο ενδοδενδριτικό υγρό καθώς και ρεύματα συναγωγής, που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές διαφορές στο υγρό. Οι παραπάνω παράγοντες προκαλούν ροή μετάλλου σε μεγάλες αποστάσεις κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Η βαρύτητα είναι ένας άλλος παράγοντας που προκαλεί ροή ενδοδενδριτικού υγρού. Για παράδειγμα, στο κράμα Al-Cu κατά τη στερεοποίηση απορρίπτεται χαλκός στο υγρό. Το γεγονός αυτό προκαλεί αύξηση της πυκνότητας του υγρού, το οποίο ρέει προς το κάτω τμήμα του χυτού. Σε άλλες περιπτώσεις, το στερεό ως πυκνότερο μετατοπίζεται προς τα κάτω σε σχέση με το υγρό. Έτσι προκύπτει μία περιοχή, όπου η σύσταση είναι μικρότερη από την μέση σύσταση του χυτού (αρνητικός διαφορισμός). Τα φαινόμενα αυτά ενισχύονται με το μέγεθος του χυτού ή της μπιγιέτας.

- Μικροδιαφορισμός

Ο μικροδιαφορισμός εντοπίζεται σε μεταβολές συστάσεως στις ενδοδενδριτικές περιοχές και οφείλεται στην απόρριψη του δεύτερου συστατικού (π.χ. χαλκός στο κράμα Al-Cu) στο ενδοδενδριτικό υγρό με την πρόοδο της στερεοποίησης. Ο μικροδιαφορισμός είναι πιο έντονος στα όρια των κόκκων της κιονοειδούς ζώνης. Μάλιστα ο μικροδιαφορισμός

ορισμένων στοιχείων, όπως τα Mn και S στο χάλυβα, παραμένει και μετά από την κατεργασία θερμής σφυρηλάτησης ή θερμής ελάσεως και προσδίδει στη δομή μία στρωματική μορφολογία (banding).

Ο μικροδιαφορισμός είναι δυνατόν να περιγραφεί από την εξίσωση του Scheil:

$$c_s^* = kc_o(1-f_s)^{k-1}$$

όπου, c_s^* : η σύσταση της διεπιφάνειας που περιβάλλει στερεό ποσοστού f_s ,

k : ο συντελεστής διαχωρισμού (που είναι ο λόγος της συστάσεως του στερεού c_s^* προς αυτήν του υγρού c_L^* για μία δεδομένη θερμοκρασία T^*),

c_o : η αρχική σύσταση του υγρού.

Η σχέση αυτή δεν εφαρμόζεται σε όλο το χυτό, αλλά σε μία μικρή περιοχή της τάξεως του DAS. Η σχέση επίσης προβλέπει ότι κάποιο ποσοστό ευτηκτικής θα σχηματίσει τελικά, ανεξάρτητα από την αρχική σύσταση του υγρού c_o ακόμη και όταν το c_o είναι μικρότερο από το όριο στερεάς διαλυτότητας του δεύτερου συστατικού.

Ο μικροδιαφορισμός αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στα χυτά, διότι επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες, εξαιτίας της ανομοιογένειας στην κατανομή των κραματικών στοιχείων στην κλίμακα του κόκκου. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο όταν μετά την χύτευση πρόκειται να ακολουθήσουν και άλλες θερμικές κατεργασίες για την ισχυροποίηση του κράματος. Στην περίπτωση αυτή η απόκριση του υλικού στις κατεργασίες αυτές δεν είναι βέλτιστη.

- Μακροδιαφορισμός

Ο διαφορισμός σε μακροσκοπική κλίμακα προκαλείται από διάφορους μηχανισμούς που εξαρτώνται από τον τρόπο ψύξης. Ωστόσο, ο βασικός παράγοντας είναι η συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών που έχουν απορριφθεί, μέσα από τη μεταφορά σε μεγάλες σχετικά αποστάσεις μέσα στο χυτό. Στην απλούστερη περίπτωση, που συνήθως αποκαλείται ομαλός διαφορισμός, τα τελευταία προς ψύξη μέρη του υγρού περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις διαλυμένων στοιχείων, ενώ ο όρος αρνητικός διαφορισμός χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αντίθετη κατάσταση.

Επειδή η διάχυση είναι σε μικρό βαθμό σχετική με τις αποστάσεις, η επέκταση του μικροδιαφορισμού εξαρτάται μερικώς από το μέγεθος της ανάμειξης λόγω των στροβίλων που προκαλούνται από την έκχυση και λόγω της ροής θερμότητας εξαιτίας των τοπικών διαφορών θερμοκρασίας και πυκνότητας. Άλλοι μηχανισμοί περιλαμβάνουν την κίνηση αναπτυσσόμενων κρυστάλλων από τη θέση πυρήνωσης (nucleation sites) λόγω βαρύτητας ή στροβιλισμών και την μεγάλη κλίμακα τριχοειδούς ροής του υγρού κατά το τελικό στάδιο ψύξης. Αυτό το φαινόμενο επηρεάζει την θέση των ζωνών μακροδιαφορισμού και μπορεί να αλλάξει ριζικά τον βασικό τύπο τους.

- Διαφορισμός λόγω βαρύτητας

Οι θέσεις των ζωνών μακροδιαφορισμού συχνά επηρεάζονται από την κίνηση μάζας ιζηματοποιημένης φάσης λόγω διαφοράς πυκνότητας με το υπάρχον υγρό. Οι μεταλλογραφικοί κρύσταλλοι που αναπτύσσονται ανεξάρτητα στη μάζα του υγρού τείνουν να βυθίζονται και να σχηματίζουν ένα αντίστοιχο επάνω τμήμα με υγρό πλούσιο σε διαλυμένες ουσίες, ενώ οι μη μεταλλικές ενώσεις ανέρχονται ή βυθίζονται προς τη δημιουργία τοπικών συγκεντρώσεων. Ο διαφορισμός λόγω βαρύτητας εμφανίζεται κυρίως σε μεγάλα τεμάχια, όπου η στερεή φάση παραμένει στο υγρό για παρατεταμένο χρονικό διάστημα.

- Αρνητικός (αντίστροφος) διαφορισμός

Κράματα που έχουν έμφυτη προδιάθεση για διαφορισμό συχνά παρουσιάζουν ένα είδος μικροδιαφορισμού στον οποίο η υψηλή συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών που αναμενόταν στην κεντρική περιοχή του χυτού εμφανίζεται στην εξωτερική ζώνη ή ακόμη και στη επιφάνεια.

Είναι διαπιστωμένο ότι ο αντίστροφος διαφορισμός συμβαίνει λόγω της ροής υγρού υψηλό σε διαλυμένες ύλες διαμέσου δενδριτικών καναλιών, από βαθύτερες περιοχές μέσα στο χυτό όπου έχει σχηματιστεί με τη συνήθη διαδικασία της διαφορικής (differential) ψύξης. Η κίνηση είναι αποτέλεσμα της τριχοειδούς ή δενδριτικής τροφοδοσίας κατά τη συνεχή συστολή των εξωτερικών στρωμάτων των κόκκων και οξύνεται από τη ιζηματοποίηση διαλυμένων αερίων η οποία αυξάνει την πίεση τροφοδοσίας. Παρά τον αναγνωρισμένο ρόλο της στον

αντίστροφο διαφορισμό, η μεγάλη σημασία αυτής της ενδοδενδριτικής ροής υγρού εκτιμήθηκε αργότερα.

- Ομογενοποίηση

Η ομογενοποίηση περιλαμβάνει τη θέρμανση του χυτού σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία και τη διατήρηση του για αρκετό χρονικό διάστημα. Έτσι οι βαθμίδες στη συγκέντρωση σταδιακά εξαλείφονται με διάχυση, υπό τον όρο ότι οι αποστάσεις είναι μικρές, όπως στον μικροδιαφορισμό. Ο χρόνος που απαιτείται για την ομογενοποίηση είναι ανάλογος με το d^2 , όπου d είναι η απόσταση των διαφορετικών συνθέσεων. Η ταχύτητα (coarseness) συνεπώς ενός καθαρού χυτού τεμαχίου επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο, για παράδειγμα, μια δομή με απόσταση δενδριτικών κλάδων 1mm απαιτεί 100 φορές περισσότερο χρόνο ομογενοποίησης από εκείνη με 0,1mm. Γενικά, όσο μεγαλύτερη η μάζα και όσο μικρότερος ο ρυθμός ψύξης του χυτού, τόσο μεγαλύτερος χρόνος απαιτείται. Η υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία είναι απαραίτητα σύμφωνη με άλλες μεταλλουργικές απαιτήσεις, μιας και ο βαθμός διάχυσης αυξάνεται εκθετικά με την θερμοκρασία, σύμφωνα με τη σχέση:

$$D=D_0e^{-Q/RT}$$

Όπου, D : συντελεστής διάχυσης συστήματος

T : απόλυτη θερμοκρασία

Q, R : εξαρτώνται από τη θερμοκρασία

Πρακτικά δεν υπάρχει πιθανότητα να εξαλειφθεί ο μακροδιαφορισμός με θερμική κατεργασία, εξαιτίας των μεγάλων αποστάσεων.

4.1.2 Υλικό Κατασκευής

Το υλικό της ράβδου είναι ισχυροποιημένος χάλυβας 15CrNi6, με χημικές και μηχανικές ιδιότητες που δίνονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.1: Χημική Ανάλυση 15CrNi6 (% κ.β.)

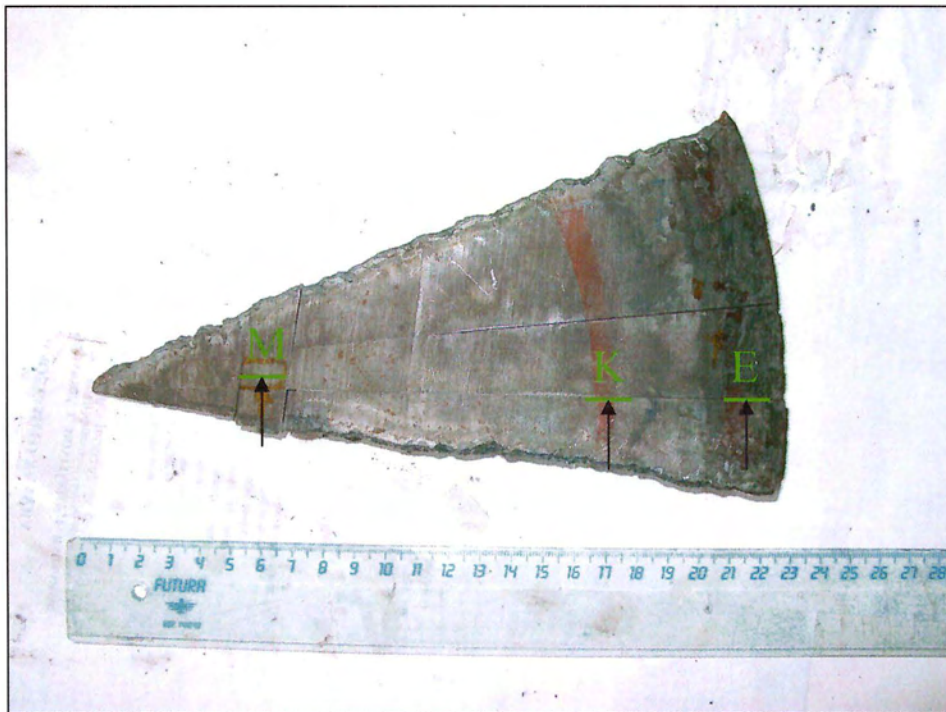
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0,154	0,482	0,254	0,018	0,006	1,550	1,450

Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες 15CrNi6

Αντοχή Εφελκυσμού	Όριο διαρροής	Παραμόρφωση	Μείωση Διατομής	Σκληρότητα
125,1 kg/mm ²	93,8 kg/mm ²	11,3 %	52,4 %	154 HB

4.2 Επιλογή δοκιμίων

Από τα τμήματα που παραλάβαμε επιλέχθηκε αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 4.2 για λόγους ευκολίας κατά την κοπή των δοκιμίων. Αφαιρέθηκε αρχικά η ΘΕΖ και κόπηκαν τρία δοκίμια σε ακτινική διεύθυνση. Ένα δοκίμιο κόπηκε εσωτερικά από τον κόκκινο δακτύλιο (M), ένα εξωτερικά στην περιοχή με την πιο σκούρα απόχρωση (E) και ένα ακριβώς επάνω στον δακτύλιο (K). Οι γραμμές στην εικόνα δείχνουν το σημείο κοπής των δοκιμίων και τα βελάκια την πλευρά η οποία μελετήθηκε μικροσκοπικά.



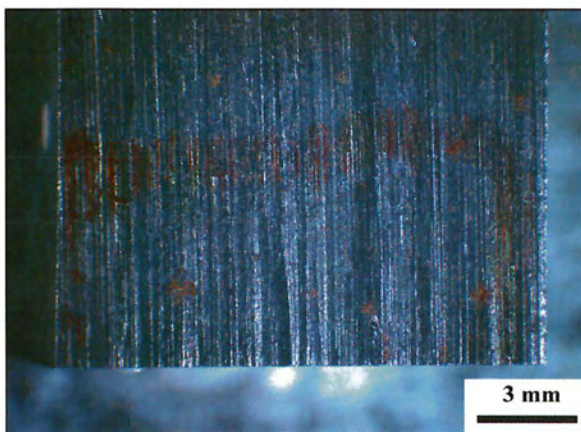
Εικόνα 4.2: Θέσεις κοπής των δοκιμίων

4.3 Αποτελέσματα

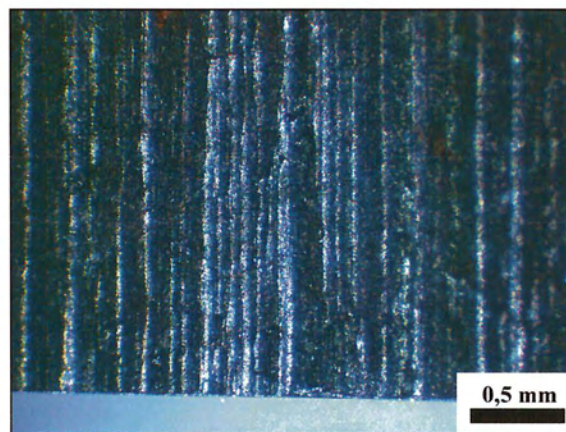
4.3.1 Οπτικός έλεγχος

- Δοκίμιο M

Κατά τον οπτικό έλεγχο του δοκιμίου M, που λήφθηκε εσωτερικά από τον κόκκινο δακτύλιο, δεν παρατηρήθηκε κάτι αξιοσημείωτο στην επιφάνεια του, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 4.3 και 4.4.



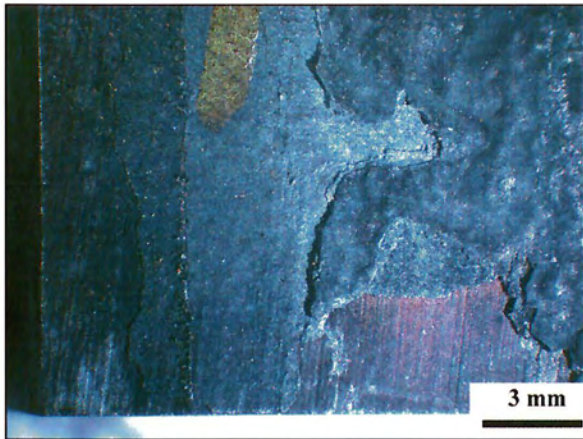
Εικόνα 4.3: Επιφάνεια κοπής δοκιμίου M (6,5x)



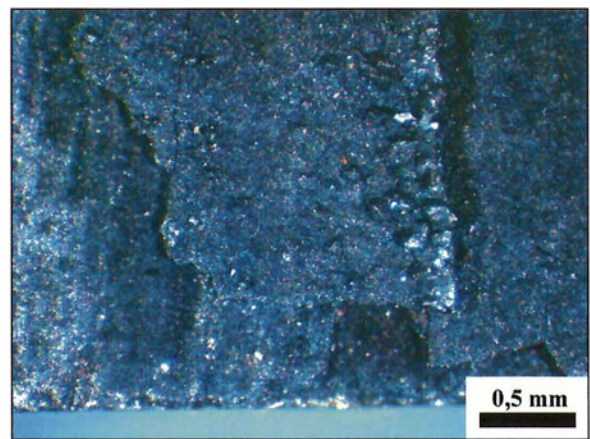
Εικόνα 4.4: Επιφάνεια κοπής δοκιμίου M (40x)

- Δοκίμιο E

Το δοκίμιο E λήφθηκε εξωτερικά του κόκκινου δακτυλίου, εκεί όπου η επιφάνεια φαίνεται μακροσκοπικά τουλάχιστον να έχει ένα πιο σκούρο χρωματισμό από το υπόλοιπο δείγμα.. Αρχικά φαίνεται να μην αποτελεί μέρος του υλικού ή κάποια διάβρωση αυτού (Εικόνες 4.5 και 4.6).



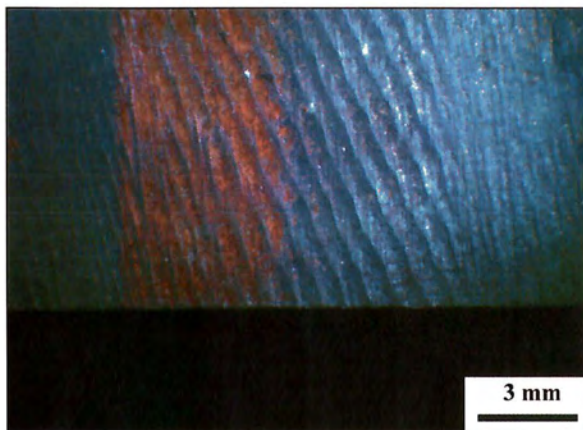
Εικόνα 4.5: Επιφάνεια κοπής δοκιμίου E (6,5x)



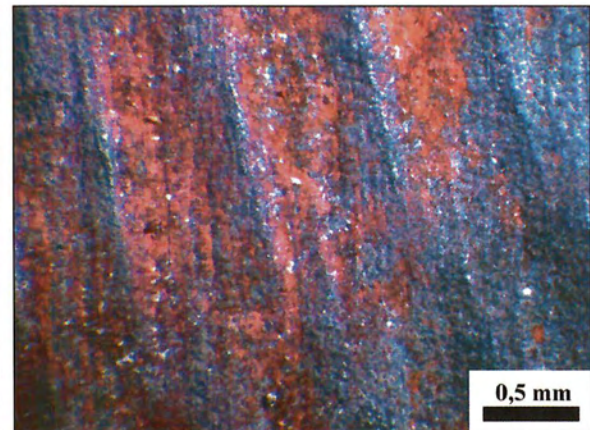
Εικόνα 4.6: Επιφάνεια κοπής δοκιμίου E (40x)

- Δοκίμιο K

Το δοκίμιο K κόπηκε έτσι ώστε να μελετηθεί ο κόκκινος δακτύλιος. Από το στερεοσκόπιο δεν φάνηκε αυτός ο χρωματισμός να αποτελεί συνέπεια κάποιας διαφοροποίησης στη δομή, παρά κάτι επιφανειακό.



Εικόνα 4.7: Επιφάνεια κοπής δοκιμίου E (6,5x)



Εικόνα 4.8: Επιφάνεια κοπής δοκιμίου E (40x)

4.3.2 Μεταλλογραφικός έλεγχος

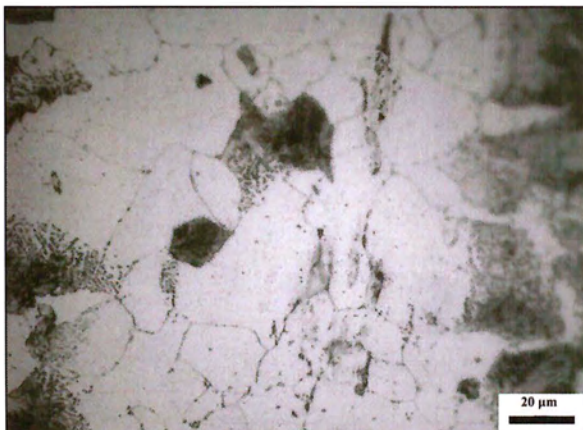
- Δοκίμιο M

Κατά τον μεταλλογραφικό έλεγχο του δοκιμίου M, το οποίο προέρχεται από το εσωτερικό μέρος του δείγματος έγιναν φανερές κάποιες ζώνες διαφορισμού (Εικόνα 4.9), οι

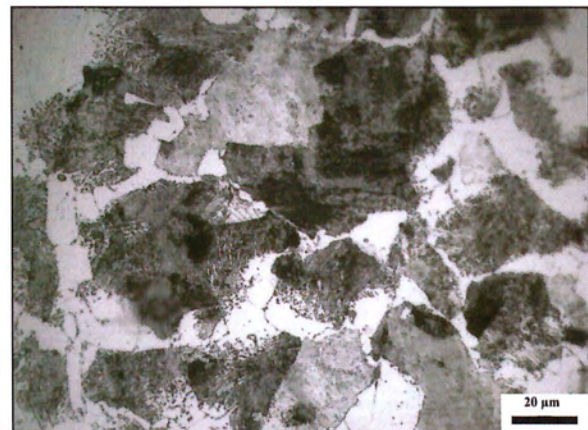
οποίες φαίνεται να έχουν μια ορισμένη κατευθυντικότητα παράλληλη με τον άξονα της μπιγιέτας. Στις Εικόνες 4.10 και 4.11 φαίνεται καλύτερα η δομή και οι κόκκοι της λευκής και της άσπρης ζώνης αντίστοιχα. Τέλος, στην επάνω επιφάνεια του δοκιμίου παρατηρήθηκε ένα λευκό στρώμα υλικού το οποίο απουσίαζε από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου (Εικόνες 4.12 και 4.13).



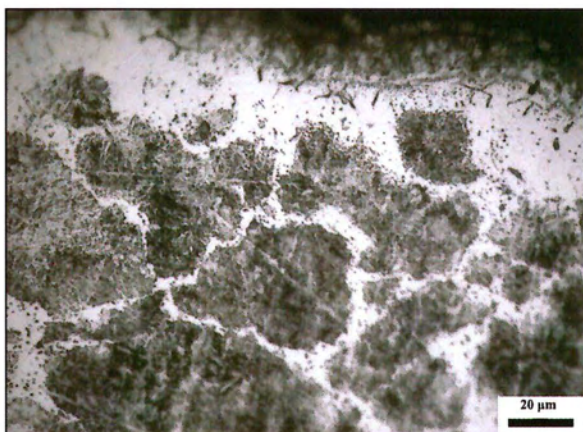
Εικόνα 4.9: Δομή δοκιμίου M με εμφανείς τις ζώνες διαφορισμού (50x)



Εικόνα 4.10: Λευκή ζώνη δοκιμίου M (1000x)



Εικόνα 4.11: Σκούρα ζώνη διαφορισμού στο δοκίμιο M (1000x)



Εικόνα 4.12: Λευκό στρώμα στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου M (1000x)



Εικόνα 4.13: Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου M (1000x)

- Δοκίμιο E

Στο δοκίμιο E που προέρχεται από το εξωτερικό μέρος του δείγματος, παρατηρήθηκε η ίδια δομή με τις ανάλογες σκούρες ζώνες διαφορισμού, αλλά σε αυτή την περίπτωση ήταν πιο πυκνές (Εικόνα 4.14). Επίσης στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου υπήρχε ένα λευκό στρώμα, το οποίο δεν υπήρχε στην κάτω (Εικόνες 4.15 και 4.16). Μελετήθηκε ιδιαίτερα η περιοχή με το σκούρο χρωματισμό που είχε παρατηρηθεί μακροσκοπικά, αλλά τελικά δεν αποτελούσε μέρος του υλικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.18.



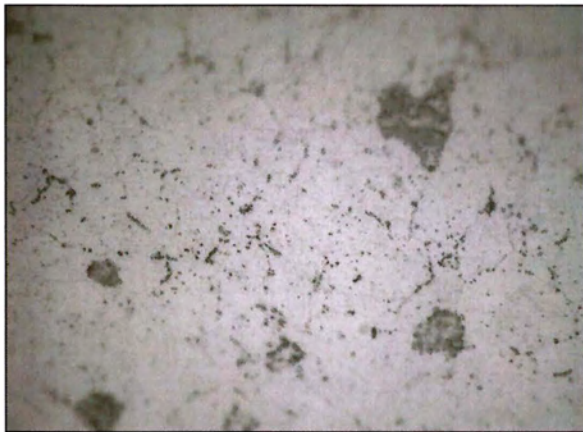
Εικόνα 4.14: Δομή δοκιμίου E με πυκνές σκούρες ζώνες διαφορισμού (50x)



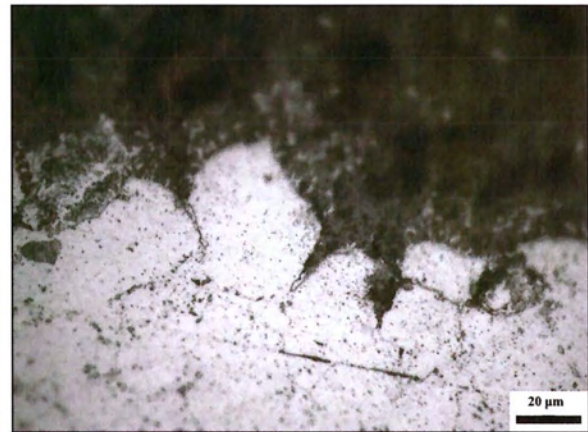
Εικόνα 4.15: Επάνω επιφάνεια δοκιμίου E με ένα λευκό στρώμα εξωτερικά (50x)



Εικόνα 4.16: Κάτω επιφάνεια δοκιμίου E (50x)



Εικόνα 4.17: Λευκή περιοχή στην επιφάνεια του δοκιμίου E (1000x)



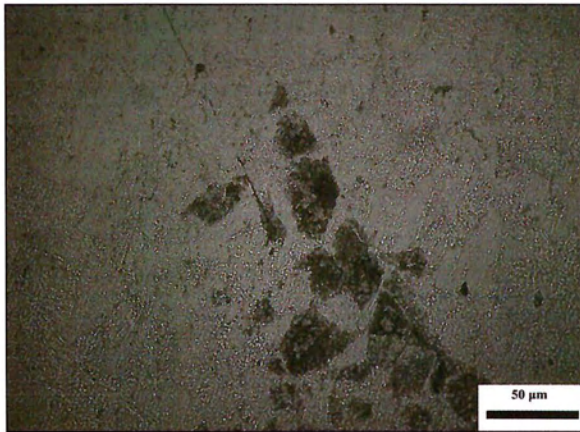
Εικόνα 4.18: Μέρος όπου υπήρχε σκούρος χρωματισμός της επιφάνειας μακροσκοπικά (1000x)

- Δοκίμιο K

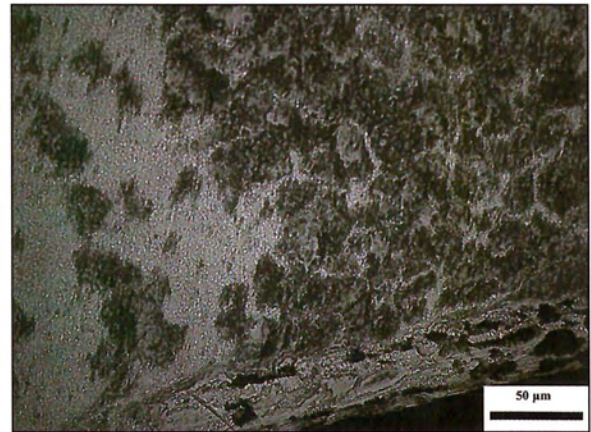
Στο δοκίμιο K, το οποίο κόπηκε ακριβώς επάνω στον κόκκινο δακτύλιο, δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφορά στη δομή σε σχέση με τα άλλα δύο δοκίμια (Εικόνα 4.19). Και σε αυτό το τμήμα υπήρχε μια λευκή περιοχή στην επάνω επιφάνεια χωρίς να υπάρχει στην κάτω (Εικόνες 4.20 και 4.21).



Εικόνα 4.19: Δομή δοκιμίου K στο σημείο με τον κόκκινο δακτύλιο (50x)



Εικόνα 4.20: Επάνω επιφάνεια δοκιμίου K (1000x)



Εικόνα 4.21: Κάτω επιφάνεια δοκιμίου K (1000x)



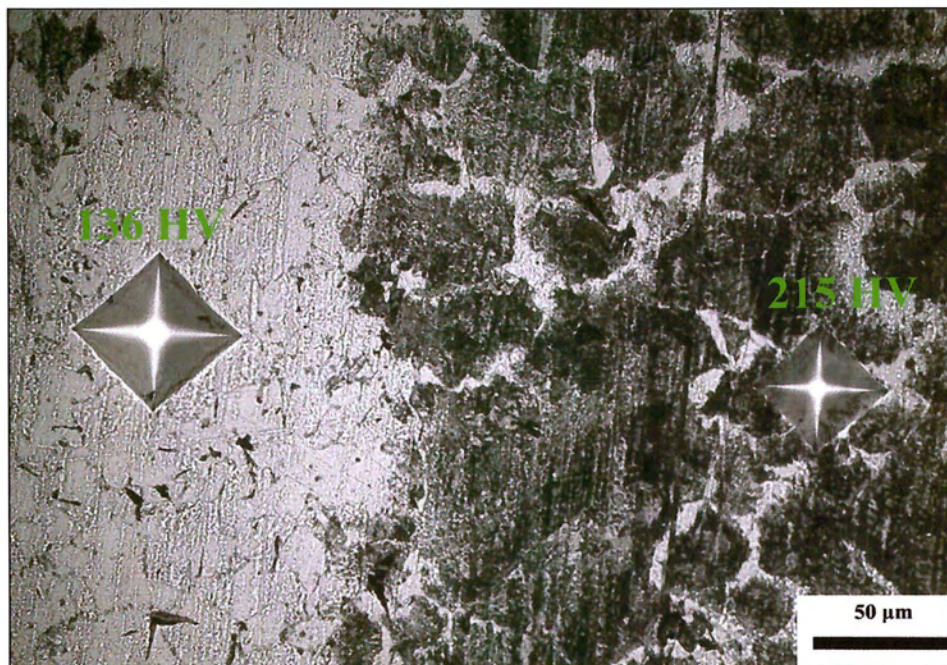
Εικόνα 4.22: Πάνω περιοχή στο τμήμα με τον κόκκινο δακτύλιο (1000x)



Εικόνα 4.23: Σημείο στη μέση περίπου του δοκιμίου στο τμήμα με τον κόκκινο δακτύλιο (1000x)

4.3.3 Μικροσκληρομέτρηση

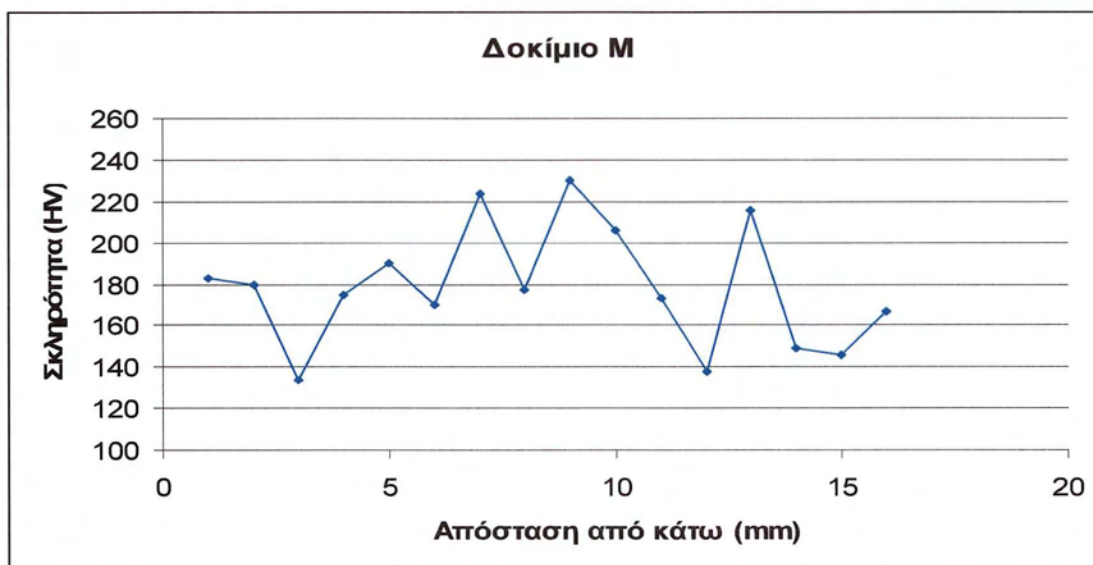
Αρχικά έγιναν κάποιες μετρήσεις στις δύο ζώνες της δομής του υλικού και φωτογραφήθηκαν. Παρατηρείται εύκολα ότι η σκούρα περιοχή έχει μεγαλύτερη σκληρότητα από το υπόλοιπο υλικό (Εικόνα 4.24).



Εικόνα 4.24. Σκληρομέτρηση της λευκής και της σκούρας ζώνης (500x)

- Δοκίμιο M

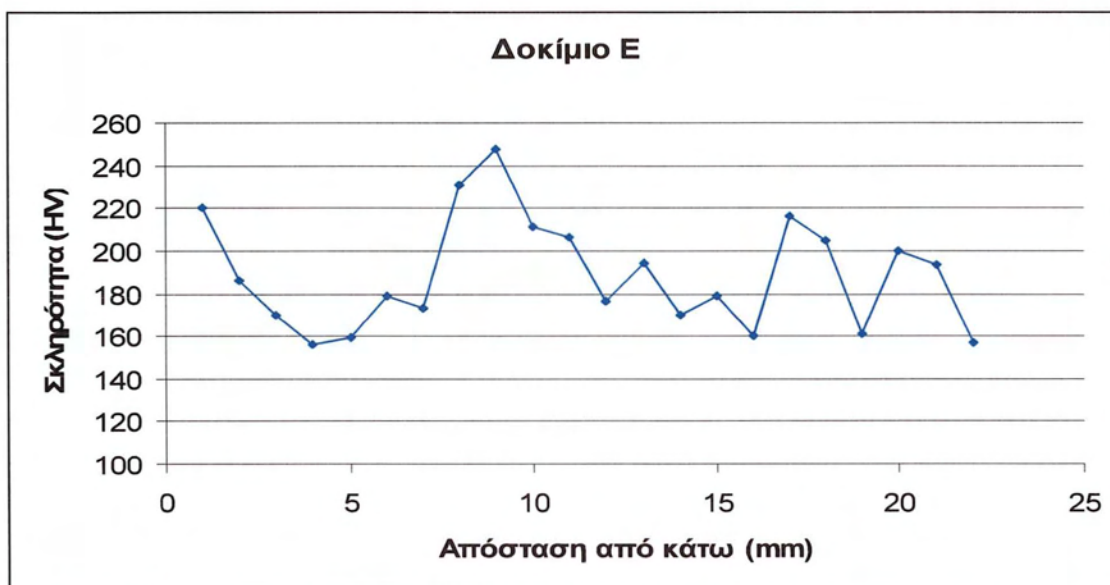
Μετρήθηκε η σκληρότητα στην επιφάνεια του δοκιμίου, ξεκινώντας από το κάτω μέρος προχωρώντας προς το επάνω με απόσταση μετρήσεων 1mm (Διάγραμμα 4.1). Οι τιμές δεν φαίνεται να μεταβάλλονται σύμφωνα με την απόσταση από το κάτω μέρος. Οι όποιες αποκλίσεις παρατηρούνται ανάμεσα σε μετρήσεις που ήταν μέσα στη λευκή ζώνη και σε αυτές στην σκούρα ζώνη διαφορισμού.



Διάγραμμα 4.1: Σκληρότητα υλικού στο δοκίμιο M, με την απόσταση να μετριέται από το κάτω προς το πάνω τμήμα του δοκιμίου

- Δοκίμιο E

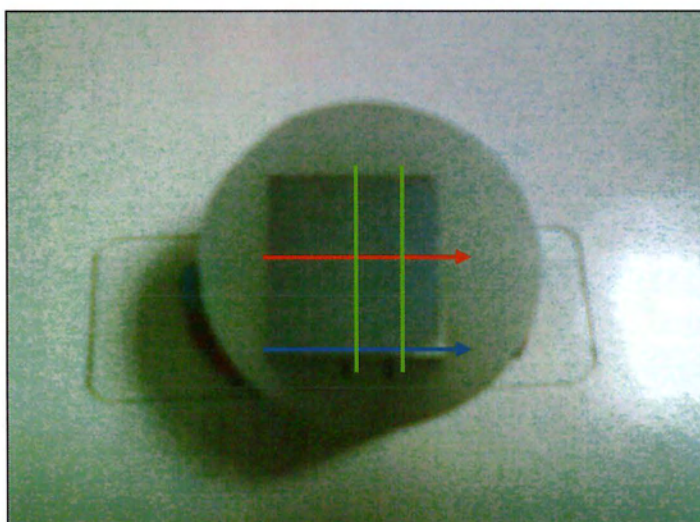
Η ίδια ενέργεια έγινε και με το δοκίμιο E, δηλαδή μετρήθηκε η σκληρότητα στην επιφάνεια του δοκιμίου ξεκινώντας από κάτω και με απόσταση ανάμεσα στις μετρήσεις 1mm (Διάγραμμα 4.2). Οι τιμές και πάλι δεν διαφοροποιήθηκαν σε σχέση με την απόσταση.



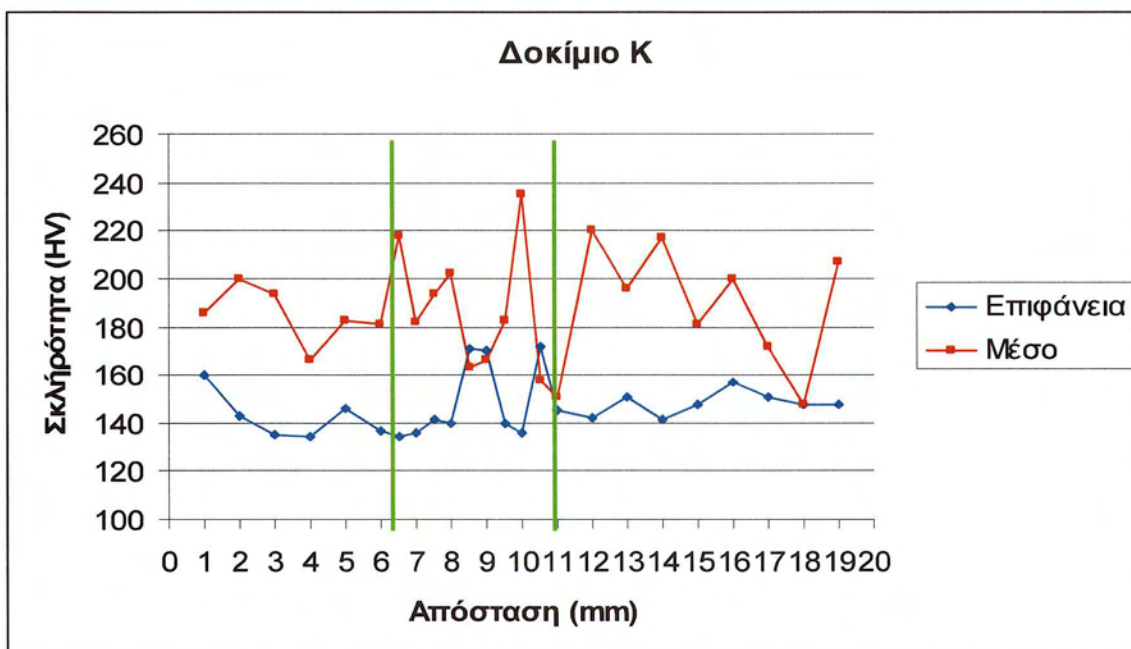
Διάγραμμα 4.2: Σκληρότητα υλικού στο δοκίμιο E, με την απόσταση να μετριέται από το κάτω προς το πάνω τμήμα του δοκιμίου

- Δοκίμιο K

Στο δοκίμιο K έγιναν δύο σειρές μετρήσεων, αυτή τη φορά από το εσωτερικό προς το εξωτερικό τμήμα του δοκιμίου, και κατά συνέπεια του αρχικού δείγματος. Η μία έγινε στην επάνω επιφάνεια του δοκιμίου μέσα στην λευκή περιοχή και η άλλη κεντρικά του δοκιμίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24.5. Με πράσινο χρώμα οριοθετείτε η περιοχή όπου εμφανιζόταν ο κόκκινος δακτύλιος. Ανάλογα, στο Διάγραμμα 4.3 όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα, μέσα στην πράσινη ζώνη είναι οι μετρήσεις που πάρθηκαν στον κόκκινο δακτύλιο. Είναι φανερό ότι οι μετρήσεις στην επιφάνεια είχαν πιο χαμηλές τιμές από εκείνες στο μέσο, καθώς στο σύνολο τους ήταν πάνω σε λευκή ζώνη του υλικού σε αντίθεση με το μέσο. Τέλος, δεν παρατηρήθηκε καμία αλλαγή στις τιμές των μετρήσεων που έγιναν μέσα στην περιοχή του κόκκινου δακτυλίου.



Εικόνα 4.25: Δοκίμιο K, με τις ευθείες πάνω στις οποίες πάρθηκαν οι δύο σειρές μετρήσεων



Διάγραμμα 4.3: Σκληρότητα του υλικού στο δοκίμιο Κ, με την απόσταση να μετριέται από το εσωτερικό του δοκιμίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25, στην επιφάνεια (μπλε) και στο μέσο του (κόκκινο)

4.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα του μεταλλογραφικού ελέγχου παρατηρούμε ότι και τα τρία δοκίμια παρουσιάζουν την ίδια δομή υλικού. Η μόνη ιδιαίτερη παρατήρηση που θα μπορούσε να γίνει είναι ότι στο μεσαίο και στο εξωτερικό δοκίμιο (Κ και Ε αντίστοιχα) το υλικό φαίνεται να είναι πιο πλούσιο σε άνθρακα.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης, παρατηρούμε ότι στην επιφάνεια και των τριών δοκιμίων παρουσιάζεται μία απανθρακωμένη ζώνη. Στο βασικό μέρος του μετάλλου όμως, δεν υπάρχει διαφορά στην σκληρότητα. Ειδικότερο στο κεντρικό μέρος της μπιγιέτας, όπου αναφέρθηκε ότι εμφανίστηκε το πρόβλημα, η σκληρότητα στον κόκκινο δακτύλιο είναι μέσα στις προδιαγραφές του υλικού.

Συμπερασματικά, με βάση την παραπάνω έρευνα και ελλείπει χημικής ανάλυσης, δεν μπορούμε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα, για το αν το πρόβλημα στο συγκεκριμένο σημείο της μπιγιέτας προήλθε από διαφορισμό.

Κεφάλαιο 5 - Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετήσαμε τρεις αστοχίες υλικών: μία αστοχία αυλών εναλλάκτη θερμότητας, μία αστοχία αυλών φούρνου reformer, μία αστοχία χάλυβα μπιγιέτας.

Στην περίπτωση των αυλών εναλλάκτη, τα αποτελέσματα μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός αστοχίας είναι εργοδιάβρωση από χλωριόντα (Stress Corrosion Cracking / Chloride stress cracking), πρόκειται δηλαδή για μία αστοχία διάβρωσης. Για την αποφυγή παρόμοιας αστοχίας πρέπει να γίνει έλεγχος του εισερχόμενου ρεύματος, ώστε να περιοριστεί η παρουσία και συγκέντρωση χλωρίου στην επιφάνεια των αυλών.

Όσον αφορά στους αυλούς του φούρνου reformer, η αστοχία φαίνεται να οφείλεται σε θερμικό σοκ, το οποίο προήλθε από την ανάπτυξη θερμικών τάσεων λόγω έντονων θερμοκρασιακών κλίσεων και από την ψαθυροποίηση του υλικού λόγω γήρανσης, που σημαίνει ότι πρόκειται για μία αστοχία σε υψηλές θερμοκρασίες. Για την αποφυγή εμφάνισης θερμικού σοκ σε άλλους αυλούς, πρέπει να περιοριστεί η ανάπτυξη θερμικών τάσεων. Εφόσον αυτό δεν είναι εφικτό, προτείνεται η αντικατάσταση των αυλών σε προγραμματισμένο στάδιο συντήρησης. Αλλά για το διάστημα μέχρι την αντικατάσταση των αυλών, προτείνεται έλεγχος κάθε αυλού με NDT στην αντίστοιχη περιοχή αστοχίας καθώς και επιβολή χαμηλών ρυθμών ψύξης και θέρμανσης του reformer.

Τέλος, στην αστοχία του χάλυβα της μπιγιέτας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει κάποια διαφορά στη δομή και στη σκληρότητα του υλικού, ειδικότερα στο μέσο της μπιγιέτας, εκεί δηλαδή που επισημάνθηκε ότι υπάρχει διάβρωση. Για να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα, θα πρέπει να προχωρήσουμε σε χημική ανάλυση.

Γίνεται κατανοητό το πόσο απαραίτητη είναι η ανάλυση μιας αστοχίας για τον προσδιορισμό του αιτίου που την προκάλεσε, έτσι ώστε να εφαρμοστούν στον μέλλον οι ενέργειες που προτείνονται και να προληφθούν παρόμοιες αστοχίες, τόσο κατά τη λειτουργία και χρήση των ήδη υπαρχόντων μηχανολογικών στοιχείων και κατασκευών, όσο και κατά τον μηχανολογικό σχεδιασμό νέων συστημάτων.

Βιβλιογραφία

1. Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία - Θεμελιώδεις Αρχές, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2000
2. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2007
3. Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Επιλογή Υλικών - Σημειώσεις, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2007
4. ASM Metals Handbook, Vol. 10, Materials Characterization, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 1992
5. ASM Metals Handbook, Vol. 11, Failure Analysis and Prevention, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 1992
6. Stainless Steels, ASM Specialty Handbook, Materials Park, Ohio, USA, 1996
7. Peter Beeley, Foundry Technology (Second Edition), Butterworth - Heinemann, 2001
8. Α. Λεκάτου, Εισαγωγή στη Διάβρωση και την Προστασία των Μετάλλων, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2005
9. Μοτορ Οϊλ (Ελλάς) Διυλιστήρια Κορίνθου Α.Ε., Εκπαιδευτικά Εγχειρίδια, Τόμος 2, Παραγωγή Καυσίμων, Κόρινθος, 2005
10. Μοτορ Οϊλ (Ελλάς) Διυλιστήρια Κορίνθου Α.Ε., Εκπαιδευτικά Εγχειρίδια, Τόμος 4, Μηχανολογικός και Ηλεκτρολογικός Εξοπλισμός, Κόρινθος, 2005
11. Διαδίκτυο: www.asminternational.org
www.steel.org
www.azom.com
www.key-to-steel.com
www.met.gr



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104761