

MHX  
665

Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ

ΜΗΧ/ΤΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Ανάλυση αστοχίας συζευκτήρα μετάδοσης κίνησης  
(κόμπλερ) υδραυλικού κινητήρα χειρισμού άγκυρας πλοίων.*

*Ανάλυση δύο περιπτώσεων .»*

Σπουδαστής: Βεντούρης Στέφανος (Α.Μ. 36778)

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Κ. ΜΕΝΤΡΕΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετά την πρόωρη αστοχία που πραγματοποιήθηκε κατά επανάληψη σε συζευκτήρες (κόμπλερ) υδραυλοκινητήρα ανύψωσης και καθόδου άγκυρας εμπορικού πλοίου. Μελετήθηκαν τρία διαφορετικά δοκίμια ίδιας γεωμετρίας που είχαν κατασκευαστεί από διαφορετικό υλικό το κάθε ένα. Τα υλικά των κόμπλερ ήταν 1.1221 (Ck-60), 1.7225 (42CrMo4) και χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη (GGG). Η ανομοιόμορφη καταπόνηση των κόμπλερ λόγω των έντονων και απότομων στρεπτικών ροπών κατά την λειτουργία του υδραυλοκινητήρα, οδήγησαν στην θραύση του.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας την μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας μηχανολογικών εξαρτημάτων σύμφωνα με το ASM Metals Handbook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention . Σκοπός της είναι η εύρεση των κύριων αιτιών που οδήγησαν στην αστοχία και η κατανόηση των κύριων μηχανισμών πραγματοποίησής τους.

Για την διεκπεραίωση της ανάλυσης αστοχίας των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικές δοκιμές ελέγχου (οπτική επιθεώρηση, οπτική μικροσκοπία) καθώς και καταστροφικές δοκιμές (σκληρομέτρηση, μικροσκληρομέτρηση, χημική ανάλυση, ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης SEM, EDX). Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση των συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων από κάθε ξεχωριστή δοκιμή και τέλος παρουσιάζονται συγκεκριμένες προτάσεις για την επίλυση και αποφυγή στο μέλλον παρόμοιων αστοχιών στους συζευκτήρες υδραυλοκινητήρων.

## ABSTRACT

The present thesis studies the premature failure occurred to hydraulic motor's oldham coupling which raise and descent the anchor of the vessel. Three different pieces of the same geometry have been studied which had been constructed by different material each one. The oldham coupling's materials were 1.1221 (Ck-60), 1.7225 (42CrMo4) and cast iron respectively. The uneven strain of the odham coupling due to intense and sudden torsional torques during service life of the hydraulic motor lead to their total breakage.

The study was conducted using the failure analysis methodology for tools and moulds according to ASM Metals HandBook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention. The objectives of this study were to investigate the causes as well as the mechanisms that lead to the failure.

For the implementation of the components' failure analysis non-destructive testing (visual inspection, optical microscopy) as well as destructive tests (hardness, micro-hardness, chemical analysis, scanning electron microscopy SEM and EDX) were carried out. The thesis opposes all the findings and results from each test and finally presents proposals for resolving and preventing future similar failures in hydraulic motor's oldham coupling.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση αστοχίας ενός συζευκτήρα (κομπλερ) υδραυλοκινητήρα ο οποίος ανυψώνει και ρίχνει την άγκυρα ενός εμπορικού πλοίου. Το συγκεκριμένο εξάρτημα έπαθε βλάβη πριν από τον αναμενόμενο χρόνο ζωής του, με μεγάλη συχνότητα στα περισσότερα παρόμοια εξαρτήματα των υδραυλοκινητήρων.

Ανάλυση αστοχίας είναι η διαδικασία κατά την οποία συλλέγονται και αναλύονται με λεπτομέρεια και επιμέλεια χρήσιμα στοιχεία που επιτρέπουν στον ερευνητή την δημιουργία μιας άτυπης ιχνηλασιμότητας η οποία θα τον οδηγήσει με ακρίβεια στην αιτία ή στις αιτίες που οδήγησαν στην πρόωρη αστοχία. Για να είναι αυτές οι αιτίες βάσιμες θα πρέπει να επιβεβαιώνονται στην πράξη. Έτσι, ο ερευνητής θα πρέπει να εντοπίσει με ακρίβεια τα λάθη είτε αυτά εντοπίζονται στον σχεδιασμό, είτε στην κατασκευή και την κατασκευή, είτε ακόμα και στα γενικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του μηχανήματος. Παράλληλα, ο ερευνητής θα πρέπει να έχει το κατάλληλο υπόβαθρο γνώσεων το οποίο θα του επιτρέψει να προτείνει πραγματοποιήσιμες λύσεις σε οποιοδήποτε σημείο κρίνει ότι μπορεί να βελτιστοποιηθεί ώστε να εκλείψει το φαινόμενο.

Οι αστοχίες είναι αδύνατο να εκλείψουν διότι είναι άμεση συνάρτηση της προόδου και της έρευνας. Όσο ανακαλύπτονται και χρησιμοποιούνται νέα υλικά και νέες τεχνικές, είναι επόμενο να γίνονται νέα λάθη και η βελτίωση να επέρχεται ουσιαστικά μέσω της διόρθωσης αυτών των λαθών. Οι αστοχίες μπορούν μονό να περιοριστούν και αυτό γίνεται εφικτό μέσω της γνωστοποίησης των στοιχείων και των συμπερασμάτων αυτών που σχετίζονται με την εκάστοτε αστοχία και αποτελούν χρήσιμα στοιχεία για κάθε σχεδιαστή ή μηχανικό.

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία αποτελείται από δυο μέρη τα οποία αν και φαινομενικά είναι ανεξάρτητα, στην πραγματικότητα είναι αλληλένδετα συνδεδεμένα. Το πρώτο μέρος παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο και το δεύτερο, τις πειραματικές διαδικασίες οι οποίες συνοδεύονται με τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και τις αντίστοιχες διορθωτικές προτάσεις.

Στο θεωρητικό μέρος γίνεται εισαγωγή στην θεωρία της ανάλυσης αστοχίας καθώς και παρουσιάζονται τα στάδια που πρέπει να ακολουθήσουν για να αναπαραχθούν όσο το δυνατό αποτελεσματικότερα συμπεράσματα. Στην συνέχεια γίνεται μια παρουσίαση των χαλύβων, δεδομένου ότι οι χάλυβες είναι το ευρύτερο χρησιμοποιούμενο υλικό στις μηχανολογικές κατασκευές σήμερα και αντικείμενο στην παρούσα ανάλυση αστοχίας. Τέλος αναλύεται η χρησιμότητα της αγκύρας, τα είδη της, όπως επίσης και ο τρόπος συντήρησης και έλεγχος ποιότητας της.

Στο πειραματικό μέρος, παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την συγκεκριμένη έρευνα, τα αποτελέσματα που προέκυψαν, καθώς επίσης και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν μαζί με τις προτάσεις για τη διόρθωση των σφαλμάτων και τη βελτιστοποίηση του στοιχείου. Οι πειραματικές διαδικασίες ακολούθησαν τα πρότυπα του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης ISO (International Organization for Standardization) και του Οργανισμού ASTM (American Society for Testing and Materials). Μέρος της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε σε εταιρίες εκτός ΑΤΕΙ- Πειραιά. Χωρίς τη συνεργασία τους, η ολοκλήρωση της πτυχιακής αυτής εργασίας θα ήταν αδύνατη.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας, και ιδιαίτερα της πειραματικής διαδικασίας χρειάστηκε σημαντική βοήθεια από εταιρείες και ιδιώτες εκτός ΑΤΕΙ-Πειραιά. Χωρίς την βοήθεια αυτή πολλά μέρη των πειραματικών διαδικασιών θα ήταν πρακτικά αδύνατον να πραγματοποιηθούν λόγω του περιορισμένου υλικοτεχνικού εξοπλισμού και δυνατοτήτων που διαθέτει το ΑΤΕΙ-Πειραιά για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας. Για αυτό ακριβώς το λόγω οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ:

- ❖ Στον κύριο Ιωάννη Σιδέρη, Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό Ε.Μ.Π., Τεχνικό Διευθυντή της εταιρίας Στασινόπουλος-Uddeholm Χάλυβες Α.Ε.Β.Ε. και ειδικό συνεργάτη στο εργαστήριο Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών ( Π.Ε.Τ.ΥΛ.) του ΑΤΕΙ-Πειραιά για την πολύτιμη βοήθεια του σε όλα τα στάδια της παρούσας εργασίας. Παρείχε εκτός από υλικοτεχνικό εξοπλισμό, τη βαθιά του γνώση στο αντικείμενο, με την οποία ξεπεράστηκαν αναδυόμενες δυσκολίες.
- ❖ Στην κυρία Κάρμεν Μεντρέα Μπίχτα, Δρα Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό του Technical University of Cluj-Napoca, υπεύθυνη Καθηγήτρια του μαθήματος Π.Ε.Τ.ΥΛ. του τμήματος Φυσικής, Χημείας και Τεχνολογίας Υλικών (Φ.Χ.Τ.Υ.) του ΑΤΕΙ-Πειραιά για την αναντικατάστατη συμβολή της στην περάτωση της εργασίας μέσω της συνεχούς και ανεξάντλητης εποπτείας της.
- ❖ Στον κύριο Δημήτρη Παπαγεωργίου, Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π., Υπεύθυνο Ποιοτικού Ελέγχου της εταιρίας Στασινόπουλος-Uddeholm Χάλυβες Α.Ε.Β.Ε., επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Π.Ε.Τ.ΥΛ. του τμήματος Φ.Χ.Τ.Υ. του ΑΤΕΙ-Πειραιά για την πολύτιμη βοήθεια του στην επίβλεψη της πτυχιακής εργασίας όσον αφορά το πειραματικό μέρος.
- ❖ Στον κύριο Ηλία Κονταξή, Αρχιμηχανικός της ναυτιλιακής εταιρίας THENAMARIS , για την προμήθεια των αστοχούντων εξαρτημάτων που μελετηθήκαν σε αυτή την πτυχιακή εργασία όπως και στην παροχή οποιοδήποτε πληροφοριών του ζητήθηκαν για την σωστή ανάλυση των εξαρτημάτων.
- ❖ Στην κυρία Άννα Μαρουσάκη, Χημικό Μηχανικό Ε.Μ.Π., επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Π.Ε.Τ.ΥΛ. του τμήματος Φ.Χ.Τ.Υ. του ΑΤΕΙ-Πειραιά, για τις πολύτιμες συμβουλές της καθ' ολη την φοιτητική μου σταδιοδρομία, όπως επίσης και στην συμβολή της στην επιλογή πραγματοποίησης αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος νιώθω την απερίοριστη ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τα εφόδια που μου προσέφερε απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια όπως και την ψυχολογική στήριξη σε κάθε δύσκολη στιγμή κι αν αντιμετώπισα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Θεωρία της Ανάλυσης Αστοχιών

|  |        |
|--|--------|
| <b>1.1 Εισαγωγή</b>  | σελ. 1 |
| <b>1.2 Παρουσίαση αναγκαίων βημάτων για μια επιτυχή ανάλυση αστοχίας</b> | σελ. 2 |
| <b>1.3 Στάδια ανάλυσης αστοχίας</b>                                      | σελ. 6 |

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Χάλυβες κατασκευών

|  |         |
|--|---------|
| <b>2.1 Εισαγωγή</b>                                      | σελ. 17 |
| <b>2.2 Ονοματολογία</b>                                  | σελ. 19 |
| 2.2.1 Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI – SAE               | σελ. 19 |
| 2.2.2 Ονοματολογία χαλύβων κατά το αγγλικό σύστημα B.S   | σελ. 19 |
| 2.2.3 Ονοματολογία χαλύβων κατά το γαλλικό σύστημα AFNOR | σελ. 20 |
| 2.2.4 Ονοματολογία χαλύβων κατά το γερμανικό σύστημα DNA | σελ. 21 |
| <b>2.3 Ταξινόμηση χαλύβων</b>                            | σελ. 22 |
| 2.3.1 Ως προς τη χημική τους σύσταση                     | σελ. 22 |
| 2.3.2 Ως προς τον προορισμό τους                         | σελ. 22 |
| 2.3.3 Ως προς τις χρήσεις τους                           | σελ. 22 |
| <b>2.4 Επίδραση στοιχείων προσθήκης</b>                  | σελ. 22 |
| <b>2.5 Κραματωμένοι χάλυβες</b>                          | σελ. 24 |
| <b>2.6 Χάλυβες κατασκευών</b>                            | σελ. 25 |
| 2.6.1 Ανθρακούχοι χάλυβες κατασκευών                     | σελ. 26 |
| 2.6.2 Χαλυβοκράμματα κατασκευών                          | σελ. 27 |
| 2.6.2.1 Χαλυβοκράμματα ενανθρακώσεως                     | σελ. 28 |
| 2.6.2.2 Χαλυβοκράμματα εναζωτώσεως                       | σελ. 28 |
| <b>2.7 Κατεργασίες χαλύβων</b>                           | σελ. 28 |

|       |                           |      |    |
|-------|---------------------------|------|----|
| 2.7.1 | Θερμικές κατεργασίες      | σελ. | 29 |
| 2.7.2 | Πλαστικές παραμορφώσεις   | σελ. | 30 |
| 2.7.3 | Μηχανουργικές κατεργασίες | σελ. | 32 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Άγκυρα και σπουδαιότητά της σε ένα πλοίο**

|            |                                   |      |    |
|------------|-----------------------------------|------|----|
| <b>3.1</b> | <b>Εισαγωγή</b>                   | σελ. | 33 |
| <b>3.2</b> | <b>Είδη αγκυρών</b>               | σελ. | 33 |
| <b>3.3</b> | <b>Επιλογή άγκυρας και δοκιμή</b> | σελ. | 36 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Βαρούλκο μηχανήμα για την ανύψωση άγκυρας σε εμπορικό πλοίο (Staffa motor C200 SERIES 70)**

|            |   |      |    |
|------------|---|------|----|
| <b>4.1</b> | <b>Γενικές χρήσεις</b>                          | σελ. | 38 |
| <b>4.2</b> | <b>Στοιχεία των βαρούλκων Staffa</b>            | σελ. | 40 |
| 4.2.1      | Περιγραφή βαρούλκου                             | σελ. | 40 |
| 4.2.2      | Υδραυλικές μηχανές                              | σελ. | 42 |
| 4.2.3      | Συστήματα ελέγχου                               | σελ. | 42 |
| <b>4.3</b> | <b>Πληροφορίες σωστής χρήσης ενός βαρούλκου</b> | σελ. | 43 |
| 4.3.1      | Πρότυπο δεσίματος                               | σελ. | 43 |
| 4.3.2      | Διασπασμένο τύμπανο πρόσδεσης                   | σελ. | 43 |
| <b>4.4</b> | <b>Συντήρηση βαρούλκου</b>                      | σελ. | 44 |
| 4.4.1      | Κανονικός έλεγχος                               | σελ. | 44 |
| 4.4.2      | Λίπανση   | σελ. | 45 |
| 4.4.3      | Προτεινόμενα λιπαντικά για το κουτί της μηχανής | σελ. | 45 |
| 4.4.4      | Προτεινόμενοι τύποι γράσων                      | σελ. | 47 |
| <b>4.5</b> | <b>Ρυθμίσεις – υδραυλικά μέρη</b>               | σελ. | 48 |
| 4.5.1      | Βαλβίδα ελέγχου ροής                            | σελ. | 48 |
| 4.5.2      | Βαλβίδα πίεσης                                  | σελ. | 48 |

|  |         |
|--|---------|
| 4.5.3 Αντίθετη βαλβίδα ισορροπίας                  | σελ. 49 |
| 4.5.4 Δειγματοληψία λαδιού για τον έλεγχο μόλυνσης | σελ. 49 |
| 4.5.5 Δοκιμή φρένων – Τύμπανα βαρούλκων            | σελ. 50 |

## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Συλλογή ιστορικών δεδομένων - δειγμάτων**

|   |         |
|---|---------|
| <b>5.1 Μελετούμενο εξάρτημα αστοχίας – κόμπλερ υδραυλοκινητήρα</b>    | σελ. 52 |
| <b>5.2 Λειτουργία του μελετούμενου υδραυλοκινητήρα</b>                | σελ. 54 |
| 5.2.1 Γενικός τρόπος λειτουργίας του υδραυλοκινητήρα                  | σελ. 56 |
| 5.2.2 Ρύθμιση μετατόπισης του άξονα                                   | σελ. 56 |
| 5.2.3 Χρησιμότητα του Valve spool                                     | σελ. 57 |
| 5.2.4 Κόμπλερ σύζευξης – oldhams coupling (δοκίμια μελέτης αστοχίας). | σελ. 57 |
| <b>5.3 Μηχανολογικά σχέδια συναρμολόγησης του υδραυλοκινητήρα</b>     | σελ. 59 |
| <b>5.4 Συλλογή ιστορικών δεδομένων</b>                                | σελ. 62 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Προκαταρκτική εξέταση και οπτική επιθεώρηση**

|  |         |
|--|---------|
| <b>6.1 Οπτική επιθεώρηση και φωτογράφιση</b> | σελ. 63 |
| <b>6.2 Συμπεράσματα</b>                      | σελ. 71 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: Μέτρηση σκληρότητας εξαρτημάτων**

|  |         |
|--|---------|
| <b>7.1 Διαδικασία μέτρησης σκληρότητας</b> | σελ. 72 |
| <b>7.2 Συμπεράσματα</b>                    | σελ. 77 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: Προετοιμασία δειγμάτων για τις καταστρεπτικές δοκιμές**

|                                  |         |
|----------------------------------|---------|
| <b>8.1 Επιλογή δειγμάτων</b>     | σελ. 78 |
| <b>8.2 Ταυτοποίηση δειγμάτων</b> | σελ. 83 |

|  |         |
|--|---------|
| <b>8.3 Προετοιμασία δοκιμίων για μεταλλογραφική ανάλυση.<br/>Εγκιβωτισμός, λείανση και στίλβωση δοκιμίων</b> | σελ. 83 |
|--|---------|

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>: Χημική ανάλυση υλικού**

|   |         |
|---|---------|
| <b>9.1 Διαδικασία χημικής ανάλυσης δοκιμίων</b> | σελ. 85 |
| <b>9.2 Συμπεράσματα</b>                         | σελ. 87 |

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>: Prospectus χάλυβων**

|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| <b>10.1 Prospectus χάλυβα 41CrMo4</b> | σελ. 88 |
| <b>10.2 Prospectus χάλυβα CK 60</b>   | σελ. 92 |

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11<sup>ο</sup>: Μικροσκληρομέτρηση δειγμάτων**

|  |          |
|--|----------|
| <b>11.1 Διαδικασία μικροσκληρομέτρησης</b> | σελ. 97  |
| <b>11.2 Συμπεράσματα</b>                   | σελ. 100 |

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12<sup>ο</sup>: Μικροσκοπικά εξέταση δειγμάτων**

|   |          |
|---|----------|
| <b>12.1 Οπτική μικροσκοπία</b>          | σελ. 101 |
| <b>12.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία SEM</b> | σελ. 112 |

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και προτάσεις**

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| <b>13.1 Συμπεράσματα</b> | σελ. 128 |
| <b>13.2 Προτάσεις</b>    | σελ. 129 |
| <b>Βιβλιογραφία</b>      | σελ. 131 |



## <<ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ>>

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

#### 1.1 Εισαγωγή

**Αστοχία** μπορεί να οριστεί ως η ανικανότητα ενός εξαρτήματος, μιας μηχανής, ή μιας διαδικασίας να λειτουργήσει σωστά [1]. Αστοχίες εμφανίζονται σε όλες τις μορφές και τα μεγέθη και μπορούν να είναι μεμονωμένα μέρη, ολόκληρες μηχανές, ή απλά μια διαδικασία.

**Γιατί συμβαίνουν αστοχίες;** Είναι μια ερώτηση που απασχολεί τους αναλυτές. Κατά το πέρασμα του χρόνου οι αστοχίες έχουν ταξινομηθεί με διάφορα κριτήρια. Σήμερα θεωρείται ότι τα πιο συνηθισμένα αίτια εμφάνισης αστοχίας είναι:

- Οι συνθήκες λειτουργίας ή υπηρεσίας (κακή χρήση ή κακή συντήρηση).
- Ακατάλληλη συντήρηση (σκόπιμος ή ακούσιος).
- Ανεπαρκές δοκιμή ή επιθεώρηση.
- Λάθη κατά την συναρμολόγηση.
- Λάθη επεξεργασίας/ κατασκευής.
- Λάθη σχεδίου (τάση, επιλογή υλικών, και υποτιθέμενες συνθήκες ή ιδιότητες υλικών).

Σήμερα, η λειτουργία είναι ο πρώτος ύποπτος για την εμφάνιση μιας αστοχίας. Οι μηχανές και τα εξαρτήματα, ακόμη και διαδικασίες, έχουν μια ορισμένη, υπολογιζόμενη διάρκεια ζωής. Υπό κανονική χρήση, τα περισσότερα στοιχεία φθείρονται μετά το προβλεπόμενο χρόνο ζωής τους. Μια αστοχία εμφανίζεται όταν ένα στοιχείο φθαρεί πριν από αυτό το χρονικό διάστημα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο **σκοπός** μιας έρευνας αστοχίας είναι, να καθοριστεί η πρωταρχική αιτία εμφάνισης της. Ο προσδιορισμός της πρωταρχικής αιτίας είναι ορθή πρακτική εφαρμοσμένης μηχανικής που διασφαλίζει τα λειτουργικά όρια μέσα σε μια επιχείρηση και είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα της εξασφάλισης ποιότητας και της συνεχούς βελτίωσης. Μια έρευνα αστοχίας δεν είναι ένα «επιστημονικό πρόγραμμα».

Τα οφέλη μιας έρευνας αστοχίας αποτελούν μέρος της ποιοτικής διαχείρισης και των προγραμμάτων βελτίωσης μίας εταιρίας. Τα αίτια που προκάλεσαν την αστοχία βοηθούν στον επανασχεδιασμό, στο να λυθεί ένα πρόβλημα κατασκευής, αποφέρει χρήματα, χρόνο, και ίσως σε μερικές περιπτώσεις, αποτρέπει τραυματισμούς και διασώζει ανθρώπινες ζωές.

**Τα τέσσερα βήματα της διαδικασίας επίλυσης** του προβλήματος, που οι περισσότεροι μηχανικοί διδάσκονται, είναι μια καλή γενική άποψη μιας έρευνας αστοχίας:

1. Ποιο είναι το πρόβλημα;
2. Ποια είναι η πρωταρχική αιτία του προβλήματος;
3. Ποιες είναι οι πιθανές λύσεις;
4. Ποια είναι η καλύτερη λύση;

Επομένως, ένας καλός καθορισμός μιας έρευνας αστοχίας μπορεί να είναι μια αξιολόγηση που εκτελείται για να προσδιορίσει ή/και να καθορίσει τους λόγους για μια αστοχία η οποία σαφώς προσδιορίζει την πρωταρχική αιτία της αστοχίας και συστήνει τη διορθωτική δράση. Πολλές έρευνες αστοχίας τελειώνουν μετά από το βήμα 2 (καθορισμός της πρωταρχικής αιτίας). Είναι εξίσου σημαντικό η έρευνα να παρέχει τα βήματα 3 και 4. Επιπλέον, θα ήταν καλό να πραγματοποιηθεί και μια αξιολόγηση της λύσης. Πολλές έρευνες αστοχίας ανακαλύπτουν την πρωταρχική αιτία και προβαίνουν σε μια σύσταση για διορθωτικές δράσεις, αλλά καμία αξιολόγηση δεν εκτελείται για να δει εάν οι διορθωτικές δράσεις λειτούργησαν σωστά.

Υπάρχουν **εννέα βήματα οργάνωσης** μιας εμπειριστατωμένης έρευνας αστοχίας:

1. Κατανόηση και καθορισμός των στόχων της έρευνας.
2. Σαφή κατανόηση της αστοχίας .
3. Προσδιορισμός (αντικειμενικά και με σαφήνεια) όλων των πιθανών πρωταρχικών αιτιών.
4. Αντικειμενική αξιολόγηση της πιθανότητας κάθε πρωταρχικής αιτίας.
5. Σύγκλιση στην πλέον πιθανή πρωταρχική αιτία.
6. Προσδιορισμός (αντικειμενικά και με σαφήνεια) όλων των πιθανών διορθωτικών ενεργειών.
7. Αντικειμενική αξιολόγηση κάθε διορθωτικής ενέργειας.
8. Επιλογή της βέλτιστης διορθωτικής δράσης .
9. Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της επιλεγμένης διορθωτικής δράσης.

## **1.2 Παρουσίαση αναγκαίων βημάτων για μια επιτυχή ανάλυση αστοχίας.**

### **Βήμα 1: Κατανόηση και καθορισμός των στόχων της έρευνας.**

Κάθε έρευνα αστοχίας θα πρέπει να καθορήσει τέσσερα στοιχεία για αρχή:

- Ποια είναι η προτεραιότητα της έρευνας.
- Τις διαθέσιμες πηγές.
- Τυχόν περιορισμοί που θέτονται.
- Τους στόχους της έρευνας.

Συνήθως δεν λαμβάνονται υπ' όψιν αυτά τα τέσσερα στοιχεία αλλά είναι πολύ βασικά για την σωστή διεκπεραίωση της έρευνας. Αυτά τα τέσσερα στοιχεία θέτουν την σημαντικότητα, την κατεύθυνση και τα επιθυμητά αποτελέσματα μιας έρευνας ανάλυσης αστοχίας από αρκετά πρώιμο στάδιο. Οι πηγές και οι περιορισμοί μπορεί να αποτελούν τους τρεις παρακάτω παράγοντες : τα χρήματα, τον ανθρώπινο παράγοντα, και τον χρόνο. Οι περιορισμοί μπορεί επίσης να αποτελούν την έλλειψη αντικατάστασης του υλικού από άλλα κομμάτια, έλλειψη πληροφοριών, κλπ.

### **Βήμα 2: Σαφή κατανόηση της αστοχίας.**

Για να επιτευχθεί ο στόχος της ανάλυσης της αστοχίας και του προβλήματος γενικότερα θα πρέπει πρώτα ο ερευνητής να κάνει στον εαυτό του κάποιες ερωτήσεις όπως « Ποιο είναι το πρόβλημα; » , « Τι συνέβη; », « Γιατί είναι η ομάδα έρευνας εδώ; ». Η διεξοδική πληροφόρηση από οποιοδήποτε πρόσωπο που μπορεί να ασχολείται με το εξάρτημα, είναι τεράστιας σημασίας. Ο ερευνητής

θα πρέπει να γίνει «expert» σχετικά με το εξάρτημα, την λειτουργία, και γενικότερα το όλο σύστημα του. Η μέθοδος του brainstorming μπορεί να παρουσιαστεί πολύ ωφέλιμη με την προϋπόθεση να είναι παρόν όλοι οι εργαζόμενοι αφού η παραμικρή πληροφορία είναι πολύ σημαντική. Δεν υπάρχει σημαντική και ασήμαντη πληροφορία, όλες είναι της ίδιας βαρύτητας σε μια έρευνα αστοχίας.

Η περιοχή της αστοχίας είναι πολύ σημαντική και πρέπει να φωτογραφηθεί και να προστατευτεί. Αν δεν είναι δυνατόν ο ερευνητής να δει με τα ματιά του την περιοχή της αστοχίας τότε είναι απαραίτητο να βρει ανάλογα σχέδια και φωτογραφίες. Φωτογραφίες πριν και μετά την αστοχία είναι αρκετά διαφωτιστικές. Αν έχει την δυνατότητα να επισκεφτεί την τοποθεσία της αστοχίας, θα πρέπει να έχει μαζί του τα εξαρτήματα – χαρακτηριστικά του πίνακα 1.

**Πίνακας 1.1** Εξαρτήματα και χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει μαζί του ένας ερευνητής κατά την επίσκεψη του στην περιοχή αστοχίας. [Table1 pg.688 (1)]

| Στοιχεία   | Αιτίες/ Σχόλια  |
|--|---|
| Γνώσης και ανοιχτόμυαλος                             | Να είναι προετοιμασμένος. Να έχει ερωτήσεις. Έτοιμος για το απρόοπτο  |
| Καλή συμπεριφορά                                     | Χρειάζεται τους ανθρώπους που συναντάει περισσότερο από ότι αυτοί τον ίδιο  |
| Επαγγελματισμός                                      | Αν μοιάζει ότι είναι οργανωμένος και ξέρει τι κάνει, οι άνθρωποι θα τον θεωρήσουν σοβαρή προσωπικότητα και μπορεί να πάρει περισσότερη βοήθεια                                  |
| Ψηφιακή κάμερα                                       | Να τραβήξει όσες περισσότερες φωτογραφίες μπορεί. Να φωτογραφήσει το εξάρτημα, την γύρω περιοχή, άλλα συμβατά εξαρτήματα, ακόμα και προσωπικό. Προσοχή με τα χρώματα.           |
| Συνηθισμένο χρώμα χαρτιού, λευκό κομμάτι χαρτί κλπ.  | Οτιδήποτε μπορεί να χρησιμοποιήσει αργότερα σαν στάνταρ για να κρίνει το πραγματικό χρώμα του εξαρτήματος στις φωτογραφίες που έχει τραβήξει                                    |
| Χάρακας - ατσάλινος ή πλαστικός                      | 1. Χρήση στις φωτογραφίες σαν κλίμακα - ο ατσάλινος χάρακας είναι γκρι και καλός ανοιχτόχρωμο background. Αστρως πλαστικός χάρακας είναι καλός σε σκουρόχρωμο background        |
|  | 2. Ατσάλινος χάρακας μπορεί να δείξει αν κάτι είναι μαγνήτης. (προσοχή ο χάρακας να μην είναι μαγνητισμένος)  |
|  | 3. Πλαστικός χάρακας λειτουργεί καλύτερα σε μαγνητικές επιφάνειες   |
| Μαγνήτης- έναν επίπεδο και ένα ραβδοειδή με επέκταση | 1. Ξεχωρίζει μαγνητισμένα από μη μαγνητισμένα υλικά   |
|  | 2. Μπορεί να χρησιμοποιήσει την επέκταση για να ανακτήσει αντικείμενα   |
|  | 3. Μπορεί να χρησιμοποιήσει την επέκταση για την συλλογή θραυσμάτων που είναι μαγνητισμένα. Με αυτό τον τρόπο αυτόματος ξεχωρίζονται θραύσματα μαγνητισμένα και μη μαγνητισμένα |
| Μεγεθυντικός φακός                                   | Μπορεί να παρατηρήσει σε αρκετά μικροσκοπικά αντικείμενα τις κάθε λεπτομέρειες τους   |
| <<Μέτρο>>  | Μπορεί να μετρήσει μεγάλες αποστάσεις   |
| Ανεξίτηλος μαρκαδόρος                                | Μπορεί να σημαδέψει αντικείμενα, σακούλες, μπουκάλια  |
| Φακός  | Φωτίζει αντικείμενα σε τρύπες, σκοτεινές περιοχές, κλπ. 90° θέση του φακού για καλύτερο φωτισμό σε τρύπες και φακό (καρφίτσα) για καλύτερο φωτισμό σε μικρές χαραμάδες          |

|  |   |
|--|---|
| Δοκιμαστής αγωγιμότητας                          | Τσεκάρει την αγωγιμότητα η όχι μιας επιφάνειας  |
| Καθρέφτης  | Τσεκάρει γύρω από γωνίες και κάτω από αντικείμενα   |
| Πολυεργαλείο τύπου Leatherman και μαχαίρι τσέπης | Ψαλίδι, κατσαβίδι, τσιμπιδάκια, λεπίδες, πλαστική οδοντογλυφίδα. Οι διάφορες χρήσεις περιλαμβάνουν την εξέταση εξαρτημάτων, επιφανειών, κοπή κλπ. |
| Στυλό και μολύβι                                 | Πάντα χρειάζονται.....  |
| Λευκό κομμάτι ταινίας χαρτιού                    | Στάνταρ χρώμα, χαρτί σημειώσεων, χαρτί σχεδιασμού, και συλλογή σε σχήμα χοάνης  |
| Πλαστικές σακούλες 4 X 4 in.                     | Για συλλογή δειγμάτων   |
| Απορροφητικό                                     | Για συλλογή δειγμάτων- πάντα να διατηρείται ένα παραπάνω για έλεγχο   |
| Λίστα αναφοράς κραμάτων                          | Υλικά, σύνθεση, προδιαγραφές, δεδομένα  |
| Διαγράμματα μετατροπής σκληροτήτων               | Μαρτενσιτικά και ωστενιτικά διαγράμματα   |
| Διευθύνσεις και τηλέφωνα                         | Πρώτες βοήθειες, πληροφορίες, κλπ.  |
| Τεχνικές πληροφορίες                             | Λίστες προδιαγραφών, κριτήρια σχεδίασης, σχέδια, σημειώσεις κλπ. Αυτά εξαρτώνται από την προσωπική κρίση  |
| Κινητό τηλέφωνο                                  | Άμεση επικοινωνία με σημαντικά άτομα ανεξαρτήτως του τόπου και του χώρου.   |
| Φόρμα αναφοράς αυτόπτη μάρτυρα                   | Καλύτερα εάν αποσταλούν με e-mail ή αποσταλούν νωρίτερα για να συμπληρωθεί όποτε είναι δυνατόν  |
| Φορητός υπολογιστής/ υπολογιστής αφής            | Υπολογιστής που προσφέρει πρόσβαση σε δεδομένα, διαγράμματα, κλπ.   |
| Άλλα   | Οτιδήποτε άλλο πιστεύει ο ερευνητής   |

### **Βήμα 3: Προσδιορισμός (αντικειμενικά και με σαφήνεια) όλων των πιθανών πρωταρχικών αιτιών.**

Για τον προσδιορισμό των κύριων πιθανών αιτιών της ύπαρξης αστοχίας μια πολύ αποτελεσματική μέθοδο είναι η δημιουργία ενός « Δέντρου Ελαττωμάτων » (δηλαδή σαν ένα διάγραμμα ροής που μας δείχνει πως το ένα πρόβλημα προέρχεται από το άλλο). Η πραγματοποίηση του γίνεται πολύ απλή και εύκολη με την χρήση υπολογιστή. Ένας άλλος εύχρηστος τρόπος είναι το brainstorming. Για να βρεθούν όλες οι αρχικές αιτίες, ο ερευνητής θα πρέπει να κάνει συνεχώς την ερώτηση « Γιατί συνέβη αυτό; », ώστε να φτάσει στη ρίζα του προβλήματος.

### **Βήμα 4: Αντικειμενική αξιολόγηση της πιθανότητας ύπαρξης κάθε πρωταρχικής αιτίας.**

Σε αυτό το βήμα της ανάλυσης αστοχίας θα πρέπει να αξιολογηθεί η πιθανότητα που υπάρχει για κάθε πρωταρχική αιτία. Ένα καλό εργαλείο για αυτό το βήμα είναι ο πίνακας « Μέθοδος Αξιολόγησης Αστοχίας» στον οποίο

καταγράφονται όλες οι πρωταρχικές αιτίες και αξιολογούνται είτε αριθμητικά (π.χ. 1,2,3...) είτε με λέξεις (ασήμαντη, σημαντική, πολύ σημαντική...)

#### **Βήμα 5: Σύγκλιση στην πλέον πιθανή πρωταρχική αιτία.**

Στη συνέχεια ο ερευνητής καταλήγει σε μια πλέον πιθανή πρωταρχική αιτία της αστοχίας. Με την βοήθεια των πινάκων που δημιουργήθηκαν στα παραπάνω βήματα υπάρχουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την κατάληξη στην πλέον πιθανή πρωταρχική αιτία της εμφάνισης αστοχίας.

#### **Βήμα 6: Προσδιορισμός (αντικειμενικά και με σαφήνεια) όλων των πιθανών διορθωτικών ενεργειών.**

Αν και πολλοί ερευνητές σταματάνε σε αυτό το βήμα, η έρευνα θα πρέπει να συνεχιστεί και στα επόμενα βήματα αφού είναι πολύ σημαντικά όλα για να επιτευχτεί ένα σωστό και πλήρες αποτέλεσμα. Μετά από μεγάλη έρευνα, ο ερευνητής έχει καταλήξει στις κύριες αιτίες της ύπαρξης αστοχίας και τώρα, σε αυτό το βήμα ταξινομεί και αξιολογεί τις πιθανές λύσεις που μπορούν να επιλύσουν τις βασικότερες αιτίες του προβλήματος. Οι λύσεις θα μπορούσαν να τοποθετηθούν σε ένα πίνακα για να είναι πιο σαφής και διακριτές για την περαιτέρω χρήση τους.

#### **Βήμα 7: Αντικειμενική αξιολόγηση κάθε διορθωτικής ενέργειας.**

Αυτό το βήμα χρησιμεύει στο να αξιολογηθούν αντικειμενικά οι πιθανές λύσεις - διορθωτικές ενέργειες που βρεθήκαν στο προηγούμενο βήμα. Θα βοηθούσε πολύ ο πίνακας που δημιουργήθηκε στο παραπάνω βήμα, τώρα προσθέτοντας μια στήλη που να αξιολογεί την ικανότητα πραγματοποίησης και άλλη μια, με τη δυνατότητα επίλυσης του αντιστοίχου προβλήματος.

#### **Βήμα 8: Επιλογή της βέλτιστης διορθωτικής λύσης**

Σε αυτό το βήμα πραγματοποιείται η επιλογή της βέλτιστης λύσης από το προηγούμενο βήμα για την αποφυγή της αστοχίας. Το βήμα αυτό μοιάζει αρκετά εύκολο αφού έχει φτιαχτεί ο πίνακας από το παραπάνω βήμα και είναι εύκολα διακριτή η καλύτερη λύση.

#### **Βήμα 9: Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της επιλεγμένης διορθωτικής δράσης.**

Τέλος, μετά από μια πολύωρη έρευνα, ο υπεύθυνος ερευνητής της αστοχίας αξιολογεί την αποτελεσματικότητα της τελικής διορθωτικής κίνησης που επιλέχτηκε από τα παραπάνω βήματα και είναι έτοιμος για την πραγματοποίησή της. Είναι σημαντικό πριν την πραγματοποίησή της να γίνει μια δοκιμή για να υπάρχει 100% βεβαιότητα για την αποτελεσματικότητά της.

#### **Άλλα βήματα (άλλοι μέθοδοι)**

Υπάρχουν και άλλοι μέθοδοι με την βοήθεια των οποίων μπορεί ένας ερευνητής να επιλύσει μια αστοχία. Αυτοί οι μέθοδοι αναπτύχθηκαν από τις παρακάτω εταιρίες :

- Kepner-Tregoe, Inc. (the K.T. method)
- Reliability Center, Inc. (the PROACT method)
- Failsafe Network, Inc. (the ROOTS Investigative Process)

### 1.3 Στάδια ανάλυσης αστοχίας.

#### 1.3.1 Συλλογή ιστορικών δεδομένων, που περιλαμβάνουν όλες τις πληροφορίες που αφορούν την αστοχία, τα ιστορικά δεδομένα του μηχανήματος (συνθήκες λειτουργίας, συντήρηση), προδιαγραφές, υλικά.

Πληροφορίες που πρέπει να συλλεχτούν (αν είναι δυνατόν) για το εξάρτημα που έχει αστοχία είναι:

- Τοποθεσία , όνομα εξαρτήματος, αριθμός αναγνώρισης, κάτοχος, χρήστης, κατασκευαστής.
- Γενική λειτουργία εξαρτήματος.
- Συγκεκριμένη λειτουργία κατά την στιγμή της αστοχίας.
- Αξιολόγηση εξαρτήματος, λειτουργικό επίπεδο, κανονικές και μη-κανονικές φορτίσεις, συχνότητα φόρτισης, και περιβάλλον.
- Χρησιμοποιούμενα υλικά.
- Τεχνικές κατασκευής και επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν, συμπεριλαμβανομένου προδιαγραφών και κωδικούς κατασκευής, επεξεργασίας, επιθεώρησης, και λειτουργία του εξαρτήματος.
- Κανονικός προσανατολισμός τάσεων, εύρος θερμοκρασίας, πίεσης και ταχύτητας λειτουργίας.
- Δύναμη και ανθεκτικότητα.
- Βαφή, απόπτωση, ή οποιαδήποτε άλλη θερμική επεξεργασία.
- Διαδικασίες επεξεργασίας, όπως συγκόλληση, συγκολλητές ενώσεις, επικαλύψεις, διαδικασία βιδώματος και καρφώματος.
- Τεχνικές επιθεωρήσεις και εκθέσεις ποιοτικού έλεγχου κατά την κατασκευή, αναφορές επιδιορθώσεων και συντήρησης.
- Πληροφορίες που πρέπει να συλλεχτούν για το σημείο της αστοχίας
- Ημερομηνία και ώρα της αστοχίας, θερμοκρασία και συνθήκες περιβάλλοντος.
- Έκταση ζημιάς, ακολουθία αστοχίας και τραυματισμοί.
- Λειτουργία κατά την στιγμή της αστοχίας.
- Σχεδιαγράμματα, φωτογραφίες, ή σκίτσα της αστοχίας και των παρακείμενων περιοχών.
- Οποιοσδήποτε αποκλίσεις υπηρεσιών που να έχουν συμβάλει στην αποτυχία.
- Γνώμες του προσωπικού που το λειτουργεί όσον αφορά την αστοχία.

#### 1.3.2 Πραγματοποίηση οπτικού έλεγχου.

Ο οπτικός έλεγχος της περιοχής της αστοχίας επιτυγχάνει να οριστεί, φωτογραφηθεί και/ή σχηματικά καταγραφεί:

- η προέλευση της αστοχίας,
- η ύπαρξη συγκεντρωμένων τάσεων,
- η ύπαρξη χρώματος από επαναφορά ή σταδιακή μετάδοση της θραύσης,
- ο προσανατολισμός και το μέγεθος των τάσεων,
- η μέθοδος και ο μηχανισμός ανάλυσης,
- η διεύθυνση της επέκτασης τυχών ρωγμής και η ακολουθία αστοχίας,
- η ύπαρξη ελαττωμάτων που συμβάλλουν στην αστοχία,
- η παρουσία ατελειών που συμβάλλουν στην αστοχία,

- τα μεγέθη και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά.

### **1.3.3 Εκτέλεση θραυστογραφίας.**

Στην περίπτωση που η αστοχία αναφέρεται σε ολική θραύση πραγματοποιείται ιδιαίτερα προσεκτική εξέταση για το αν υπάρχουν θραύσματα. Τα θραύσματα συλλέγονται, προστατεύονται και φυλάσσονται χωρίς να μολύνονται. Οι επιφάνειες θραύσης προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τον μηχανισμό και το είδος της αστοχίας και εξετάζονται με διαφορετικούς τρόπους όπως θα αναφέρεται παρακάτω.

### **1.3.4 Χημική ανάλυση και σύγκριση αποτελεσμάτων με ανάλογες προδιαγραφές. Ανάλυση οποιονδήποτε επιφανειακών διαβρωμένων προϊόντων, αποθεμάτων ή επικαλύψεων.**

Γενικά, η σύνθεση του υλικού βάσης του εξαρτήματος πρέπει να είναι καθορισμένη. Αυτό για να γίνει δεν απαιτείται απαραίτητως χημική ανάλυση. Εντούτοις, είναι σημαντική η διευκρίνιση της σύνθεσης, ή τουλάχιστον οι προδιαγραφές του υλικού, είτε πραγματοποιηθεί χημική ανάλυση είτε όχι. Επίσης υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις που οι προδιαγραφές δεν είναι πλήρης και κατάλληλες για την συγκεκριμένη εφαρμογή, οπότε είναι πολύ σημαντική η γνώση της σύνθεσης του υλικού βάσης.

Όταν καθορίζεται μια σύνθεση υλικού, συχνά διαπιστώνεται ότι αυτό επιτρέπει στο υλικό να ταξινομηθεί σε μια σειρά από προδιαγραφές, και δεν είναι δυνατό να είναι ακριβής όσον αφορά την κατηγορία ή τον τύπο του υλικού. Όλες οι προδιαγραφές έχουν ένα εύρος για κάθε υλικό, όπως επίσης υπάρχουν παραλλαγές μέσα στο ίδιο το προϊόν, ιδιαίτερα στην περίπτωση του χυτού υλικού, και σαν αποτέλεσμα περιορίζεται η ευστοχία και η ακρίβεια των στοιχείων που ανιχνεύονται σε μια ανάλυση. Όπου υπάρχει αμφιβολία για μια συγκεκριμένη ανάλυση, μπορεί να είναι απαραίτητο να γίνει μια ξεχωριστή διπλή ανάλυση για να διευκρινιστεί εάν τα δύο αποτελέσματα συμπίπτουν. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις να υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων διαφορετικών εργαστηρίων, τότε μπορούν να γίνουν περισσότερες από δυο αναλύσεις εάν είναι αναγκαία η ακρίβεια στο αποτέλεσμα της ανάλυσης.

### **1.3.5 Ορισμός μηχανικών ιδιοτήτων και σύγκριση τους με ανάλογες προδιαγραφές.**

Οι μηχανικές δοκιμές είναι χρήσιμες στην επιβεβαίωση ότι το εξάρτημα που έχει αστοχήσει είναι σύμφωνο με το πρότυπο, ή στην αξιολόγηση των συνεπειών των καταστάσεων επιφάνειας στις μηχανικές ιδιότητες του [2]. Όπου απαιτείται δοκιμή κόπωσης, εφελκυσμού ή κρούσης, τα αποτελέσματα θα πρέπει να παρέχουν επαρκές υλικό για την πλήρη επεξεργασία τους. Μπορεί να είναι απαραίτητες μερικές δοκιμές είτε σε ελαφρώς ψήλές είτε σε χαμηλές θερμοκρασίες για να μοιμηθούν τις συνθήκες λειτουργίας του αστοχούντος εξαρτήματος.

Επιβάλλεται προσοχή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων στις εργαστηριακές δοκιμές μικρών δειγμάτων, οι οποίες μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν επαρκώς την συμπεριφορά ενός εξαρτήματος μεγάλου μεγέθους.

### **1.3.6 Μακροσκοπική εξέταση για να αξιολογηθεί η ομοιογένεια, η ακεραιότητα, και η ποιότητα του εξαρτήματος που έχει υποστεί αστοχία.**

Οι διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την πραγματοποίηση ενός μακροσκοπικού ελέγχου είναι:

1. Γενική οπτική επισκόπηση του εξαρτήματος για να αποκτηθεί ολική κατανόηση του. Όπου χρειαστεί, φωτογραφίζεται οποιαδήποτε λεπτομέρεια.
2. Ταξινόμηση της αστοχίας, από μακροσκοπική άποψη, σαν όλκιμο, ψαθυρό, κόπωση, στρέψη κλπ.
3. Καθορισμός της προέλευσης της αστοχίας παίρνοντας δείγματα από τα θραύσματα στο σημείο αστοχίας.
4. Βάση των χαρακτηριστικών των θραυσμάτων και τη δομή του εξαρτήματος, εκτιμάται ο τρόπος φόρτισης (πίεση, συμπίεση, λογισμός ,κλπ.), το επίπεδο της σχετικής πίεσης (υψηλό, μεσαίο ή χαμηλό), και ο προσανατολισμός της τάσης.
5. Αν απαιτείται εξέταση υψηλής μεγέθυνσης, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές ανάλυσης θραύσης για να καθοριστεί ο τρόπος θραύσης (περικρυσταλλική ή διακρυσταλλική) και να εντοπιστούν άλλα χαρακτηριστικά σχετικά με την θραύση. Ανάλυση θραύσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να επιβεβαιωθεί ο μηχανισμός θραύσης, παρατηρώντας τα διάφορα είδη κοιλωμάτων, εδρών, ραβδώσεις, κλπ. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του υλικού περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες τάσεων.

### **1.3.7 Κατηγοριοποίηση της βλάβης (μηχανισμοί θραύσης).**

Σε μια έρευνα αστοχίας είναι αρκετά σημαντικό να γίνει μια κατηγοριοποίηση της ζημιάς που έχει γίνει. Παρακάτω αναφέρονται τέσσερις βασικές και απλές κατηγορίες στις οποίες μπορεί να ταξινομηθεί μια βλάβη. Ασφαλώς υπάρχουν περιπτώσεις που μια βλάβη μπορεί να μην ταξινομείται μόνο σε μια κατηγορία. Αυτό είναι πιο ορατό όταν γίνει περαιτέρω έρευνα στην αστοχία του εξαρτήματος. Οι τέσσερις βασικές κατηγορίες ταξινόμησης μιας βλάβης αστοχίας είναι :

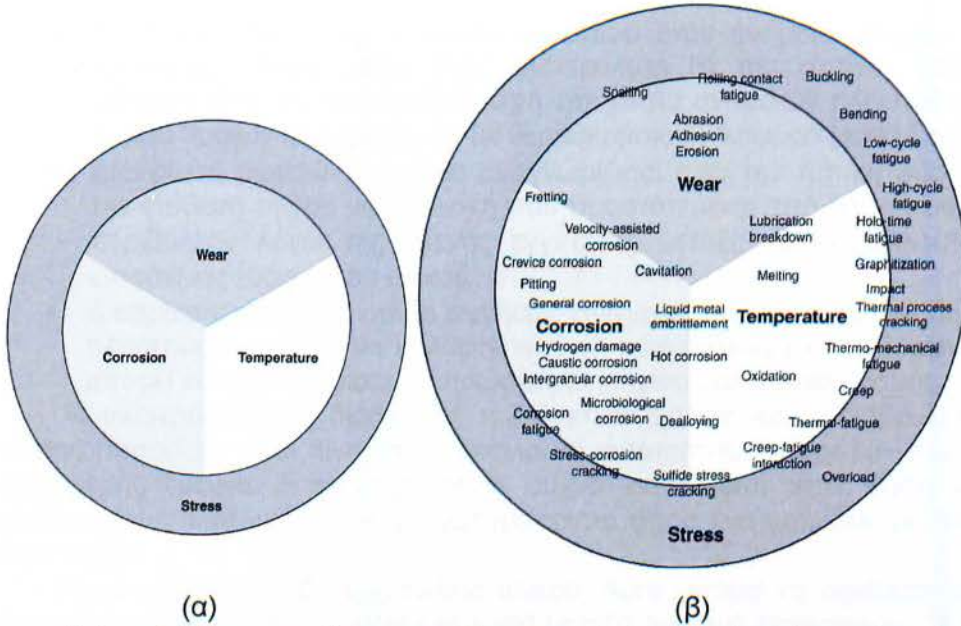
- Διαστρέβλωση (distortion)
- Θραύση (fracture)
- Διάβρωση (corrosion)
- Φθορά (wear)

Μια άλλη μέθοδος ταξινόμησης βλάβης αστοχίας που είναι γνωστή ως «η ρόδα της αστοχίας» (“the wheel of failure.”) βασίζεται στην ταξινόμηση των μηχανισμών βλάβης από την άποψη του περιβάλλοντος τους. Στον κόσμο μας έξι συνθήκες έχουν προσδιοριστεί που συνεισφέρουν στους μηχανισμούς αστοχίας. Αυτοί είναι:

- Πίεση (stress)
- Θερμοκρασία (temperature)
- Διάβρωση (corrosion)
- Φθορά (wear)
- Ακτινοβολία (radiation)
- Ηλεκτρισμός (electrical)

Και σε αυτή την μέθοδο υπάρχει πιθανότητα μια αστοχία να προκαλείται από περισσότερους από ένα μηχανισμούς (σχήμα 1).





**Σχήμα 1.1** Μηχανισμοί που μπορεί να προκαλούν αστοχία. (α): ευρεία ομάδα μηχανισμών, (β): επιμέρους μηχανισμοί των κυρίων ομάδων. [Fig.6 pg.732 και Fig7 pg.733 (1)]

### 1.3.7.1 Χαρακτηριστικά γνωρίσματα διάβρωσης και φθοράς

Η **διάβρωση** μπορεί να είναι εμφανής με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας υλικού, της διάβρωσης επιφάνειας, και της συγκέντρωσης καταθέσεων διάβρωσης, αλλά είναι σημαντικό να ταξινομηθεί η διάβρωση με οπτική παρατήρηση του διαβρωμένου υλικού προτού να γίνει οποιοσδήποτε καθαρισμός. Θεωρούνται γενικά οκτώ βασικές μορφές διάβρωσης:

- Γενική επίθεση (ομοιόμορφη διάβρωση) (general attack)
- Γαλβανική διάβρωση (galvanic corrosion)
- Διάβρωση ρωγμών (crevice corrosion)
- Διάβρωση pitting
- Διάβρωση που συσσωρεύεται γύρω από τους κόκκους (intergranular corrosion)
- Εκλεκτική διύλισης (selective leaching)
- Διάβρωση από πίεση (stress corrosion)
- Erosion-corrosion

Αυτή η ταξινόμηση προτάθηκε αρχικά στη δεκαετία του '60, και από τότε, η ορολογία έχει καθοριστεί με μεγαλύτερη σαφήνεια για να διακρίνει την ιδιαιτερότητα μεταξύ αυτών των κατηγοριών ή τύπων διαβρώσεων.

Μια καλή πρακτική είναι να χρησιμοποιείται η παραπάνω βασική λίστα, μαζί με τη βλάβη υδρογόνου (hydrogen damage), την περιβαλλοντικά-βοηθημένη θραύση, και την υψηλής θερμοκρασίας διάβρωση, για την προκαταρκτική ταξινόμηση μιας διάβρωσης σχετικά με την αστοχία. Τα γενικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που μπορούν να παρατηρηθούν γενικά σε , γαλβανική, ρωγμή, και pitting διάβρωση είναι:

- Ομοιόμορφη διάβρωση, η οποία είναι ορατή από την γενική μείωση του πάχους του υλικού και απώλεια υλικού.

- Γαλβανική διάβρωση, η οποία συμβαίνει όταν ανόμοια μέταλλα είναι σε ηλεκτρική επαφή μέσω ενός ηλεκτρολύτη (ή πιο σπάνια, όταν όμοια μέταλλα είναι σε ηλεκτρική επαφή είτε μέσω ανόμοιων ηλεκτρολυτών είτε ακόμα ομοίων ηλεκτρολυτών με θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ τους).
- Διάβρωση ρωγμών, η οποία αναγνωρίζεται από την τοπική φύση της και την επίθεσή της σε μια περιοχή που προστατεύεται από πλήρη έκθεση στο περιβάλλον λόγω της στενής εγγύτητας μεταξύ του μετάλλου και της επιφάνειας ενός άλλου υλικού.
- Διάβρωση pitting, το οποίο συνήθως ανιχνεύεται εύκολα, αν και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να καλυφτεί από τη συγκέντρωση καταθέσεων και δεν μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως μέχρι να γίνει καλός καθαρισμός.

Η περικρυσταλλική διάβρωση, η εκλεκτική διύλιση και η διάβρωση λόγου πίεσης μπορεί να είναι λίγο πιο δύσκολο να εντοπιστούν μέχρι να γίνει μια πιο λεπτομερής έρευνα. Erosion-corrosion συχνά εντοπίζεται στην βάση τοπικών επιμηκυμένων κοιλωμάτων που αναπτύσσονται όπου ένα γρήγορα ρέοντα υγρό είναι παρόν.

Η **φθορά** περιλαμβάνει απώλεια υλικού. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κακή λίπανση η οποία προκαλεί αυξημένη τριβή μεταξύ των δυο επιφανειών. Σε πολλές περιπτώσεις η παρουσία θραυσμάτων μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση του μηχανισμού φθοράς σε μια αστοχία.

Όταν αντιμετωπίζεται απροσδόκητη φθορά μεταξύ δυο επιφανειών σε σχετική κίνηση, και η λίπανση παρατηρείται να είναι επαρκής, είναι σημαντικό να ερευνηθούν πιθανοί μολυσματικοί παράγοντες. Αυτοί μπορούν να προκύψουν από κάποιο άλλο συστατικό που ρέει στο σύστημα (παραδείγματος χάριν, μέσω της απώλειας σκληρών μορίων επένδυσης χρωμίου ή μέσω της ανάπτυξης προϊόντων διάβρωσης που διαβιβάζονται έπειτα μέσω του συστήματος κυκλοφορίας του λιπαντικού). Άλλες περιστάσεις που οδηγούν στην πρόωρη ένδυση περιλαμβάνουν τη σκόπιμη δολιοφθορά, όπου, παραδείγματος χάριν, μεταλλικά μόρια ή μη-μεταλλικά όπως η λεπτή άμμος έχουν εισαχθεί σκόπιμα σε ένα σύστημα λίπανσης. Αυτές δεν είναι περιστάσεις που ο αναλυτής αστοχίας εξετάζει συνήθως, αλλά εμφανίζονται από καιρό σε καιρό. Τέτοια υλικά μπορούν να προσδιοριστούν και μικροσκοπικά και χημικά, και η προσεκτική τεκμηρίωση και η συνοχή των στοιχείων είναι πολύ σημαντικές σε τέτοιες περιστάσεις.

Όπου έχει πραγματοποιηθεί αστοχία, μπορεί να είναι απαραίτητο να γίνει χημική ανάλυση των συγκεκριμένων περιοχών. Παραδείγματα τέτοιας περίπτωσης είναι διατομικές φθορές, όπου μπορεί να υπάρχουν ψαθυρά υλικά ή φάσεις στα όρια κόκκων, ή σπάσιμο κατά μήκος ευθυγραμμισμένων εγκλεισμάτων ή προϊόντων κατακρήμνισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις συνιστάται χημική ανάλυση χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες τεχνικές. Διάφορα εργαλεία ανάλυσης είναι διαθέσιμα για τέτοιες αξιολογήσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον αναλυτή αστοχίας όπως:

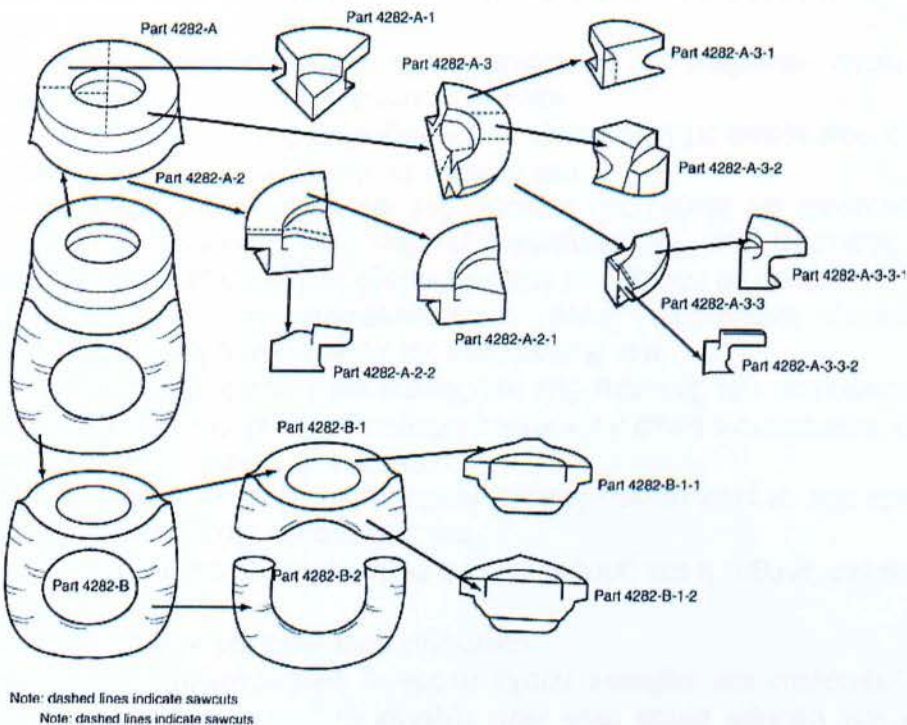
- η ανάλυση ακτίνων X από την φασματοσκοπία διασποράς ενέργειας (EDS),
- τη μικροανάλυση ελέγχων ηλεκτρονίων (EPMA),
- τη φασματοσκοπία ηλεκτρονίων τρυπανιών (AES),
- τη δευτεροβάθμια ιονική μαζική φασματοσκοπία (SIMS),
- και την διάθλαση σκονών ακτίνων X (XRPD).

### **1.3.8 Μεταλλογραφική εξέταση για να αξιολογηθούν τα μικροδομικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Καθορισμός της κατεύθυνσης των**

**παραμορφώσεων των κατεργασμένων υλικών και η σχέση τους με εφαρμόσιμες και υπολειπόμενες τάσεις.**

Η επιλογή και η κοπή του επιθυμητού δείγματος δεν πρέπει να γίνει πριν ολοκληρωθεί η συλλογή των απαιτούμενων πληροφοριών του εξαρτήματος όπως παραδείγματος χάριν, πριν γίνει η χημική του ανάλυση. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να χαθούν σημαντικές πληροφορίες ή να καταστραφούν επιφάνειες που επρόκειτο να μελετηθούν και έτσι να συμβάλουν σε λανθασμένη και αποτυχημένη ανάλυση αστοχίας.

Όταν τελικά τα δείγματα πρόκειται να ληφθούν από μια υπαγόμενη περιοχή, είναι σημαντικό να καταγραφεί ακριβώς το μέρος από όπου λήφθηκαν, συμπεριλαμβανομένου του προσανατολισμού τους. Οι φωτογραφίες του μέρους πριν και μετά από τον τεμαχισμό είναι πολύτιμες. Μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο να χαρακτηριστεί η θέση των περικοπών που εφαρμόζονται στο μέρος προτού να τεμαχιστεί ή φωτογραφιστεί. Τα σκίτσα που τεκμηριώνουν την τέμνουσα ακολουθία και που παρέχουν το μοναδικό προσδιορισμό στα επακόλουθα τεμαχισμένα κομμάτια είναι πολύ πολύτιμα, όπως αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2 .



**Σχήμα 1.2** Τεμαχισμός του εξεταζόμενου κομματιού και επιλογή δειγμάτων. [Fig.24 pg.759 (1)]

Εκτός από τα δείγματα που λαμβάνονται από ένα υπαγόμενο μέρος, είναι συχνά σημαντικό να ληφθούν δείγματα σε περιοχές μακριά από τον τομέα της αστοχίας ή από παρόμοια μέρη που δεν έχουν αστοχήσει. Αυτά χρησιμεύουν ώστε να παρθεί μια εικόνα της μικροδομής του συστατικού εκτός από αυτή της χαλασμένης περιοχής, έτσι ώστε οποιοσδήποτε μικροδομικές πτυχές που είναι

συγκεντρωμένες στο μελετώμενο μέρος, και ιδιαίτερα στη χαλασμένη περιοχή, να μπορούν να προσδιοριστούν.

Όσο σημαντική είναι η επιλογή του κατάλληλου μεταλλογραφικού δείγματος για την εξέταση της αστοχίας, τόσο σημαντική είναι και η επιλογή του σωστού μέσου για την εξαγωγή ενός θραύσματος. Ιδιαίτερα όταν υπάρχουν γωνίες – άκρα στο δείγμα, όπως συνήθως συμβαίνει, που επιθυμούμε να διατηρηθούν τότε χρησιμοποιείται ένα σκληρό υλικό για στερέωση ή θα μπορούσε να επενδυθεί ηλεκτρολυτικά ή χρησιμοποιώντας ηλεκτρολυτικά διαλύματα πριν την εξαγωγή τους. Σε γενικές γραμμές, η ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση με νικέλιο, χαλκό, σίδηρο ή χρώμιο είναι η μέθοδος που προτιμάται γιατί η σύνδεση είναι ισχυρότερη, με λιγότερη τάση απομάκρυνσης της σε σχέση με τα απλά δοκίμια.

Όταν ζητείται αυτά τα δείγματα να παρουσιαστούν σε άλλους, είναι χρήσιμο να τοποθετηθούν σε διαφανές πλαστικό, αφού με αυτόν τον τρόπο είναι εύκολο να παρατηρηθούν από όλες τις πλευρές τους και να αποκτηθεί μια ολοκληρωμένη οπτική άποψη του αντικειμένου και την τοποθεσία από την οποία αποσπάστηκε. Ωστόσο η διατήρηση των άκρων του δείγματος συχνά επιβαρύνεται με τα διαφανή πλαστικά αν και είναι διαθέσιμα κάποια ειδικά υλικά που βοηθούν κάπως στην προστασία τους.

Ένα δείγμα από το υλικό του υπαγόμενου αντικειμένου αναλύεται για διάφορους λόγους. Αυτοί θα μπορούσαν να είναι:

1. Ο προσδιορισμός της μικροδομής, αν είναι κοινή με αυτήν που απαιτεί το αντικείμενο σύμφωνα με την λειτουργία του.
2. Η αξιολόγηση του τύπου και της έκτασης της ζημιάς ως αποτέλεσμα της γενικής λειτουργίας του, συμπεριλαμβανόμενου της φόρτισης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία) που δρουν σε αυτό.
3. Η αξιολόγηση της συγκόλλησης ή άλλες διαδικασίες ένωσης που υιοθετούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής του.
4. Ο προσδιορισμός της προέλευσης και της πορείας του ραγίσματος και η πιθανή σχέση του με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως τα εγκλείσματα ή τα όρια των κόκκων.
5. Η εκτίμηση της έκτασης της υπερθέρμανσης που μπορεί να είχε εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.
6. Η εξέταση του προσανατολισμού στη μικροδομή και η πιθανή σχέση του με την αστοχία.
7. Η κατανομή των φάσεων μέσα στο υλικό.

Αφότου τα μεταλλογραφικά δείγματα έχουν λειανθεί και στιλβωθεί έπειτα πρέπει να εξεταστούν (χημική προσβολή) πριν γίνει καμία χάραξη πάνω τους. Αυτό επιτρέπει την καλύτερη παρατήρηση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων όπως εγκλείσματα, ρωγμές, και πόροι και επιδράσεις από ξένα υλικά, όπως ο χαλκός στο χάλυβα ή την επιφανειακή επικάλυψη, οι οποίοι μπορούν να μην είναι αισθητοί μετά από τη χαρακτηριστική διαδικασία.

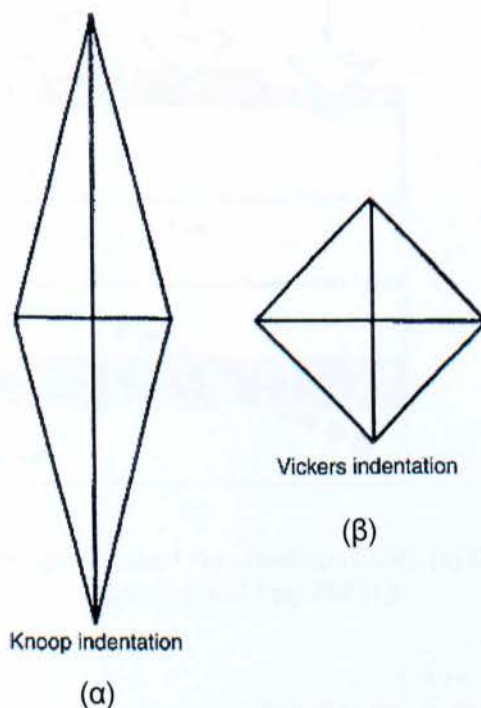
Η μεταλλογραφική εξέταση επιτρέπει το χαρακτηρισμό πολλών παραμέτρων έτσι ώστε να καθοριστεί η αιτία μιας αστοχίας. Η μικροδομή εξαρτημάτων που δεν έχουν πάθει αστοχία ή δείγματα παρόμοιων υλικών μπορούν να εξεταστούν για σκοπούς σύγκρισης, επειδή οι μικροδομικές παράμετροι μπορούν να είναι πολύ σημαντικοί στη γενική ανάλυση, ακόμα και όταν δεν είναι συγκεκριμένες οι αιτίες της αστοχίας. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που μπορούν να μετρηθούν είναι το μέγεθος και η μορφή των κόκκων, το μέγεθος και η κατανομή των εγκλεισμάτων, η κατανομή των διφασικών μορίων, το πάχος της επένδυσης ή του επιστρώματος,

και την έκταση και τη φύση μιας θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης που παράγεται κατά την διάρκεια συγκόλλησης ή άλλης διαδικασίας.

### 1.3.9 Εκτέλεση μικροσκληρομέτρησης για την αξιολόγηση σε βάθος της ψυχρής κατεργασίας για τον καθορισμό της ποιότητας συγκόλλησης ή για τον προσδιορισμό των φάσεων. [3]

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας μπορεί να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και μπορεί να προσδιοριστεί με μεθόδους μικροδιεσδοσης (microindentation) και νανοδιεσδοσης (nanoindentation). Πολλές προδιαγραφές παρέχουν ένα μεγάλο εύρος σκληροτήτων, και αυτή η τιμή μπορεί να συσχετιστεί εύκολα με τη δύναμη τάνυσης, πιο συγκεκριμένα σε χάλυβες. Συνεπώς η σκληρότητα είναι μια από τις ιδιότητες που σχεδόν πάντα μελετούνται κατά την ανάλυση αστοχίας.

Σκληρομέτρηση με την μέθοδο μικροδιεσδοσης γίνεται συνήθως με έναν διεισδυτή τύπου διαμάντι (Knoop ή Vickers), σχήματος πυραμίδας και χρησιμοποιείται φόρτιση από 10g έως και 1kg. Ο διεισδυτής Knoop αφήνει αποτύπωμα σχήματος ρόμβου (με διάσταση στις διαγώνιους 1/7) και ο Vickers αφήνει αποτύπωμα τετραγωνικό.



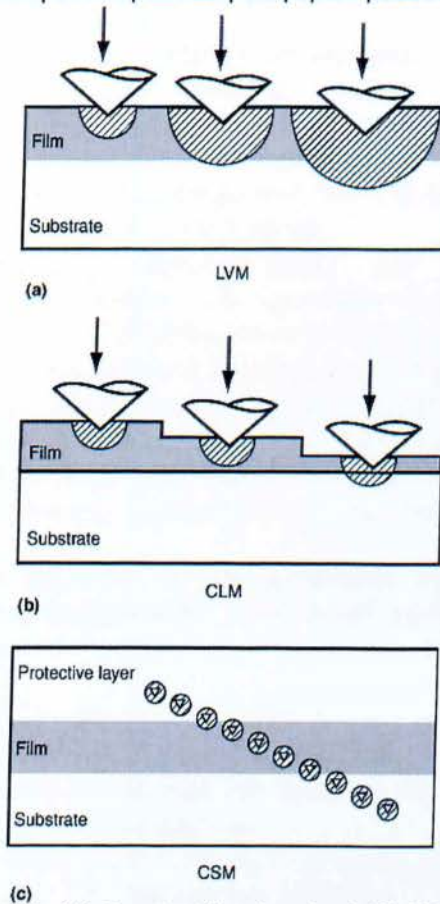
**Σχήμα 1.3** Αποτύπωμα σκληρομέτρησης κατά (α): Knoop, (β): Vickers. [Fig.26 pg.761 (1)]

Η επιλογή των διεισδυτών συνήθως γίνεται τυχαία, αλλά στην περίπτωση του Vickers, είναι λιγότερο ευαίσθητος σε επιφανειακές μεταβολές αφού διεισδύει πιο βαθιά, επομένως είναι πιο ευάλωτος σε μετρητικά λάθη.

Βέβαια πρόσφατα έχουν κατασκευαστεί νέας τεχνολογίας μικρό-μηχανήματα που υπολογίζουν την σκληρότητα και έχουν περιορίσει σημαντικά τα σφάλματα. Επίσης αυτά χρησιμοποιούν διεισδυτές Vickers.

Άλλοι τρόποι για τον καθορισμό της σκληρότητας είναι η μέθοδος constant load method (CLM), η οποία περιλαμβάνει την αφαίρεση διαδοχικών λεπτών στρωμάτων υλικού και εκτέλεση σκληρομέτρησης σε κάθε ένα από αυτά (σχήμα 1.4b), και την μέθοδο cross-sectional method (CSM) στην οποία μια διατομή προετοιμάζεται, όπως είναι συνηθισμένο σε μεταλλουργικές αξιολογήσεις (σχήμα 1.4c).

**Σχήμα 1.4** Σχηματική αναπαράσταση διαφόρων μεθόδων σκληρομέτρησης. (a) Load



variation method (LVM). (b) Constant load method (CLM). (c) Cross-sectional method (CSM). [Fig.27 pg.762 (1)]

Στην μέθοδο σκληρομέτρησης νανοδιείσδυσης, η σκληρότητα υπολογίζεται από την δεδομένη καμπύλη φόρτισης-μετατόπισης. Η σκληρότητα καθορίζεται ως η μέση πίεση επαφής κάτω από τον διεισδυτή σε μέγιστη φόρτιση.

### 1.3.10 Εκτέλεση υψηλής/λεπτομερής μεταλλογραφικής εξέτασης χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) για την μελέτη των φάσεων που δεν εντοπίζονται με το φως του οπτικού μικροσκοπίου.[4]

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα όργανα για την έρευνα της μικροδομής των μεταλλικών υλικών. Έναντι του οπτικού μικροσκοπίου, επεκτείνει το εύρος ανάλυσης ενώ η χρήσιμη μεγέθυνση επεκτείνεται πέρα από  $M \times 10000$  μέχρι  $M \times 60000$ , κλείνοντας το χάσμα μεταξύ του

οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διερχόμενης δέσμης. Έναντι της οπτικής μικροσκοπίας, το βάθος της εστίασης είναι μεγαλύτερο, κάτι που οφείλεται στο πολύ μικρό άνοιγμα της δέσμης.

Η θραυστογραφία είναι πιθανώς ο δημοφιλέστερος τομέας των SEM. Το μεγάλο βάθος εστίασης, η δυνατότητα της μεταβαλλόμενης μεγέθυνσης πέρα από ένα μεγάλο εύρος, η πολύ απλή μη καταστρεπτική προετοιμασία δειγμάτων με άμεσο έλεγχο, και η τρισδιάστατη εμφάνιση των θραυστογραφιών SEM κάνουν το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης ένα αναπόφευκτο εργαλείο στις μελέτες αστοχίας και την έρευνα θραύσης.

Αν και η ερμηνεία της μικροθραυστογραφίας απαιτεί την πρακτική και την κατανόηση των μηχανισμών θραύσης, υπάρχει μόνο ένας μικρός αριθμός βασικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που είναι σαφώς αναγνωρίσιμος και ενδεικτικός ενός ιδιαίτερου τρόπου αστοχίας:

- Κυψελωτή θραύση, χαρακτηριστικό των αποτυχιών λόγω μεγάλων τάσεων των όγκιμων μετάλλων και κραμάτων.
- Έδρες σχισίματος, χαρακτηριστικές των ψαθυρών διακρυσταλλικών θραύσεων, των μετάλλων και κραμάτων του κυβικού χωροκεντρωμένου (BCC) και αυτών της μεγίστης πυκνότητας εξαγωνικού (HCP) συστήματος.
- Η ψαθυρή περικρυσταλλική θραύση, χαρακτηριστικό των εύθραυστων από επαναφορά χαλύβων, στους οποίους η θραύση οφείλεται στο διαφορισμό ενός εύθραυστου είδους στα όρια των κόκκων, στο περικρυσταλλικό ράγισμα από διάβρωση και τάση ή στην ευθραυστότητα υδρογόνου.
- Σταδίου II ραβδώσεις, χαρακτηριστικές της αποτυχίας από κόπωση.

**1.3.11 Κατάλληλη εξέταση σε οποιεσδήποτε κρίσιμες ανωμαλίες, όπως εγκλείσματα και κατακρημνίσεις, που είναι πολύ μικρά -δυσδιάκριτα για ογκώδη αναλύσεις.**

#### **1.3.12 Χρήση ακτινών – Χ.**

Γίνεται χρήση ακτινών – Χ για τον καθορισμό:

- του επιπέδου των υπολειπομένων τάσεων, και
- των σχετικών ποσοστών φάσεων.

Για παράδειγμα, ωστενίτη ή υπολειπόμενο ωστενίτη, φερρίτη ή δ φερρίτη , μαρτενσίτη, φάση σίγμα, και καρβίδια του χάλυβα.

#### **1.3.13 Εκτέλεση δοκιμών προσομοίωσης.**

Η εκτέλεση δοκιμών προσομοίωσης συνήσταται για την αξιολογηση κρίσιμων χαρακτηριστικών του υλικού (όπως η τάση διαβρωτικού ραγίσματος σε ένα ιδιαίτερο περιβάλλον), για τον καθορισμό του βαθμού στίλβωσης (ως ποιότητα επιφανείας) και για την επιβεβαίωση της μεθόδου της θερμικής κατεργασίας ή βαφής.

#### **1.3.14 Σύνοψη και ανάλυση όλων των σχετικών στοιχείων**

Κατά την συνοψη και ανάλυση όλων των σχετικών στοιχείων, συνήσταται αν είναι δυνατό να λαμβάνεται συμβουλή από εμπειρογνώμονες.

#### **1.3.15 Σύνταξη και διανομή της έκθεσης ανάλυσης.**

Η έκθεση θα πρέπει να περιλαμβάνει συμβουλές για την αποφυγή μελλοντικών προβλημάτων σε νέο ίδιο ή σε άλλο παρόμοιο εξαρτήματα.

**1.3.16 Τήρηση κατά γράμμα αυτών των συμβουλών.**

**1.3.17 Συντήρηση της έρευνας προς όφελος άλλων εξεταστών.**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Ο χάλυβας (κοινώς ασάλι) είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου[5]. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξειδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων.

Το ασάλι είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις «βαριές βιομηχανίες». Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. Μια από τις τρεις Ευρωπαϊκές Κοινότητες που ιδρύθηκαν το 1957 ήταν και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα.

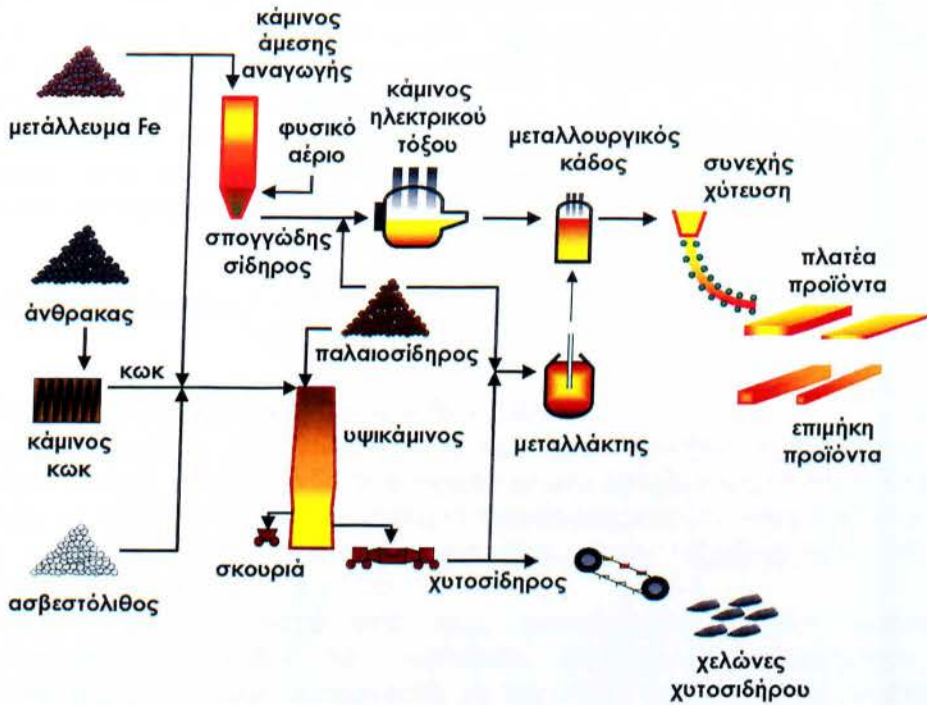
Η ιστορία του χάλυβα ξεκινά γύρω στο 1000 π.Χ., όταν μεταλλουργοί της εποχής εκείνης άρχισαν να παράγουν χάλυβα συστηματικά με ενανθράκωση σπογγώδους σιδήρου. Πάντως οι Χετταίοι γνώριζαν πώς να παράγουν χάλυβα ήδη από το 2300 π.Χ. Την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, πολλοί μεσογειακοί λαοί, αλλά και οι Ινδοί, οι Κινέζοι και οι Ιάπωνες γνώριζαν την τέχνη της παραγωγής σπογγώδους σιδήρου και χάλυβα, καθώς και την τέχνη της σκλήρυνσης του χάλυβα με θέρμανση και απότομη ψύξη («βαφή»). Περίφημα ήταν τα σφυρήλατα χαλύβδινα δαμασκηνά σπαθιά, που κατασκευάζονταν κατά τον Μεσαίωνα στη Συρία, αλλά και σε τόπους πιο μακρινούς όπως στην Ιαπωνία.

Η σύγχρονη ιστορία του χάλυβα αρχίζει στα μέσα του 19ου αι., όταν ο άγγλος εφευρέτης Χένρι Μπέσσεμερ, ανακάλυψε πώς να μετατρέπει τον τηγμένο χυτοσίδηρο σε χάλυβα με εμφύσηση οξυγόνου σε έναν κάδο («μεταλλάκτη») επενδυμένο με βασικά πυρίμαχα τούβλα. Την ίδια εποχή ανακαλύφθηκε η μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα σε καμίνοους ανοικτής εστίας (κάμιнос Siemens-Martin). Σήμερα, η ανακάλυψη του Μπέσσεμερ χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την απανθράκωση του χυτοσιδήρου. Η κάμιнос Siemens-Martin εγκαταλείφθηκε ως πιο ενεργοβόρος και λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον.

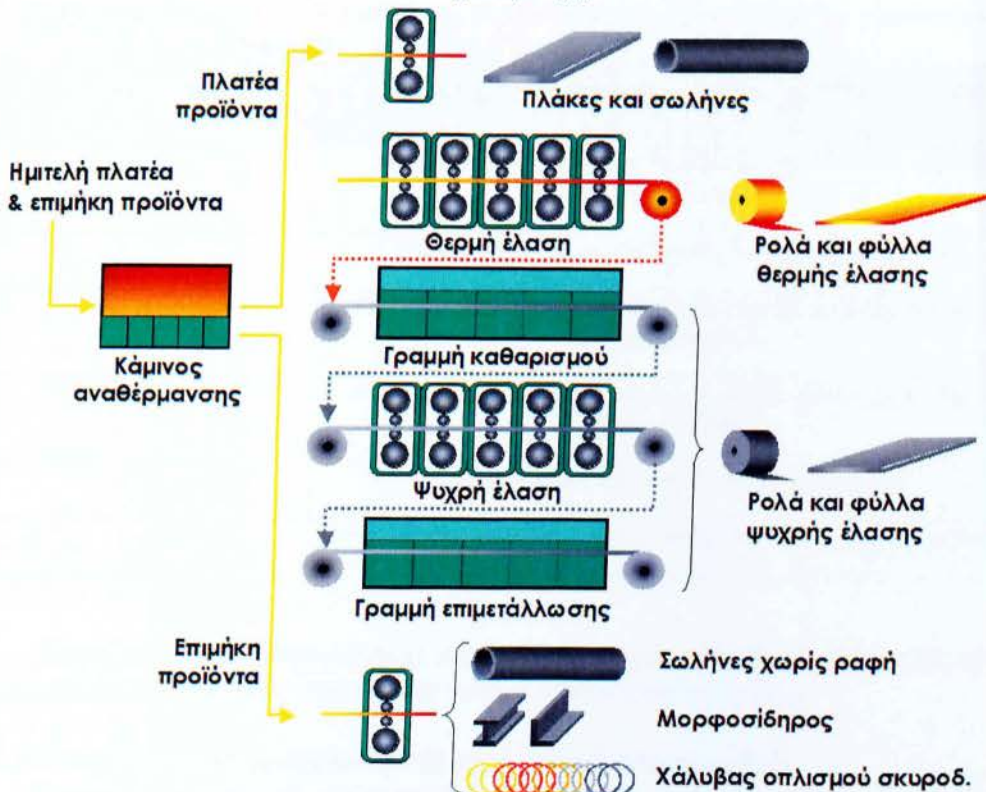
Ο χάλυβας παράγεται με τρεις βασικές μεθόδους:

1. με αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων σε υψικάμινο για την παραγωγή χυτοσιδήρου, και την μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα μέσα σε μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου·
2. με την άμεση αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων (δηλ. αναγωγή σε στερεά κατάσταση) σε φρεατώδη κάμινο για την παραγωγή σπογγώδους σιδήρου (Direct reduced iron ή DRI), και την μετατροπή του σπογγώδους σιδήρου σε χάλυβα μέσα σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου· και

3. με την ανάτηξη παλαιοσιδήρου (σκραπ) σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Furnace - EAF).



**Σχήμα 2.1** Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής χυτοσιδήρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα. [5]



**Σχήμα 2.2** Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα. [5]

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του 2005, το 65,4% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα προέρχεται από τις δύο πρώτες καθιερωμένες μεθόδους και το 31,7% από την ανάπτυξη παλαιοσιδηρών και σπογγώδους σιδήρου σε κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου. Ένα μικρό ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα (2,9% για το 2005) προέρχεται από την μετατροπή χυτοσιδήρου σε κάμινους ανοικτής εστίας ή άλλες μεθόδους.

Στην Ελλάδα, όλη η παραγωγή χάλυβα (περίπου 2,5 εκατ. τόνοι ετησίως) προέρχεται από την ανάπτυξη παλαιοσιδήρου και προορίζεται κυρίως για την παραγωγή μπετόβεργας.

## 2.2 Ονοματολογία

### 2.2.1 Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI – SAE.

Για την ονομασία των χαλύβων, το σύστημα AISI-SAE χρησιμοποιεί ένα τετραψήφιο αριθμό (xyzz) [6]. Τα δύο πρώτα ψηφία αναφέρονται στην οικογένεια κραμάτων, ως προς το ή τα κύρια στοιχεία προσθήκης και στο ποσοστό τους στο χάλυβα, αντιστοίχως. Τα επόμενα ψηφία δίνουν την περιεκτικότητα του σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100.

Πολλές φορές, μπροστά από τους τετραψήφιους αυτούς κωδικούς, χρησιμοποιούνται γράμματα του λατινικού αλφαβήτου, προκειμένου να υποδηλωθεί η μεταλλουργική κατεργασία, με την οποία έχει παραχθεί ο χάλυβας (πίνακας 2.1).

**Πίνακας 2.1** Πρόσθετα δηλωτικά της μεταλλουργικής κατεργασίας με την οποία έχει παραχθεί ο χάλυβας. [Πίνακας 15.2 σελ. 514 (6)]

| ΠΡΟΘΕΜΑ | ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ                                   |
|---------|--|
| A       | Κραματωμένος χάλυβας παραγόμενος σε κάμινο όξινης επένδυσης.             |
| B       | Κοινός χάλυβας παραγόμενος σε κάμινο Bessemer.                           |
| C       | Κοινός χάλυβας παραγόμενος σε κάμινο ανοικτής εστίας με βασική επένδυση. |
| D       | Κοινός χάλυβας παραγόμενος σε κάμινο ανοικτής εστίας με όξινη επένδυση.  |
| E       | Χάλυβας παραγόμενος σε ηλεκτρική κάμινο.                                 |
| X       | Χάλυβας με ειδική σύσταση, εκτός των προδιαγεγραμμένων.                  |

Εκτός από την ονοματολογία κατά το σύστημα AISI-SAE, διάφορες χώρες χρησιμοποιούν δικά τους συστήματα τυποποίησης των χαλύβων.

### 2.2.2 Ονοματολογία χαλύβων κατά το αγγλικό σύστημα B.S.

Το αγγλικό σύστημα χρησιμοποιεί εξαψήφιους κωδικούς, καθένας από τους οποίους χωρίζεται σε τρία μέρη:

- i. Το πρώτο τριψήφιο μέρος του κωδικού αφορά τον τύπο του χάλυβα (πίνακας 2.2).
- ii. Το δεύτερο μέρος είναι ένα γράμμα, που δίνει ιδιαίτερες πληροφορίες για τον χάλυβα (πίνακας 2.3).
- iii. Το τρίτο διψήφιο μέρος του κωδικού δίνει το ποσοστό του χάλυβα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένο επί 100.

**Πίνακας 2.2** Πρώτο μέρος της κωδικής ονομασίας χαλύβων, κατά το σύστημα B.S.  
[Πίνακας 15.3 σελ 514 (6)]

| 1° ΜΕΡΟΣ ΚΩΔΙΚΟΥ | ΤΥΠΟΣ ΧΑΛΥΒΑ  |
|------------------|---|
| 000-199          | Κοινός ανθρακούχος ή ανθρακούχος με Mn, ο τριψήφιος αριθμός δίνει το ποσοστό του Mn, πολλαπλασιασμένο επί 100.            |
| 200-240          | Αυτόματος χάλυβας (χάλυβας αποκοπής θείου), το δεύτερο και τρίτο ψηφίο δίνουν το ποσοστό του S, πολλαπλασιασμένο επί 100. |
| 250              | Μαγγανιοπυριτιούχος χάλυβας.  |
| 300-499          | Ανοξειδωτος χάλυβας υψηλής αντοχής εν θερμώ.  |
| 500-900          | Κραματωμένος χάλυβας.   |

**Πίνακας 2.3** Δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας χαλύβων, κατά το σύστημα B.S.  
[Πίνακας 15.4 σελ.515 (6)]

| 2° ΜΕΡΟΣ ΚΩΔΙΚΟΥ | ΤΥΠΟΣ ΧΑΛΥΒΑ   |
|------------------|--|
| A                | Η ακριβής χημική σύσταση του χάλυβα καθορίζεται με χημική ανάλυση. |
| H                | Ο χάλυβας προσφέρεται για κατεργασία σκλήρυνσης (βαφή).            |
| M                | Ο χάλυβας προσφέρεται για ειδική μηχανική κατεργασία.              |
| S                | Πρόκειται για ανοξειδωτο χάλυβα.                                   |

Για παράδειγμα, ο χάλυβας 070M20 είναι κοινός ανθρακούχος, με 0,20% C και 0,70% Mn, οι μηχανικές ιδιότητες του οποίου μπορούν να βελτιωθούν με ειδικές μεθόδους.

### 2.2.3 Ονοματολογία χαλύβων κατά το γαλλικό σύστημα AFNOR.

Κατά την κωδικοποίηση με το γαλλικό σύστημα AFNOR, οι ονοματολογίες των κοινών χαλύβων παίρνουν τη μορφή Czz, όπου zz είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100. Ενίοτε, ακολουθεί κάποιο από τα γράμματα a, b ή m, που υποδηλώνουν τις προδιαγραφές περιεκτικότητας των ακαθαρσιών, οι οποίες δίνονται από πίνακα. Όταν το γράμμα C ακολουθείται από το X, τότε ο

κοινός χάλυβας είναι πολύ καλής ποιότητας, κατάλληλος για θερμικές κατεργασίες. Για παράδειγμα, χάλυβας C 40 e, είναι κοινός ανθρακούχος με 0,40% κ.β. C, στον οποίο το ποσοστό των ακαθαρσιών S+P ισούται με 0,07%.

Ακολουθώντας το ίδιο σύστημα, οι ονοματολογίες των ελαφρά κραματομένων χαλύβων έχουν την μορφή  $zzK_1K_2K_3x_1x_2x_3$ . Με τον ίδιο τρόπο, με  $zz$  δηλώνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100.  $K_1$ ,  $K_2$  και  $K_3$  είναι τα τρία κύρια στοιχεία προσθήκης, για τον συμβολισμό των οποίων χρησιμοποιούνται γράμματα του λατινικού αλφαβήτου ως εξής: A για Al, C για το Cr, K για το Co, U για τον Cu, M για το Mn, D για το Mo, N το Ni, Pb για τον Pb, S για το Si, F για το S, W για το W, V για το V, κλπ. Οι ποσότητες  $x_1$ ,  $x_2$  και  $x_3$  αναφέρονται στα αντίστοιχα ποσοστά σε χάλυβα, πολλαπλασιασμένα επί 4, για περιεκτικότητες 1-3%, και επί 10 για περιεκτικότητες μικρότερες από 1%. Για παράδειγμα, ο χάλυβας 50CV4 είναι ελαφρά κραματωμένος, με ποσοστό άνθρακα 0,40%. Περιέχει, επίσης, χρώμιο σε ποσοστό  $4/4=1\%$  και λίγο βανάδιο.

Οι ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες, δηλώνονται με το γράμμα Z, ενώ οι ποσότητες  $x_1, x_2, x_3, \dots$  είναι διψήφια και δίνουν τις περιεκτικότητες των προσθηκών. Για παράδειγμα, ο Z70WK1205 είναι ισχυρά κραματωμένος χάλυβας, με χημική σύσταση: 0,70% C, 12% W και 5% Co.

#### **2.2.4 Ονοματολογία χαλύβων κατά το γερμανικό σύστημα DNA**

Σύμφωνα με το γερμανικό σύστημα DNA, οι κωδικοί των κοινών ανθρακούχων χαλύβων έχουν τη μορφή Styy, όπου το St δηλώνει ότι πρόκειται για κοινό χάλυβα και με yy δίνεται η αντοχή σε εφελκυσμό, μετρημένη σε  $\text{kg/mm}^2$ . Πολλές φορές ακολουθούν δύο ακόμη ψηφία, τα οποία αφορούν, τον αντίστοιχο πίνακα DIN ορισμένων προδιαγραφών. Για παράδειγμα ο St 3722 είναι κοινός χάλυβας, με αντοχή σε εφελκυσμό  $37\text{kg/mm}^2$  και ικανοποιεί τις προδιαγραφές του πίνακα DIN 1622.

Οι κοινοί χάλυβες, που προορίζονται για επιβελτίωση ή ενανθράκωση δηλώνονται με το γράμμα C, ακολουθούμενο από την περιεκτικότητα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100, όπως περιγράφηκε στην περίπτωση της γαλλικής μεθόδου ονοματολογίας. Όταν οι περιεκτικότητες των ακαθαρσιών είναι πολύ χαμηλές, προστίθεται και το γράμμα K στο τέλος. Για παράδειγμα, ο C 40 K είναι κοινός χάλυβας με 0,40% C και ελάχιστο ποσοστό ακαθαρσιών

Πολλές φορές, χρησιμοποιούνται γράμματα του λατινικού αλφαβήτου, προκειμένου να δηλωθεί η θερμική κατεργασία που έχει υποστεί ο χάλυβας. Το E δηλώνει θερμική κατεργασία ενανθράκωσης, το G ανόπτηση, το N εξομάλυνση, το V επιβελτίωση, κλπ. Τέλος, με GS δηλώνονται οι χάλυβες που προέρχονται από χύτευση. Για παράδειγμα, ο GS 45 είναι χυτοχάλυβας με αντοχή σε εφελκυσμό  $45\text{kg/mm}^2$ , ενώ ο GS C45 είναι κοινός χυτοχάλυβας με 0,45% κ.β. C.

Όσον αφορά τους κραματωμένους χάλυβες, για το συμβολισμό των στοιχείων προσθήκης χρησιμοποιείται ο αντίστοιχος χημικός συμβολισμός, ακολουθούμενος από τις περιεκτικότητες πολλαπλασιασμένες επί 4, για τα Co, Cr, Mn, Ni, Si και W, επί 10 για τα Al, Mo, Cu, Ti και V, και επί 100 για τα S, P, N και C. Για παράδειγμα, ο 30 CrNiMo 8 είναι κραματωμένος χάλυβας με περιεκτικότητα: 0,30% C,  $8/4 = 2\%$  Cr, 2% Ni και 0,3% Mo.

## 2.3 Ταξινόμηση χαλύβων

Οι χάλυβες συνιστούν κράματα Fe-C, με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 1,5% κ.β. [6]. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν ορισμένα άλλα στοιχεία κραμάτωσης, τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές ή και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

**2.3.1 Ως προς τη χημική τους σύσταση**, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες και
- Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες.

Οι κραματωμένοι χάλυβες, ανάλογα με το ποσοστό των κραματικών στοιχείων διακρίνονται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους,
- Μέτρια κραματωμένους και
- Ισχυρά κραματωμένους.

**2.3.2 Ως προς τον προορισμό τους**, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Χάλυβες διαμόρφωσης και
- Χυτοχάλυβες.

**2.3.3 Ως προς τις χρήσεις τους**, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Εργαλειοχάλυβες (χάλυβες αντοχής σε φθορά από τριβή, καλής δυσθραυστότητας, καλής εμβαιπτότητας, αντοχής σε επαναφορά),
- Ανοξειδωτους ή πυρίμαχους χάλυβες και
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών (μαλακοί μαγνήτες, μόνιμοι μαγνήτες, μη μαγνητικοί χάλυβες).
- Χάλυβες κατασκευών (υποεπιτηκτοειδείς, νικελιούχοι, νικελιοχρωμιούχοι, χάλυβες Ni-Cr-Mo, χρωμιούχοι, χρωμιομολυβδαινιούχοι, χρώμιοβαναδιούχοι, μαγγανιοπυριπιούχοι, χάλυβες μαρτενγήρανσης ή *maraging*, αυτόματοι, διφασικοί φερριτομαρτενσιτικοί *dual-phase*, κλπ).

## 2.4 Επίδραση στοιχείων προσθήκης

Οι κοινοί χάλυβες πολλές φορές δεν έχουν τις κατάλληλες ιδιότητες για συγκεκριμένες εφαρμογές που μπορεί να απαιτούν υψηλότερη αντοχή σε μηχανική φθορά και διάβρωση, καλύτερη εμβαιπτότητα και μεγαλύτερη δυσθραυστότητα ή ολκιμότητα [6]. Οι προσθήκες στοιχείων βοηθούν να βελτιωθούν οι ανωτέρω ιδιότητες των κοινών χαλύβων με τους ακόλουθους τρόπους:

- i. Σκλήρυνση του χάλυβα με τη δημιουργία στερεού διαλύματος.
- ii. Σχηματισμός καρβιδίων (προσθήκη καρβιδιογόνων στοιχείων).
- iii. Υποβοήθηση αποβολής του άνθρακα, από το πλέγμα του σιδήρου, με τη μορφή γραφίτη.
- iv. Σταθεροποίηση του πλέγματος του ωστενίτη ( $\gamma$ -φερρογόνα στοιχεία) ή του φερρίτη ( $\alpha$ -φερρογόνα στοιχεία).
- v. Μεταβολή της κρίσιμης ταχύτητας βαφής.
- vi. Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση.
- vii. Επίδραση στην ανάπτυξη των κόκκων.

viii. Βελτίωση της κατεργασιμότητας.

Στον πίνακα 2.4 φαίνεται η επίδραση που επιφέρουν τα διάφορα στοιχεία προσθήκης στις ιδιότητες των χαλύβων.

**Πίνακας 2.4** Επίδραση στοιχείων προσθήκης στις ιδιότητες των χαλύβων. [Πίνακας 15.7 σελ. 520 (6)]

| ΣΤΟΙΧΕΙΟ | ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ                               | ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ                           | ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ – ΚΥΡΙΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ   |
|----------|--|---------------------------------------|--|
| Ni       | γ-φερρογόνο και γραφιτζόν                | 10% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe   | Προκαλεί σημαντική αύξηση της εμβαπτότητας, αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και παρεμποδίζει την ανακρυστάλλωση. Προστίθεται επίσης, για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής σε διάβρωση.                                    |
| Mn       | γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο             | 3% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe    | Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας, πολύ μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μεγάλη μείωση των σημείων $M_i$ και $M_s$ .   |
| Cr       | α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο             | άνευ ορίου στον α-Fe, 12,8% στον γ-Fe | Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας, μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μεγάλη βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση.   |
| Si       | α-φερρογόνο και γραφιτζόν                | 18,5% στον α-Fe, 6% στον γ-Fe         | Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας και αύξηση της σκληρότητας. Δίνει φερριτικούς χάλυβες, με μεγάλους κόκκους για ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται επίσης, για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής σε διάβρωση. |
| Mo       | α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο             | 37,5% στον α-Fe, 5% στον γ-Fe         | Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, αύξηση της σκληρότητας και της δυσθραυστότητας, και παρεμποδίζει την γήρανση. Προστίθεται για αύξηση της αντοχής σε επαναφορά, σε φθορά και διάβρωση, και για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. |
| W        | α-φερρογόνο και ισχυρά καρβιδιογόνο      | 33% στον α-Fe, 6% στον γ-Fe           | Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μηχανική φθορά. Βοηθά στη διατήρηση της σκληρότητας από δευτερογενή σκλήρυνση και αποτελεί βασικό στοιχείο των ταχυχαλύβων.                                     |
| V        | α-φερρογόνο και πολύ ισχυρά καρβιδιογόνο | άνευ ορίου στον α-Fe, 1% στον γ-Fe    | Προκαλεί πολύ μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, υποβοηθά στο μέγιστο τη διατήρηση της σκληρότητας από δευτερογενή σκλήρυνση. Προστίθεται για βελτίωση αντοχής σε επαναφορά και μηχανική φθορά.   |
| Al       | α-φερρογόνο και γραφιτζόν                | 36% στον α-Fe, 1,1% στον γ-Fe         | Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας και παρεμποδίζει τη μεγέθυνση των κόκκων.   |
| Ti       | α-φερρογόνο και ισχυρότατα καρβιδιογόνο  | 6% στον α-Fe, 0,1% στον γ-Fe          | Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και παρεμποδίζει την γήρανση.   |
| Co       | γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο             | 75% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe   | Προκαλεί μείωση της εμβαπτότητας και μεταθέτει προς τα αριστερά τις καμπύλες TTT. Βοηθά στη διατήρηση της σκληρότητας.   |

Έπειτα, η προσθήκη κραματικών στοιχείων επιδρά στο διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-C και στη μετατόπιση των καμπυλών θερμικών κατεργασιών (CCT και TTT). Με βάση τις αλλαγές αυτές, οι χάλυβες ταξινομούνται στις παρακάτω ομάδες:

- i. Μαρτενσιτικοί ή αυτόβαπτοι χάλυβες. Τα στοιχεία προσθήκης αυτής της κατηγορίας των χάλυβων, συντελούν ώστε η κρίσιμη ταχύτητα της μαρτενσιτικής βαφής να είναι μικρότερη της ταχύτητας απόψυξης στον αέρα, έτσι ώστε, στη θερμοκρασία περιβάλλοντος οι χάλυβες αυτοί να έχουν μαρτενσιτική δομή.
- ii. Ωστενιτικοί χάλυβες. Η προσθήκη γ-φερρογόνων στοιχείων στο χάλυβα, επιτρέπει την ύπαρξη ευσταθούς ωστενίτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, λόγω της μετατόπισης του σημείου A3 σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 20°C. Στην περίπτωση που η προσθήκη τέτοιων στοιχείων οδηγεί σε μετατόπιση του σημείου Ms σε θερμοκρασίες μικρότερες αυτής του περιβάλλοντος (χωρίς η Ag να είναι χαμηλότερη των 20°C) σχηματίζεται, επίσης, σταθερός ωστενίτης, αλλά μετασταθούς κατάστασης. Αυτός είναι και ο λόγος που ονομάζονται ωστενιτικοί χάλυβες.
- iii. Φερριτικοί χάλυβες. Η προσθήκη α-φερρογόνων στοιχείων οδηγεί στην εξάλειψη της ωστενιτικής περιοχής του αντίστοιχου διαγράμματος ισορροπίας. Τόσο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο και σε υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζεται μόνο φερρίτης και για αυτό οι χάλυβες αυτοί ονομάζονται φερριτικοί. Λόγω της μη ύπαρξης ωστενιτικής περιοχής, οι χάλυβες αυτοί δεν επιδέχονται βαφή.

## 2.5 Κραματωμένοι χάλυβες

Πρακτικά στους κραματωμένους χάλυβες [6], το ποσοστό άνθρακα δεν υπερβαίνει το 1% και τα συνηθέστερα στοιχεία προσθήκης είναι:

- Ni, Mn, Cr, Si και Mo (ως κύριες προσθήκες) και
- V, W, Cu, Ti, Al, B, Pb, Nb (ως δευτερεύουσες προσθήκες).

Οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους ή μικροκραματωμένους, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μικρότερο του 2%.
- Μετρίως κραματωμένους, με ποσοστό στοιχείων προσθήκης από 2% έως 10%.
- Ισχυρά κραματωμένους, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μεγαλύτερο του 10%.

Στον πίνακα 2.5 δίνονται οι κύριες εφαρμογές κραματομένων χάλυβων.



**Πίνακας 2.5** Κύριες εφαρμογές κραματομένων χαλύβων. [Πίνακας 15.8 σελ. 522 (6)]

| ΧΑΛΥΒΕΣ                      | ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ  |
|------------------------------|---|
| <b>Μαγγανιούχοι</b>          |   |
| 1330 , 1340                  | Όπου απαιτείται υψηλότερη αντοχή από αυτή των κοινών ανθρακούχων, όπως για την κατασκευή αξόνων, ατράκτων, ελκυστήρων, κλπ.   |
| <b>Μολυβδαινιούχοι</b>       |   |
| 4037                         | Για την κατασκευή των αξόνων των πίσω τροχών των αυτοκινήτων  |
| <b>Χρωμιομολυβδαινιούχοι</b> |   |
| 4130 , 4140                  | Σε σχέση με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες παρουσιάζουν αυξημένη εμβαπτότητα, μηχανική αντοχή και αντοχή σε φθορά. Επιδέχονται βαφή σε λάδι και χρησιμοποιούνται για αεροναυπηγικές κατασκευές, άξονες αυτοκινήτων και δοχεία υψηλής πίεσης. |
| <b>Χρωμιούχοι</b>            |   |
| 5130                         | Επιδέχεται επιφανειακή κατεργασία ενανθράκωσης.   |
| 5140                         | Συγκρινόμενος με τους κοινούς, παρουσιάζει αυξημένη εμβαπτότητα, μηχανική αντοχή και αντοχή σε φθορά.   |
| 5160                         | Χρησιμοποιείται ως χάλυβας έλασης.  |
| <b>Χάλυβες Ni-Cr-Mo</b>      |   |
| 5130                         | Επιδέχεται επιφανειακή κατεργασία ενανθράκωσης.   |
| 5140                         | Συγκρινόμενος με τους κοινούς, παρουσιάζει αυξημένη εμβαπτότητα, μηχανική αντοχή και αντοχή σε φθορά.   |
| 5160                         | Χρησιμοποιείται ως χάλυβας έλασης.  |
| <b>Πυριτιούχοι</b>           |   |
| 9260                         | Χρησιμοποιείται για την κατασκευή ελασμάτων   |

## 2.6 Χάλυβες κατασκευών

Στους χάλυβες κατασκευών περιλαμβάνονται οι χάλυβες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε όλες τις μεταλλικές κατασκευές (υπόστεγα, δοχεία, λέβητες,

γέφυρες και άλλων) [7] καθώς επίσης και στις κατασκευές στοιχείων μηχανών (στροφαλοφόρων αξόνων, διωστήρων, βαλβίδων, ελατηρίων και άλλων).

Γενικά οι χάλυβες κατασκευών πρέπει να έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες και σε ορισμένες περιπτώσεις πρέπει να έχουν και άλλες ιδιαίτερες ιδιότητες, όπως π.χ. αντοχή στη φθορά, αντοχή στη διάβρωση. Συνήθως, για συγκεκριμένη εργασία υπάρχουν πολλές επιλογές χάλυβων που είναι κατάλληλοι γι' αυτή την εργασία. Στην πράξη όμως εκλέγεται ο χάλυβας που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της κατασκευής και συγχρόνως στοιχίζει φθηνότερα.

### 2.6.1 Ανθρακούχοι χάλυβες κατασκευών.

Οι ανθρακούχοι χάλυβες χρησιμοποιούνται για συνηθισμένες κατασκευές και στοιχεία μηχανών. Η περιεκτικότητα τους σε άνθρακα κυμαίνεται από 0,05% μέχρι 0,80% και γι' αυτό είναι υποευθηκτοειδείς χάλυβες.

Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, οι ανθρακούχοι χάλυβες κατασκευών διακρίνονται σε:

- i. Πολύ μαλακούς με C = 0,05% μέχρι 0,15%.
- ii. Μαλακούς με C = 0,15% μέχρι 0,30%.
- iii. Ημιμαλακούς με C = 0,30% μέχρι 0,40%.
- iv. Ημίσκληρους με C = 0,40% μέχρι 0,60%.
- v. Σκληρούς με C = 0,60% μέχρι 0,70%.
- vi. Πολύ σκληρούς με C = 0,70% μέχρι 0,80%.

Χαρακτηριστικά στοιχεία και βιομηχανικές χρήσεις των ανθρακούχων χάλυβων κατασκευών δίνονται στον πίνακα 2.4.

Σε περιπτώσεις που απαιτείται κατεργασία τεμαχίων σε αυτόματα μηχανήματα, όπως π.χ. σε αυτόματους τόνους, τότε για να υπάρχει αποδοτική κοπή πρέπει τα απόβλητα – γρέζια να μην αποκτούν μεγάλο μήκος, δηλαδή να θρυμματίζονται εύκολα. Αυτό επιτυγχάνεται, αν προστεθεί στον ανθρακούχο χάλυβα, θείο, μόλυβδο ή σελήνιο. Έτσι, παράγονται οι λεγόμενοι χάλυβες ελεύθερης κοπής ή χάλυβες αυτομάτων.

Κάποιοι τυπικοί χάλυβες αυτομάτων μηχανών είναι:

- i. Χάλυβας με C = 0,10%, Mn = 1,00% και S = 0,25%.
- ii. Χάλυβας με C = 0,25%, Mn = 1,00% και S = 0,14%.
- iii. Χάλυβας με C = 0,40%, Mn = 1,00% και S = 0,16%.
- iv. Χάλυβας με C = 0,12%, Mn = 1,00%, S = 0,22% και Pb = 0,20%.
- v. Χάλυβας με C = 0,40%, Mn = 0,60%, S = 0,03% και Pb = 0,20%.

**Πίνακας 2.6** Ανθρακούχοι χάλυβες κατασκευών. [Πίνακας 21.2.1 σελ. 150 (7)]

| Χημική σύνθεση<br>%* C- Mn | Μηχανικές ιδιότητες                           |                                     |          |                                 | Θερμικές κατεργασίες   | Βιομηχανικές χρήσεις  |
|----------------------------|---|-------------------------------------|----------|---------------------------------|--|---|
|                            | Κατάσταση χάλυβα                              | $\sigma_B$<br>[Nm/mm <sup>2</sup> ] | A<br>[%] | $\rho$<br>[Nm/cm <sup>2</sup> ] |  |   |
| 0.15 –<br>0.50             | Μετά από βαφή σε νερό και επαναφορά σε 200 °C | 520                                 | 20       | 150                             | Εξομάλυνση ή ανόπτηση σε 900°C.<br>Ενανθράκωση σε 950°C.<br>Βαφή σε 880°C.<br>Επαναφορά σε 180°C έως 200°C και | 0,05 έως 0,15% C. Αλυσίδες, καρφιά, κοχλίες και άλλα στοιχεία μηχανών, σωλήνες με ραφή, ταινίες, σίδηρος μπετόν, διάφορες |

|   |   |   |      |    |                    |  |  |
|---|---|---|------|----|--------------------|--|--|
|   |   |   |      |    | απόψυξη στον αέρα. | μεταλλικές κατασκευές. Τεμάχια που πρόκειται να ενανθρακωθούν  |  |
| 0.22<br>0.80  | - | Μετά από βαφή σε νερό και επαναφορά σε 550 °C | 670  | 16 | 90                 | Εξομάλυνση ή ανόπτηση σε 900°C. Βαφή σε νερό από 875°C έως 880°C. Επαναφορά σε 400 °C έως 700°C και απόψυξη στον αέρα. | 0,15 έως 0,30% C. Κοχλίες, οδοντωτοί τροχοί, πείροι, άξονες, σφυρήλατα τεμάχια.  |
| 0.35<br>0.50  | - | Μετά από βαφή σε νερό και επαναφορά σε 550 °C | 900  | 10 | 60                 | Εξομάλυνση ή ανόπτηση σε 840 °C. Βαφή σε νερό 825°C έως 850°C. Επαναφορά σε 400°C έως 650°C και απόψυξη στον αέρα.     | 0,30 έως 0,40% C. Διωστήρες, άξονες, άγκιστρα γερανών, σωλήνες χωρίς ραφή, σφυρήλατα τεμάχια.  |
| 0.45<br>0.50  | - | Μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά σε 550 °C | 950  | 8  | 35                 | Εξομάλυνση ή ανόπτηση σε 840°C. Βαφή σε λάδι από 840°C έως 845°C. Επαναφορά σε 300°C έως 365°C και απόψυξη στον αέρα.  | 0,40 έως 0,50% C. Στροφαλοφόροι άξονες, άξονες μετάδοσης κίνησης, οδοντωτοί τροχοί, ζάντες, τεμάχια υφιστάμενα θερμικές κατεργασίες. |
| 0.60<br>0.80  | - | Μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά σε 550 °C | 1020 | 8  | 30                 | Εξομάλυνση ή επαναφορά σε 800°C. Βαφή σε λάδι από 825°C έως 850°C.   | 0,50 έως 0,60% C. Τροχοί αμαξοστοιχιών, σιδηροτροχιές, ελατήρια, συρματοσχοίνα, τμήματα όπλων.                                       |
| * Η περιεκτικότητα σε πυρίτιο είναι ίση ή μικρότερη του 0,40% |   |   |      |    |                    |  |  |

### 2.6.2 Χαλυβοκράμματα κατασκευών.

Τα χαλυβοκράμματα κατασκευών αποτελούν όλους τους κραματωμένους χάλυβες στους οποίους χρησιμοποιούνται τέτοια κραματοποιητικά στοιχεία ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτούμενες κατασκευαστικές - μηχανολογικές εφαρμογές. Οι ιδιότητες που αποκτούν οι χάλυβες κατασκευών από κάθε ένα πρόσθετο

στοιχείο αναλύθηκαν εκτενέστατα στο κεφάλαιο 2.5, οπότε δεν θα ξαναφερθούν σε αυτό το σημείο. Ωστόσο αξίζει να δοθεί εκτενέστερη περιγραφή στα χαλυβοκράμματα ενανθρακώσεως και εναζωτώσεως.

### 2.6.2.1 Χαλυβοκράμματα ενανθρακώσεως.

Σαν χάλυβες ενανθρακώσεως μπορεί να χρησιμοποιηθούν ή ανθρακούχοι χάλυβες ή χαλυβοκράμματα, με την προϋπόθεση όμως να έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, συνήθως κάτω από 0,30%. Και αυτό, για να αποκτάει το τεμάχιο δύσθραυστο πυρήνα μετά από τις θερμικές κατεργασίες που προβλέπονται γι' αυτούς τους χάλυβες.

Επίσης πρέπει να περιέχουν και μαγγάνιο μέχρι περίπου 0,90%. Τα χαλυβοκράμματα ενανθρακώσεως είναι νικελιούχα, νικελιοχρωμιούχα ή χλωρομαγγανιούχα με λίγο βανάδιο.

Κάποια τυπικά χαλυβοκράμματα ενανθρακώσεως είναι :

- i. Το Χαλυβοκράματα με C = 0,15%, Mn = 0,50% και Ni = 3% που χρησιμοποιείται για τεμάχια, όπου απαιτείται σκληρή επιφάνεια και δύσθραυστος πυρήνας.
- ii. Το Χαλυβοκράματα με C = 0,15%, Mn = 0,40%, Ni = 4,00% και Cr = 1,20% που χρησιμοποιείται για τεμάχια, για τα οποία απαιτείται πολύ σκληρή επιφάνεια και δύσθραυστος πυρήνας.
- iii. Το Χαλυβοκράματα με C = 0,40%, Mn = 1,50%, Cr = 1,00% και V = 0,15%, που βρίσκει εφαρμογή όπου απαιτείται μεγάλη σκληρότητα της επιφάνειας, ενώ η δυσθραυστότητα του πυρήνα έχει δευτερεύουσα σημασία.

### 2.6.2.2 Χαλυβοκράμματα εναζωτώσεως.

Εναζώτωση υφίστανται χάλυβες με ειδική σύνθεση, γιατί η σκλήρυνση της επιφάνειας που επιτυγχάνεται μετά την εναζώτωση, οφείλεται στο σχηματισμό σκληρών ενώσεων του αζώτου με το χρώμιο, το αργίλιο και το βανάδιο. Το μολυβδαίνιο, όταν προστίθεται, δίνει μεγαλύτερη δυσθραυστότητα στον πυρήνα των τεμαχίων.

Κάποια τυπικά χαλυβοκράμματα εναζωτώσεως είναι :

- i. Το Χαλυβοκράματα με C = 0,30%, Mn = 0,65%, Cr = 1,60%, Mo = 0,20% και Al = 1,10% που χρησιμοποιείται για τεμάχια με πολύ σκληρές επιφάνειες και αρκετά μεγάλη δυσθραυστότητα του πυρήνα,
- ii. Το Χαλυβοκράματα με C = 0,35%, Mn = 0,50%, Cr = 2,00%, Mo = 0,25% , V = 0,15%, το οποίο χρησιμοποιείται για τεμάχια που απαιτούν μεγάλη σκληρότητα επιφάνειας και καλή ταχύτητα επιφάνειας, όπως π.χ. μήτρες πλαστικών.

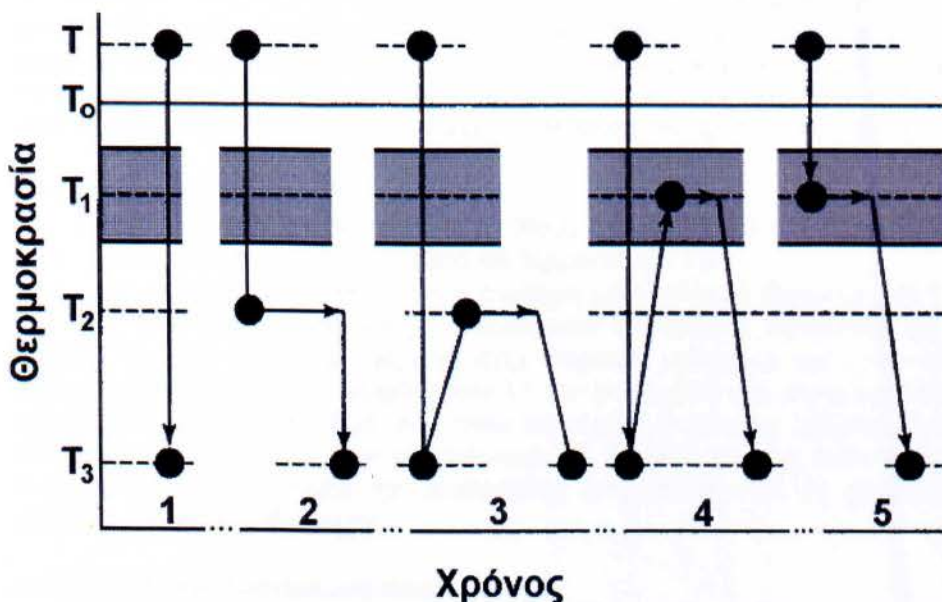
## 2.7 Κατεργασίες χαλύβων

Οι χάλυβες, όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.1, παράγονται σε μεγάλες ποσότητες, αφού πρώτα θερμανθούν σε μεγάλους κάμινους και έπειτα χυτευτούν από ειδικά καλούπια που παίρνουν την τελική τους μορφή. Όμως σε αυτή την κατάσταση οι χάλυβες δεν είναι πάντα ικανοί να ικανοποιήσουν διάφορες εφαρμογές που λόγω χάρη χρειάζονται μεγαλύτερη σκληρότητα, καλύτερη ολκιμότητα, δυσθραυστότητα, άλλο σχήμα, κλπ. Για αυτό τον λόγο οι χάλυβες δέχονται θερμικές κατεργασίες, πλαστικές παραμορφώσεις, και μηχανουργικές κατεργασίες.

### 2.7.1 Θερμικές κατεργασίες.

Θερμική κατεργασία είναι σύνολο διεργασιών που περιλαμβάνει τη θέρμανση και ψύξη μεταλλικού προϊόντος σε στερεά κατάσταση και σε καθορισμένες θερμοκρασιακές και χρονικές συνθήκες [8].

Σκοπός μιας θερμικής κατεργασίας είναι η πρόσδοση στο μεταλλικό υλικό δομικής και εντατικής κατάστασης τέτοιας, που να οδηγεί στην εξασφάλιση συγκεκριμένων αναγκών και επιθυμητών ιδιοτήτων σ' αυτό.



**Σχήμα 2.3** Χαρακτηριστικά είδη θερμικών κατεργασιών. 1: βαφή, 2: κλιμακωτή βαφή, 3: επαναφορά, 4-5: ανόπτηση. [8]

Οι θερμικές κατεργασίες των μεταλλικών υλικών διακρίνονται στις εξής μεγάλες ομάδες:

#### i. Βαφή

Το κράμα φέρεται σε κατάσταση ισορροπίας στη θερμοκρασία  $T$ . Ακολουθεί ταχύτατη απόψυξη του κράματος με εμβάπτιση σε λουτρό βαφής (αέρας, νερό, λάδι, τήγματα μετάλλων), χαμηλής θερμοκρασίας  $T_3$ . Με τον τρόπο αυτό, το κράμα δεν προλαβαίνει να υποστεί αντιστρεπτό μετασχηματισμό στην περιοχή γύρω από την θερμοκρασία  $T_1$ , και διατηρεί τελικά τη δομή ισορροπίας που είχε στη θερμοκρασία  $T$ , αλλά σε μετασταθή κατάσταση. Τελικό αποτέλεσμα της βαφής είναι συνήθως αυξημένη σκληρότητα και μειωμένη ολκιμότητα.

#### ii. Κλιμακωτή βαφή

Το κράμα φέρεται σε κατάσταση ισορροπίας στη θερμοκρασία  $T$ . Ακολουθεί ταχύτατη απόψυξη του κράματος σε ενδιάμεση θερμοκρασία  $T_2 \in (T_1, T_3)$ . Παραμονή του κράματος σ' αυτή τη θερμοκρασία για μικρό χρονικό διάστημα. Ολοκλήρωση της απόψυξης μέχρι τη θερμοκρασία  $T_3$ . Με την κλιμακωτή βαφή επιτυγχάνεται μερικός μετασχηματισμός προς την κατάσταση ισορροπίας, που

εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής στην ενδιάμεση θερμοκρασία. Τελικό αποτέλεσμα είναι σχετικά μικρότερη σκληρότητα και μεγαλύτερη ολκιμότητα σε σύγκριση προς τη βαφή.

### iii. Επαναφορά

Ακολουθεί πάντοτε μια κατεργασία βαφής και συνεπώς πρώτα το κράμα φέρεται σε κατάσταση ισορροπίας στη θερμοκρασία  $T$ . Ακολουθεί ταχύτατη απόψυξη του κράματος σε θερμοκρασία  $T_3$ . Έπειτα αναθερμαίνεται το υλικό σε θερμοκρασία  $T_2 \in (T_1, T_3)$ . Παραμένει το κράμα σ' αυτή τη θερμοκρασία για ικανό χρονικό διάστημα και τέλος ολοκληρώνεται με απόψυξη μέχρι τη θερμοκρασία  $T_3$  (αργή απόψυξη στον αέρα). Αποτέλεσμα της επαναφοράς είναι ο μερικός (αλλά σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό) μετασχηματισμός του υλικού, με συνέπεια τη δραστική μείωση της σκληρότητας και την αύξηση δυσθραυστότητας και ολκιμότητας.

### iv. Ανόπτηση

Μπορεί να λάβει χώρα κατά δύο τρόπους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.

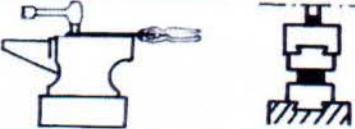
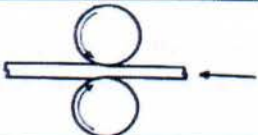
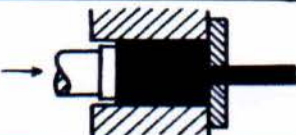
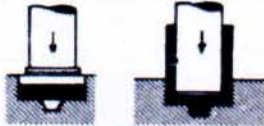
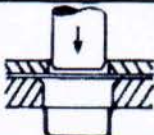


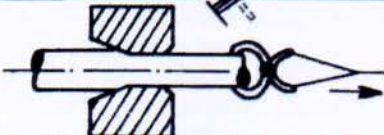
- Μετά από βαφή και επαναφορά σε θερμοκρασία  $T_3$ .
- Απ' ευθείας, εκκινώντας από τη σταθερή κατάσταση σε θερμοκρασία  $T$ .

Και στις δύο περιπτώσεις, η διαδικασία ανόπτησης ακολουθεί τις εξής φάσεις. Πρώτον το κράμα φέρεται στην περιοχή γρήγορου και αντιστρεπτού μετασχηματισμού περί τη θερμοκρασία  $T_1$  και παραμένει στη θερμοκρασία αυτή για αρκετό χρονικό διάστημα, έως ότου επιτευχθεί ο πλήρης μετασχηματισμός. Έπειτα έχει αργή απόψυξη σε θερμοκρασία  $T_3$ . Αποτέλεσμα της ανόπτησης είναι η απόκτηση από το υλικό της κατάστασης ισορροπίας του, σε φυσικοχημικό επίπεδο και σε επίπεδο δομής.

### 2.7.2 Πλαστικές παραμορφώσεις.

Κάποιες από τις βασικότερες μεθόδους πλαστικής παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.

**Σχήμα 2.4** Είδη πλαστικών παραμορφώσεων των μετάλλων και τρόπος εκτέλεσής τους. [7]

| Είδος κατεργασίας παραμορφώσεως |                          | Τρόπος εκτέλεσεως της κατεργασίας   |
|---------------------------------|--------------------------|---|
| Σφρηλασία                       | Κρουστική<br>Συμπιεστική |    |
| Έλαση                           |                          |    |
| Διέλαση                         |                          |    |
| Εξέλαση                         |                          |    |
| Κοίλανση                        |                          |   |
| Τύπωση                          | Ισόπαχη<br>Ανισόπαχη     |  |
| Περίωθηση                       |                          |  |
| Ολκή                            |                          |  |

### **2.7.3 Μηχανουργικές κατεργασίες.**

Οι μηχανουργικές κατεργασίες ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες [9]:

- i. **τορνίρισμα (turning).**  
Είναι η διαδικασία κατά την οποία το δοκίμιο προς κατεργασία περιστρέφεται στον άξονα του, και καθώς το κοπτικό εργαλείο παραμένει σταθερό, απομακρύνει υλικό από το δοκίμιο.
- ii. **τρύπημα (drilling).**  
Είναι η διαδικασία κατά την οποία διαμορφώνονται τρύπες τοποθετώντας εγκάρσια ένα περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο στο επιθυμητό σημείο τρυπήματος.
- iii. **φρεζάρισμα (milling).**  
Είναι η διαδικασία κατά την οποία αφαιρείται υλικό με την βοήθεια ενός κοπτικού εργαλείου που περιστρέφεται παράλληλα με το δοκίμιο προς επεξεργασία.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΓΚΥΡΑ ΚΑΙ ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΕ ΕΝΑ ΠΛΟΙΟ

### 3.1 Εισαγωγή

Η άγκυρα ή "άγκουρα" (anchor) είναι από τα βασικότερα εξαρτήματα του πλοίου που σχετίζεται και με την ασφάλειά του [10]. Η άγκυρα είναι εκείνη που του εξασφαλίζει σταθερότητα θέσης (αγκυροβολία) όταν βρίσκεται σε όρμο, αγκυροβόλιο ή σε λιμένα. Το μέγεθος του πλοίου είναι και ο κυριότερος παράγοντας που εξαρτάται το μέγεθος της. Κύριος στόχος (ανάλογα του τύπου της) είναι η μεγαλύτερη παρεχόμενη ασφάλεια συνδυάζοντας ευκολότερη χρήση.

Τρία είναι τα **κύρια βασικά μέρη** στις σύγχρονες άγκυρες: η "άτρακτος" (shank), στο πάνω μέρος της οποίας φέρεται ο κρίκος σύνδεσής της με την αλυσίδα, και παλαιότερα και ο "στύπος", οι "αγκώνες" ή "βραχίονες" (arms) στους οποίους και καταλήγει η άτρακτος και οι "όνυχες" (palms) στους οποίους απολήγουν οι βραχίονες, έκαστος των οποίων φέρει από ένα ζεύγος "ακρονύχια".



**Σχήμα 3.1** Άγκυρα πλοίου τύπου "Hall". Τα κύρια μέρη μιας άγκυρας. [10]

### 3.2 Είδη αγκυρών

1. **Βρετανικού Ναυαρχείου (Admiralty Pattern):** Ονομάζονται οι παλαιού τύπου άγκυρες που έφεραν "στύπο". Ο στύπος ήταν μια μεταλλική ράβδος που διαπερνούσε από άνοιγμα του πάνω μέρους της ατράκτου κάθετα προς το επίπεδο των βραχιόνων και μεγαλύτερου μήκους εκείνων, που στερεωνόταν με πείρο (σε χρήση της άγκυρας) ή αναδιπλωνόταν όταν η

άγκυρα ήταν "εν αποθέσει". Τέτοιες άγκυρες έφεραν στο τέλος της εποχής τους όλα τα μεγάλα ιστιοφόρα και τα πρώτα ατμοκίνητα πλοία.



**Σχήμα 3.2** Άγκυρα τύπου "Βρετανικού Ναυαρχείου". [10]

2. **Τύπου Martin:** Και αυτές οι άγκυρες έφεραν στύπο που όμως ήταν ακίνητος, κοντότερος, ισομήκης των δύο αγκώνων και παράλληλος αυτών. Οι βραχίονές του όμως είχαν την καινοτομία να είναι στρεπτοί ως προς τον άξονα κάθετο προς την άτρακτο και μέχρι  $45^\circ$  περίπου ανά πλευρά.
3. **Τύπου Danforth:** Ο τύπος αυτός φέρει ιδιόμορφο στύπο χαμηλά και κάτω από τους αγκώνες, που, ως τριγωνικά σχήματα, αποτελούν οι ίδιοι τους όνυχες. Ο τύπος αυτός είναι αρκετά προσφιλής στους κυβερνήτες ταχυπλόων περιπολικών σκαφών αφού αφενός μεν παρέχουν ασφαλή αγκυροβολία αφετέρου και ταχύτατη απόπλους όπου μετά την απαγκίστρωση τους από το βυθό, με ανάποδα κίνηση των μηχανών αυτές έρχονται από μόνες τους στην επιφάνεια. Αυτό βέβαια γίνεται λόγω της αντίδρασης στη ταχεία έλξη με συνέπεια τη στροφή των ονύχων προς τα πάνω, (την επιφάνεια).



**Σχήμα 3.3** Άγκυρα τύπου "Danforth". [10]

4. **Άστυπος άγκυρα:** είναι ο γενικευμένος σήμερα σε χρήση τύπος άγκυρας των πλοίων. Δεν φέρει στύπο. Φέρει κινητούς βραχίονες και ποικίλλει σε λεπτομέρειες κατασκευαστικές όπου και ονομάζονται ανάλογα Hall, Dunn κλπ.
5. Ένα ιδιότυπο είδος άγκυρας είναι και εκείνο σε **σχήμα αρότρου (plough type)** η οποία για μικρά σκάφη παρουσιάζει μεγάλη αντοχή.



**Σχήμα 3.4** Άγκυρα τύπου "αρότρου" μικρών ιστιοφόρων. [10]

6. Επίσης, υπάρχει και η **ένστυπος άγκυρα** με ένα βραχίονα που χρησιμοποιείται κυρίως σε αβαθή από μικρά σκάφη και σε αγκυροβολία μικρών σηματοδύρων.
7. **Τύπου μύκητα**: λέγονται ειδικής κατασκευής βάρη (mushroom anchor) ημισφαιρικά ή πρισματικά που ποντίζονται συνήθως σε αγκυροβολία φαρόπλοιων που παρέχουν ικανή αντοχή σε μεγάλες τάσεις.
8. Η **"ισχάδα"** , το κοινώς λεγόμενο "πινέλι" (kedge anchor) που είναι μικρή ένστυπος άγκυρα και χρησιμοποιείται σε λέμβους.
9. Το **"τετράχηλο"** ή τεσσαροχάλι με 4 κυρτούς βραχίονες μόνιμους ή σπαστούς, επίσης σε λέμβους.
10. Η **"πλωτή άγκυρα"** : υπάρχει συνήθως σε σωσίβιες λέμβους, και τέλος
11. **Τύπου "Half Admiral"** ή Ιερή άγκυρα: έχει περισσότερο ναυτικό λαογραφικό χαρακτήρα και όχι κάποιο εξειδικευμένο τύπο άγκυρας. Αποδίδεται στη τελευταία άγκυρα του πλοίου που έχει μείνει προς πόντιση για τη σωτηρία του. Περισσότερο εκφραστική είναι η γαλλική απόδοση του όρου: "ancre de miséricorde" (= "άγκυρα του ελέους" ή "άγκυρα του οικτιρμού") [11].



**Σχήμα 3.5** Άγκυρα τύπου "Half Admiral". [10]

### 3.3 Επιλογή άγκυρας και δοκιμή.

Το μέγεθος της άγκυρας προσδιορίζεται από το βάρος της. Βάσει του δείκτη εξαρτισμού πλοίων των κανονισμών των Νηογνωμόνων καθορίζεται όχι μόνο το βάρος αλλά και ο αριθμός των αγκυρών που πρέπει να φέρονται στο πλοίο. Έτσι διακρίνονται αυτές σε "κύριες" ή "υποπρώρους" (bower anchors), σε "εφεδρικές"

(spare anchors) και σε "υπόπρυμνους" (stream anchors). Οι δύο κύριες άγκυρες είναι υποχρεωτικές για όλα τα είδη (τύποι) πλοίων. Η πρυμναία άγκυρα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε ποτάμιους λιμένες, καθώς και στα μικρά οχηματαγωγά ανοικτού τύπου. Στις κύριες επιτρέπεται μεταξύ τους διαφορά βάρους μέχρι  $\pm 7\%$ , αλλά το συνολικό βάρος να μην είναι κατώτερο του προβλεπόμενου.

Όλες οι άγκυρες υποβάλλονται σε δοκιμή με μηχανικά μέσα. Στην αρχή υποβάλλονται όλα τα μέρη της άγκυρας σε δοκιμή κάμψης (bend test), στη συνέχεια σε δοκιμή πτώσης (percussive test) όπου αφήνεται η άγκυρα να πέσει από ύψος 4-5 μέτρα σε σιδερένιο δάπεδο, ακολουθεί δοκιμή σφυρόκρουσης με σφυρί βάρους άνω των 7 λιμπρών (~3,15 kg). Έπειτα ακολουθεί η δοκιμή έλξης (proof test) από τον κρίκο και από τους όνυχες χωριστά. Μετά το πέρας των δοκιμών εκδίδεται πιστοποιητικό που συνήθως συνδυάζεται με εκείνο των αλυσίδων. Οι δοκιμές γίνονται κυρίως μετά την κατασκευή της άγκυρας ή όποτε ανάγκες το απαιτήσουν. Στο εμπόριο διατίθενται με τα πιστοποιητικά τους.

### Σημειώσεις:

- Σε κάθε δεξαμενισμό πλοίου οι άγκυρες απομακρύνονται για έλεγχο και συντήρηση
- Στη πράξη, αν ένα πλοίο διαπιστωθεί ότι έχει χάσει τη μία άγκυρα, τότε του απαγορεύεται η συνέχιση των πλόων μέχρι της αντικατάστασής της με την "εφεδρική", εκτός αν εκδοθεί προσωρινό πιστοποιητικό αξιοπλοΐας από τον παρακολουθούντα το πλοίο νηογνώμονα για συνέχιση πλου "με μια άγκυρα" μέχρι το επόμενο λιμάνι.
- Όταν ένα πλοίο που ακτοπλοεί υποστεί μηχανική βλάβη (μπλακ άουτ) θα πρέπει να προβεί αμέσως σε ανακρέμαση της μίας τουλάχιστον άγκυρας έτσι ώστε αν παρασύρεται να συγκρατηθεί από αυτή πριν φθάσει σε αβαθή και κινδυνέψει να εξοκείλει (να προσαράξει, ή κοινώς: να πέσει έξω).
- Η χρήση της άγκυρας γίνεται με το **βαρούλκο αγκύρας** που φέρεται τόσο στο πρόστεγο όσο και στη πρύμνη επί του κυρίου καταστρώματος.
- Τα παγοθραυστικά διαθέτουν ισχυρά βαρούλκα με τα οποία χρησιμοποιούνται οι άγκυρες ως σφύρες σε επαναλαμβανόμενες ρίψεις τους πάνω στους πάγους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΒΑΡΟΥΛΚΟ ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΥΨΩΣΗ ΑΓΚΥΡΑΣ ΣΕ ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΠΛΟΙΟ (STAFFA MOTOR C200 SERIES 70)

#### 4.1 Γενικές χρήσεις

Οι υδραυλοκινητήρες staffa της Kawasaki είναι από τους πιο αξιόπιστους που κυκλοφορούν στο εμπόριο σήμερα και με τις περισσότερες εφαρμογές σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας [12]. Αυτοί οι τομείς είναι:

- **Στη ναυτιλία:** είναι δοκιμασμένοι σε φοβερά αντίξοες συνθήκες σε θαλάσσιο περιβάλλον (σχήμα 4.1). Οι εφαρμογές τους ξεκινούν από απλά βαρούλκα πολυτελών yachts μέχρι πιο περίπλοκα βαρούλκα για μεγάλα φορτηγά πλοία που έχουν τεράστιες απαιτήσεις ως προς την αντοχή και το βάρος ανέλκυσης τους. Επίσης έχουν χρήση και σε πλωτούς γεραμούς 2600tn.



**Σχήμα 4.1** Εφαρμογή του υδραυλοκινητήρα σε ιδιαίτερα οξειδωτικό περιβάλλον όπως είναι σε ένα πλοίο – φαράδι. [12]

- **Στις κατασκευές:** χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την παραγωγή ισχύος σε εκσκαφείς, γεραμούς, ανελκυστήρες δίκρανων, γεωργικά μηχανήματα και γενικότερα σε όλους τους τύπους βιομηχανικών οχημάτων (σχήμα 4.2).



**Σχήμα 4.2** Εφαρμογή του υδραυλοκινητήρα σε τομείς κατασκευών όπως είναι σε εκσκαφείς. [12]

- **Στην εξόρυξη:** έχουν σημαντικές εφαρμογές σε μηχανές εξόρυξης και γεωτρήματα (σχήμα 4.3). Οι υδραυλοκινητήρες αυτοί εκμεταλλεύονται την υψηλή ροπή εκκίνησης και χρησιμοποιούνται ευρέως για την διάνοιξη τούνελ.



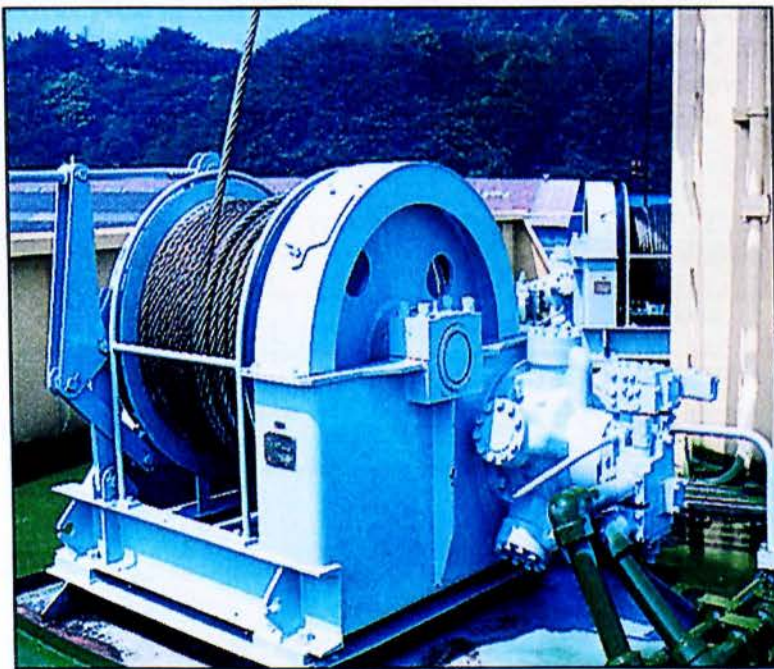
**Σχήμα 4.3** Εφαρμογή του υδραυλοκινητήρα σε τομείς εξόρυξης όπως είναι σε γεωτρήματα. [12]

- **Στη βιομηχανία:** έχουν μια προϊστορία 90 χρόνων εμπορίας και ανάπτυξης υδραυλικών υποσυστημάτων και εξαρτημάτων για εφαρμογές αυτοματισμού με απαιτήσεις υψηλής ισχύος, αντοχής και αξιοπιστίας (σχήμα 4.4).



**Σχήμα 4.4** Εφαρμογή του υδραυλικινήρα σε τομείς βιομηχανίας. [12]

## 4.2 Στοιχεία των βαρούλκων Staffa



**Σχήμα 4.5** Εφαρμογή του υδραυλικινήρα. [14]

### 4.2.1 Περιγραφή βαρούλκου

Τα υδραυλικά βαρούλκα (PUSNES) υψηλής πίεσης είναι κατασκευασμένα από μηχανολογικά μέρη μαζί με έναν μειωτήρα [13]. Τα μηχανολογικά αυτά μέρη



αποτελούν ένα ή περισσότερα τύμπανα σχοινιών, ανυψωτές καλωδίων, κεφαλές στρεβλώματος (δέστρες) ή διάφορες συζεύξεις για άλλες μονάδες ανάλογα με τις ανάγκες.

Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι μια κατασκευή απόλυτα στεγανή από νερό που περιέχει πινιόν και γρανάζια, τα οποία κινούν αντίστοιχα διαφόρους άξονες και τον κύριο άξονα. Το κάλυμμα της μηχανής είναι κατασκευασμένο από συγκολλημένο προκατασκευασμένο χάλυβα. Διαιρείται σε δύο μέρη, ένα ανώτερο και ένα χαμηλότερο, με τη διάσπαση στο κέντρο του κυρίου γραναζιού. Τα δύο μέρη συγκρατούνται από κοινού. Το κατώτατο σημείο του καλύμματος είναι επίσης η δεξαμενή (reservoir) λαδιού για τη συσσώρευσή του. Τα ρουλεμάν των αξόνων και μηχανών λαδώνονται καθώς κινούνται στη δεξαμενή του λαδιού.

Ο κύριος άξονας είναι ένας στερεός χαλύβδινος άξονας, με μήκος και μορφή που εξαρτάται από την κύρια κατασκευή και τον ανάλογο εξοπλισμό. Επεκτείνεται και έξω από τα κιβώτια ταχυτήτων, από την μια ή και από τις δυο πλευρές, συνεχίζει μέσω των τυμπάνων και στηρίζεται από χωριστά έδρανα. Το κύριο γρανάζι και οι στρεβλωμένες κεφαλές τοποθετούνται στον άξονα. Τα τύμπανα μπορούν να ασφαλιστούν στον κύριο άξονα από ένα κόμπλερ ή ο κύριος άξονας περιστρέφεται ελεύθερα μέσα στο τύμπανο όταν άλλο εξάρτημα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Όλα τα κύρια εξωτερικά χιτώνια είναι κυρίως μπρούτζινα, και λιπαίνονται με γράσο. Τα ρουλεμάν του κύριου άξονα στο κιβώτιο ταχυτήτων περιέχουν σφαιροειδής κυλίνδρους, και λιπαίνονται από γράσο. Οι υποδοχές των ρουλεμάν είναι εντελώς στεγανές από ειδικά διαμορφωμένα λάστιχα και γεμίζονται εκ των προτέρων ολοκληρωτικά με γράσο.

Κάθε τύμπανο είναι εξοπλισμένο με ένα φρένο. Συνήθως λειτουργεί χειροκίνητα από έναν κοχλία (με μεγάλο βήμα τραπεζοειδής μορφής). Το φρένο σχεδιάζεται για ένα στατικό τράβηγμα του σχοινιού πρόσδεσης ίσο με 2.5 - 3 φορές την ικανότητα τράβηγματος του βαρούλκου. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του βαρούλκου ενός πλοίου με υδραυλοκινητήρα staffa C200.

**Πίνακας 4.1** Κύρια χαρακτηριστικά του βαρούλκου Staffa C200. [13]

| Τεχνικά χαρακτηριστικά                            | 200 HW (MW)   |
|---|---|
| Ρυμούλκηση  | 20 tons   |
| Ταχύτητα  | 15 m/min  |
| Ταχύτητα χαλαρωμένου σχοινιού                     | 45 m/min  |
| Σχεδιασμός σχοινιού                               | 270/200m of Φ32mm συρματόσκοινο +<br>11mm of Φ 75mm νάιλον σχοινί |
| Ελάχιστη φόρτιση του φρένου κατά το δέσιμο (MBL)  | 66.6 tons   |
| Στάσιμη φόρτιση φρένου (θεωρητική)<br>(0.8 * MBL) | 53.3 tons   |
| Στάσιμη φόρτιση φρένου εν λειτουργία<br>(0.6*MBL) | 40 tons   |

### 4.2.2 Υδραυλικές μηχανές

Τα βαρούλκα είναι εξοπλισμένα με υδραυλικές μηχανές κατασκευής STAFFA. Ένας τύπος μηχανής αργής ταχύτητας και υψηλής ροπής με ένα ακτινωτό έμβολο.

Η μηχανή στα βαρούλκα πρόσδεσης και στα βαρούλκα αγκύρων είναι διπλής ταχύτητας. Αυτές οι μηχανές μπορούν να λειτουργήσουν σε ελάχιστη και σε μέγιστη περιστροφή με τον ανάλογο χειρισμό των βαλβίδων. Οι μηχανές εξασφαλίζονται ενάντια στην υπερφόρτωση με τη βοήθεια μιας βαλβίδας ελέγχου πίεσης. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός υδραυλοκινητήρα διπλής ταχύτητας staffa C200.

**Πίνακας 4.2** Τεχνικά χαρακτηριστικά του υδραυλοκινητήρα Staffa C200. [13]

| Τεχνικά χαρακτηριστικά                                 | 200 HW (MW) | 200 HM (AW) |
|--|-------------|-------------|
| Κατασκευαστής  | STAFFA      | STAFFA      |
| Τύπος  | HMC 200     | HMC 200     |
| Πίεση εργασίας   | MAX 250 bar | MAX 250 bar |
| Μέγιστη πίεση επιστροφής                               | 10 bar      | 10 bar      |
| Κατανάλωση λιπαντικού βαρούλκου                        |             | 286 l/min   |
| Κατανάλωση λιπαντικού κατά το δέσιμο                   | 176 l/min   | 176 l/min   |
| Κατανάλωση λιπαντικού σε ταχύτητα χαλαρωμένου σχοινιού | 176 l/min   | 286 l/min   |

### 4.2.3 Συστήματα ελέγχου

Κάθε βαρούλκο ελέγχεται από μια ομάδα βαλβίδων ελέγχου.

Αυτή η ομάδα αποτελείται από:

- βαλβίδα ελέγχου ροής,
- κατευθυντήρια βαλβίδα,
- βαλβίδα αντίθετης ισορροπίας και
- βαλβίδα ελέγχου πίεσης.

**Η βαλβίδα ελέγχου ροής** ελέγχει τη μέγιστη περιστροφή των μηχανών.

**Οι κατευθυντήρια βαλβίδα** ελέγχει την ανύψωση, το χαμήλωμα και την ταχύτητα από το ελάχιστο στο μέγιστο.

**Η βαλβίδα αντίθετης ισορροπίας** χρησιμεύει στο να αποτρέπει το φορτίο να επιταχύνει υπερβολικά το βαρούλκο στο χαμήλωμα, και

**Η βαλβίδα ελέγχου πίεσης** χρησιμεύει στο να εξασφαλίσει τη μηχανή ενάντια στην υπερφόρτωση.

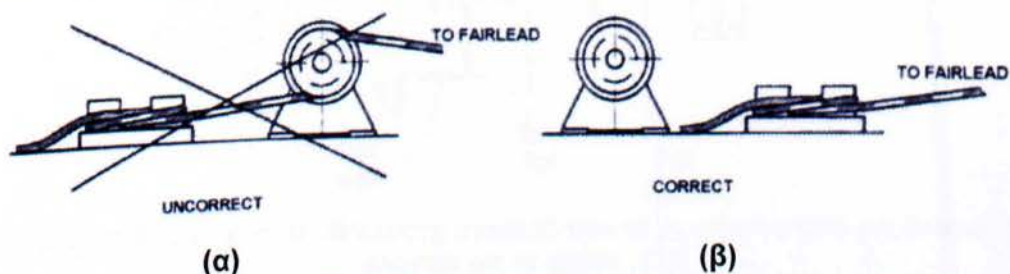
### 4.3 Πληροφορίες σωστής χρήσης ενός βαρούλκου

Για να επιτευχθεί μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής του βαρούλκου θα πρέπει να τηρούνται κάποια συγκεκριμένα πρότυπα και διαδικασίες κατά την λειτουργία του [13]. Με την μέθοδο αυτή επίσης αποφεύγονται περαιτέρω ζημιές και περαιτέρω χρηματική επιβάρυνση του πλοίου.

#### 4.3.1 Πρότυπο δεσίματος.

Όταν χρησιμοποιούνται κεφαλές στρεβλώματος (δέστρες), ποτέ δεν πρέπει να τοποθετείται η σειρά δεσίματος όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.

Αυτό μπορεί να προκαλέσει λυγισμό και βλάβη στις κεφαλές στρεβλώματος (δέστρες) και στον κύριο άξονα του βαρούλκου.



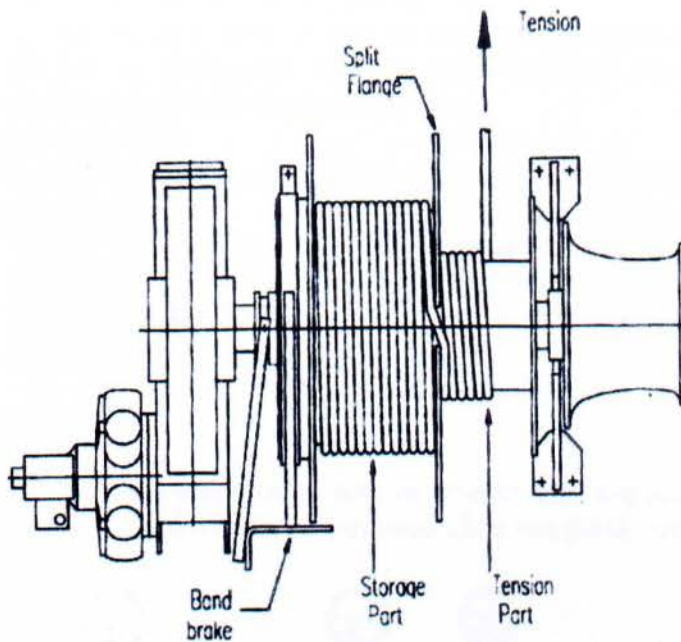
**Σχήμα 4.6** Με ποια σειρά θα πρέπει να τοποθετούνται το βαρούλκο και η δέστρα, (α): λάθος τρόπος, (β): σωστός τρόπος.[13]

#### 4.3.2 Διασπασμένο τύμπανο πρόσδεσης.

Το κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός διασπασμένου τυμπάνου πρόσδεσης, είναι να αποκτήσει τη μέγιστη ελκτική δύναμη και δύναμη φρεναρίσματος, ανεξάρτητος από τα πόσα στρώματα σχοινιού υπάρχουν ήδη στο τύμπανο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση του πρώτου στρώματος στο τύμπανο μετά από μια γρήγορη πρόσδεση σε αυτό.

Για να αποκτήσει τα ανωτέρω χαρακτηριστικά γνωρίσματα, το διασπασμένο τύμπανο διαιρείται σε δύο ξεχωριστά μέρη με τη βοήθεια μιας διαχωριστικής φλάντζας. Τοποθετείται μια αυλάκωση που διαιρεί το τύμπανο σε ξεχωριστά μέρη. Συνήθως το μεγαλύτερο μέρος χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του σχοινιού και καλείται μέρος αποθήκευσης, και το μικρότερο για να εντείνει το σχοινί και καλείται το μέρος έντασης.

Όταν χρησιμοποιείται σωστά, ένα διασπασμένο τύμπανο επιτρέπει στο χειριστή να χρησιμοποιεί πάντα το πρώτο στρώμα όταν δένεται το πλοίο, ανεξαρτήτως από τα πόσα στρώματα σχοινιού αφήνονται στο μέρος αποθήκευσης.



**Σχήμα 4.7** Κύρια μέρη αποθήκευσης σχοινού που τα χωρίζονται από μια διαχωριστική φλάντζα και το φρένο. [13]

## 4.4 Συντήρηση βαρούλκου

### 4.4.1 Κανονικός έλεγχος

Η στερεότυπη επιθεώρηση των βαρούλκων είναι μια πολύ σημαντική μορφή αποτροπής της συντήρησης [13]. Οδηγεί σε ιδιαίτερες αποταμιεύσεις με την ανίχνευση οποιουδήποτε σημαντικού προβλήματος που μπορεί να αναπτύσσεται, και επιτρέπει οι απαραίτητες επισκευές να γίνονται στον προγραμματισμένο χρόνο ή έναν κανονικό χρόνο γενικής επισκευής του πλοίου (για παράδειγμα σε έναν ελλιμενισμό).

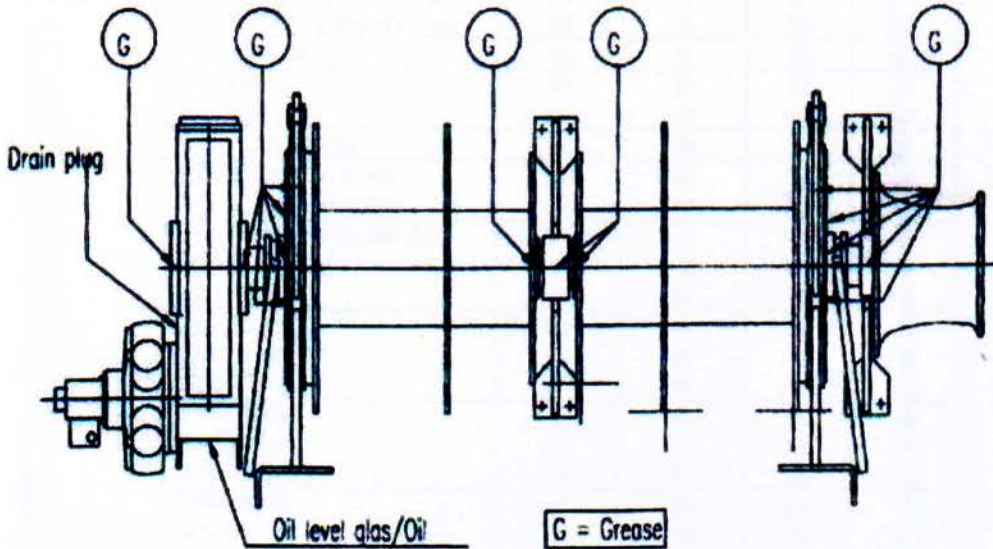
Ο ακόλουθος είναι ένας οδηγός, σε μερικά από τα σημεία κλειδί, που πρέπει να παρατηρηθούν κατά τη διάρκεια των στερεότυπων επιθεωρήσεων. Η συχνότητα στην οποία η επιθεώρηση πρέπει να γίνει είναι ανάλογα με το χρόνο και τις συνθήκες που τα βαρούλκα ήταν εν λειτουργία, εντούτοις, προτείνεται ότι τα διαστήματα που απαριθμούνται κατωτέρω θεωρούνται τα ελάχιστα δυνατά για τη βέλτιστη απόδοση των βαρούλκων. Επίσης συνιστάται οι επιθεωρήσεις των βαρούλκων να γίνονται πιο συχνές στην πρώτη περίοδο λειτουργίας τους.

- **κατά τη διάρκεια των διαδικασιών πρόσδεσης**
  - Οι χειριστές πρέπει να ακούσουν τη μετάδοση τυχόν ανώμαλου θορύβου των τροχών του μηχανήματος και των ρουλεμάν τους.
  - Να ελέγξουν για την υπερθέρμανση των ρουλεμάν.
- **μια φορά κάθε εβδομάδα**
  - Πρέπει να γίνεται έλεγχος για τυχόν διαρροή λιπαντικού ή γράσων από τις τάπες τους και αντικατάσταση εάν είναι απαραίτητο.
- **μια φορά κάθε 3 μήνες**
  - Τοποθέτηση γράσου σε όλες τις θηλές λίπανσης.

- Πρέπει να γίνεται έλεγχος στα φρένα.
- Πρέπει να ελέγχονται ότι όλα τα κόμπλερ λειτουργούν σωστά.
- Πρέπει να ελέγχονται όλα τα μπουλόνια και τα περικόχλια όσον αφορά την κατάλληλη σύσφιξη τους.
- **μια φορά κάθε έτος**
  - Πρέπει να ελέγχονται οι βάσεις και να βεβαιώνεται ότι το βαρούλκο δεν κινείται.
  - Πρέπει να ελέγχεται ότι οι υδραυλικές βαλβίδες είναι σωστά ρυθμισμένες.
  - Να γίνεται δειγματοληψία λιπαντικού που λαμβάνεται για έλεγχο κατανάλωσης.

#### 4.4.2 Λίπανση

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται όλα τα σημεία που πρέπει να γίνει έλεγχος αν η ποσότητα και η ποιότητα του λιπαντικού είναι επαρκής, κατά τη συντήρηση του βαρούλκου.



Σχήμα 4.8 Σημεία ελέγχου του λιπαντικού. [13]

#### 4.4.3 Προτεινόμενα λιπαντικά για το κουτί της μηχανής

Πρέπει να επισημανθεί ότι όταν το βαρούλκο λειτουργεί σε θερμοκρασίες  $-5^{\circ}\text{C}$  ή χαμηλότερες η ταχύτητα (viscosity) του λιπαντικού πρέπει να είναι λιγότερη από 220 .

**Πίνακας 4.3** Λιπαντικά κατάλληλα για το κουτί της μηχανής. [13]

| OIL COMPANY | OIL TYPE                       | VISCOSITY,<br>cSt at 40°C | VISCOSITY<br>INDEX | FLASH<br>POINT<br>°C, COC | POUR<br>POINT,<br>°C |
|-------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|
| ELF         | EPONA Z 100                    | 105                       | 100                | 220                       | -27                  |
|             | EPONA Z 150                    | 150                       | 98                 | 220                       | -21                  |
|             | EPONA Z 220                    | 210                       | 98                 | 220                       | -21                  |
| BP          | BP ENERGOL GR-XP 150           | 140                       | 96                 | 196                       | -24                  |
|             | BP ENERGOL GR-XP 220           | 210                       | 94                 | 196                       | -21                  |
|             | BP ENERGOL GR-XP 320           | 305                       | 92                 | 199                       | -15                  |
| CALTEX      | MEROPA 150                     | 145                       | 101                | 224                       | -28                  |
|             | MEROPA 220                     | 209                       | 92                 | 232                       | -18                  |
|             | MEROPA 320                     | 308                       | 98                 | 232                       | -18                  |
| CASTROL     | CASTROL ALPHA SP 150           | 150                       | 97                 | 198                       | -12                  |
|             | CASTROL ALPHA SP 220           | 220                       | 94                 | 198                       | -9                   |
|             | CASTROL ALPHA SP 320           | 320                       | 94                 | 195                       | -9                   |
| CHEVRON     | CHEVRON GEAR COMPOUND EP 150   | 150                       | 98                 | 250                       | -21                  |
|             | CHEVRON GEAR COMPOUND EP 220   | 220                       | 98                 | 260                       | -21                  |
|             | CHEVRON GEAR COMPOUND EP 320   | 320                       | 98                 | 260                       | -18                  |
| ESSO        | SPARTAN EP 150                 | 144                       | 95                 | 228                       | -27                  |
| FINA        | FINA GIRAN 150                 | 161                       | 95                 | 215                       | -20                  |
|             | FINA GIRAN 220                 | 221                       | 95                 | 226                       | -18                  |
| FUCHS       | RENEP COMPOUND 106             | 225                       | 100                | 218                       | -21                  |
| GULF        | GULF EP LUBRICANT HD 150       | 146                       | 98                 | 231                       | -18                  |
|             | GULF EP LUBRICANT HD 220       | 219                       | 97                 | 237                       | -15                  |
| MOBIL       | MOBIL GEAR 629 (MOBIL SHC 629) | 135/150                   | 91                 | 210                       | -21                  |
|             | MOBIL GEAR 630 / MOBIL SHC 630 | 198/220                   | 153                | 249                       | -42                  |
|             | MOBIL SHC 629                  | 135/150                   | 149                | 249                       | -42                  |
| OCEAN       | EPONA Z100                     | 105                       | 100                | 220                       | -21                  |
|             | EPONA Z150                     | 150                       | 98                 | 220                       | -18                  |
|             | EPONA Z220                     | 210                       | 98                 | 220                       | -27                  |
| OPTIMOL     | OPTIGEAR 150                   | 155                       | 93                 | 185                       | -24                  |
|             | OPTIGEAR 220                   | 227                       | 93                 | 195                       | -21                  |
|             | OPTIGEAR 320                   | 332                       | 89                 | 195                       | -12                  |
| SHELL       | OMALA OIL 220                  | 220                       | 100                | 200                       | -18                  |
|             | OMALA OIL 100                  | 100                       | 100                | 200                       | -24                  |
|             | OMALA OIL 150                  | 150                       | 100                | 200                       | -24                  |
| STATOIL     | LOADWAY EP 150                 | 150                       | 95                 | 235                       | -21                  |
|             | LOADWAY EP 220                 | 220                       | 95                 | 238                       | -18                  |
|             | LOADWAY EP 320                 | 320                       | 95                 | 243                       | -12                  |
| TEXACO      | MEROPA 150                     | 145                       | 101                | 224                       | -28                  |
|             | MEROPA 220                     | 209                       | 92                 | 232                       | -18                  |
|             | MEROPA 320                     | 308                       | 98                 | 232                       | -18                  |
| TOTAL       | TOTAL CARTER EP 100            | 100                       | 100                | 250                       | -20                  |
|             | TOTAL CARTER EP 150            | 150                       | 100                | 255                       | -15                  |
|             | TOTAL CARTER EP 220            | 220                       | 96                 | 255                       | -12                  |

#### 4.4.4 Προτεινόμενοι τύποι γράσων

Πρέπει να επισημανθεί ότι όταν απαιτείται μαλακό τύπο γράσου τότε πρέπει να έχει υψηλό βαθμό διείσδυσης (penetration).

**Πίνακας 4.4** Προτεινόμενοι τύποι γράσου για το βαρούλκο. [13]

| OIL COMPANY            | GREASE TYPE                    | TEMPERATURE RANGE °C | PENETRATION (WORKED 60 STROKES) 25 °C | DROPPING POINT, °C |
|------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------|
| ANTAR                  | EPEXA                          | -30+135              | 265/295                               |                    |
| BP                     | BP ENERGREASE MM-EP2           | -30+120              | 265/295                               | 175                |
| CALTEX                 | MULTIFAK EP 2                  | -30+120              | 280                                   | 192                |
|                        | STORPLEX EP 2                  | -35+170              | .                                     | 210                |
| CASTROL                | CASTROL SPHEEROL SX 2          | -20+150              | 285                                   | >300               |
|                        | CASTROL SPHEEROL EPL 2         | -20+105              | 270                                   | 170                |
|                        | CASTROL APS 2                  | -30+110              | 280                                   | 185                |
| CHEVRON                | CHEVRON DURA - LITH GREASE EP2 | -20+125              | 280                                   | 185                |
| ESSO                   | BEACON EP 2                    | -3+125               | 277                                   | 190                |
| FINA                   | FINA MARSON EPL 2              | -30+130              | 280/295                               | 196                |
|                        | FINA LICAL M12                 | -25+120              | 279                                   | >185               |
| FUCHS                  | RENOLIT FWA 160                | -25+130              | 265/295                               | 185                |
|                        | RENOLIT FEP 2                  | -20+130              | 265/295                               | 185                |
|                        | RENOLIT HLT 2                  | -50+140              | 265/295                               | 185                |
| GULF                   | GULFCROWN GREASE NO. 2         | -20+120              | 268                                   | 191                |
|                        | GULFCROWN GREASE EP NO. 2      | -20+125              | 280                                   | 185                |
| MOBIL                  | MOBILGREASE HP 222             | -30+140              | 280                                   | 260                |
|                        | MOBILITH SHC 460               | -50+130              | 305                                   | 260+               |
| MOLYKOTE (DOW CORNING) | LONGTERM 2 PLUS                | -50+150              | 265/295                               | 175                |
| OCEAN                  | EPEXA 2                        | -30+135              | 265/295                               | 180                |
| OPTIOMOL               | OLISTA LONGTIME 2              | -30+140              | 265/295                               | >180               |
|                        | OLISTA LONGTIME PD-2           | -35+140              | 265/295                               | >255               |
|                        | OLISTA LONGTIME PD-1           | -35+140              | 310/340                               | >260               |
| SHELL                  | ALVANIA EP GREASE 2 LF         | -20+120              | 265/295                               | 180                |
| STATOIL                | UNIWAY LI 62                   | -30+110              |                                       |                    |
| TEXACO                 | MULTIFAK EP 2                  | -30+120              | 280                                   | 190                |
|                        | STARPLEX EP 2                  | -35+170              |                                       | 210                |
| TOTAL                  | TOTAL MULTIS EP 1              | -20+130              | 325                                   | 190                |
|                        | TOTAL MULTIS EP 2              | -20+140              | 260                                   | 190                |

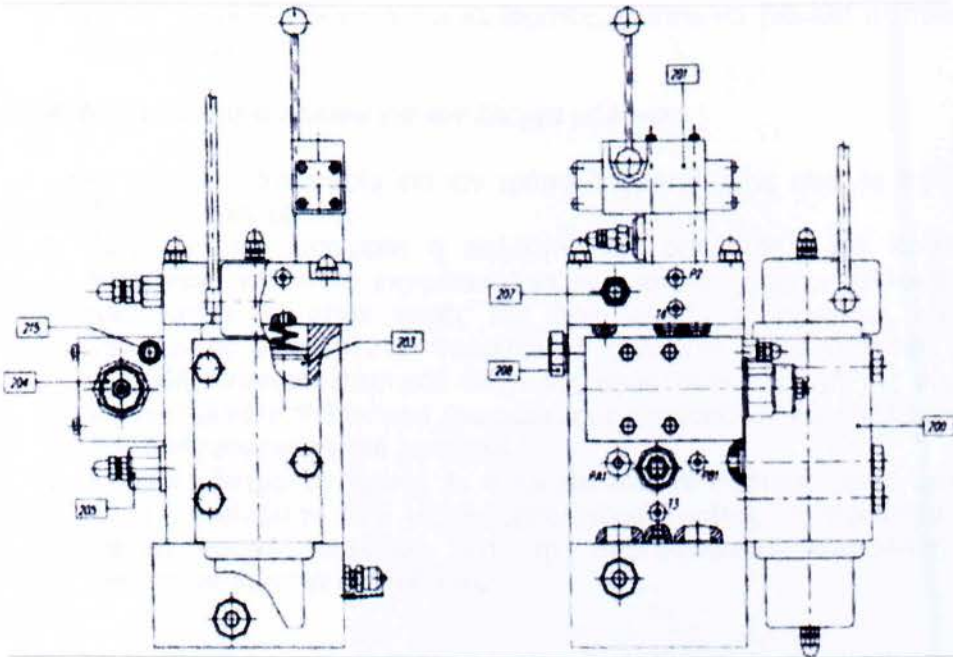
## 4.5 Ρυθμίσεις – υδραυλικά μέρη

### 4.5.1 Βαλβίδα ελέγχου ροής

Πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος μία φορά το χρόνο ώστε η ταχύτητα του βαρούλκου να είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές, και εάν η ρύθμιση της ροής είναι σωστή [13].

Η μέγιστη ροή μέσω της βαλβίδας γίνεται με τη ρύθμιση της πειραματικής βαλβίδας pos 207, (σχήμα 4.9) .

Για να γίνει αυτή η ρύθμιση πρέπει να αφαιρεθεί το προστατευτικό καπάκι και να χαλαρώσει το αντίθετο περικόχλιο στη βίδα ρύθμισης. Έπειτα πρέπει να γυρίσει ο κοχλίας ρύθμισης ροής για να αυξηθεί η ροή του λιπαντικού. Όταν επιτευχθεί η απαιτούμενη ταχύτητα πρέπει να κλειδώσει και να επαναριθμηστεί το προστατευτικό καπάκι.



**Σχήμα 4.9** Βαλβίδα ελέγχου ροής. [13]

### 4.5.2 Βαλβίδας πίεσης

Η βαλβίδα pos. 205 πρέπει να ελέγχεται μία φορά το χρόνο για σωστή ρύθμιση. Για το έλεγχο της πρέπει να χαλαρώσει το αντίθετο περικόχλιο στη ανάλογη βίδα και να γυρίσει η βίδα δεξιόστροφα για να αυξηθεί η πίεση. Πλήρης ρύθμισης γίνεται σε εύρος 5 στροφών.

Η βαλβίδα θα πρέπει να ρυθμίζεται στα 270 bar.



- **Σημείωση:** Ρύθμιση της πίεσης: 1 στροφή = 82 bar, ανώτατη πίεση διευθετήσιμη = 420 bar. Μετά από την ρύθμιση κλειδώνει η βαλβίδα με το αντίθετο περικόχλιο.

#### **4.5.3 Αντίθετη βαλβίδα ισορροπίας**

Η βαλβίδα αυτή ελέγχει τη μέγιστη δύναμη φρεναρίσματος του βαρούλκου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δεσίματος. Για να ρυθμιστεί η δύναμη, η βαλβίδα πρέπει να ρυθμιστεί μηχανικά μέσω της βαλβίδας σπειροειδή ατράκτου.

Η βαλβίδα πρέπει μόνο να ρυθμιστεί μόνο εάν το βαρούλκο έχει μια τάση να τρέξει ακανόνιστα κατά το χαμήλωμα ενός φορτίου ή κατά τη διάρκεια του δεσίματος.

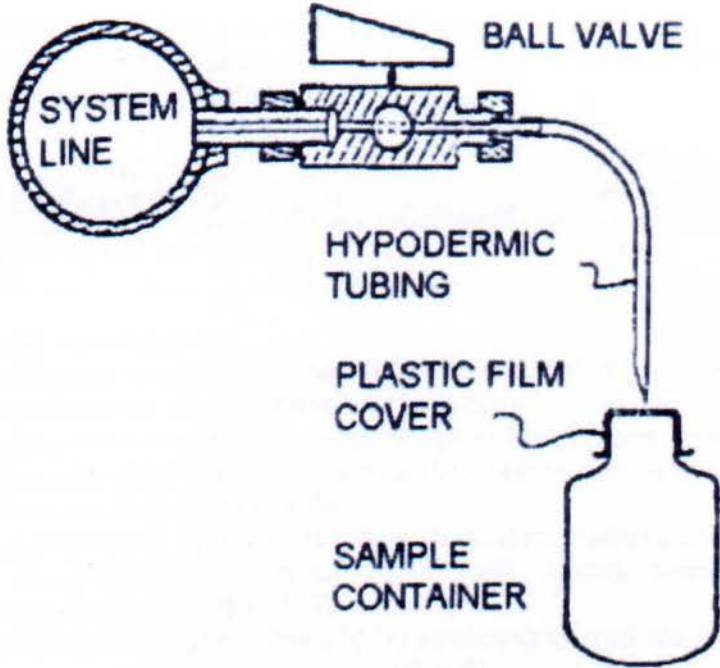
Η αντίθετη βαλβίδα ισορροπίας με τη διευθετήσιμη ενδεικτική ροή ρυθμίζεται με τον έλεγχο της ελαστικής δύναμης μέσα στη βαλβίδα, και το άνοιγμα της ενδεικτικής τροφοδοτικής βαλβίδας λαδιού.

- για να αυξηθεί η δύναμη φρεναρίσματος, πρέπει να βιδωθεί η άτρακτος προς τα μέσα.
- για να μειωθεί η δύναμη φρεναρίσματος, πρέπει να βιδωθεί η άτρακτος προς τα έξω.

#### **4.5.4 Δειγματοληψία λαδιού για τον έλεγχο μόλυνσης.**

Μια αποδεκτή διαδικασία για τον τρόπο δειγματοληψίας είναι το πρότυπο ISO 402. Αυτό περιλαμβάνει:

1. Πριν από την αφαίρεση ή συλλογή ενός δείγματος, μια ποσότητα λιπαντικού πρέπει να επιτρέπεται να ρέει από το σημείο συλλογής ίση τουλάχιστον με πέντε φορές τον όγκο μεταξύ της θυρίδας και του υπάρχοντος σημείου που πρόκειται να συλλεχτεί. Αυτό επιτρέπει στην συλλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος αφού στην περιοχή της θυρίδας υπάρχει μεγάλη πιθανότητα συσσώρευσης ακαθαρσιών και υπολειμμάτων που υπάρχουν μέσα στο λιπαντικό.
2. Επαρκές δείγμα θα πρέπει να συλλεχτεί από το σύστημα, τόσο ώστε να πληροί περίπου το 70% της δειγματοληπτικής φιάλης. Η ποσότητα αυτή αφήνει αρκετό περιθώριο για την αποτελεσματική ανακαίνιση του λιπαντικού πριν την ανάλυσή του.



**Σχήμα 4.10** Μέθοδος δειγματοληψίας λαδιού. [13]

3. Μολονότι η ποσοστό της δειγματοληψίας δεν επηρεάζει την ποιότητα του δείγματος, το ποσοστό δειγματοληψίας θα πρέπει, γενικά, να μην υπερβαίνει το 1% από την κύρια γραμμή ροής.
4. Το λιπαντικό εξέρχεται μέσω μιας πλήρως ανοικτής βαλβίδας με υψηλή γραμμική πίεση. Για τη μείωση της ταχύτητας του λιπαντικού στην έξοδο, η υπάρχουσα βαλβίδα μπορεί να βοηθήσει, γυρίζοντας την προς την κατεύθυνση που κλείνει.
5. Λαμβάνονται τουλάχιστον δύο δείγματα από κάθε δειγματοληπτικό σημείο που είναι εγκατεστημένο ήδη στο σύστημα.
6. Σαφής σήμανση των φιαλών.

#### 4.5.5 Δοκιμή φρένων – Τύμπανα βαρούλκων.

Το σετ δοκιμής φρένων αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα:

|     |                        |                     |                      |
|-----|------------------------|---------------------|----------------------|
| (1) | <b>υδραυλικό γρύλο</b> | ικανότητα           | 50 tons              |
|     |                        | μήκος χτυπήματος    | 337 mm               |
|     |                        | βάρος               | 36,3 kg              |
| (1) | <b>αντλία χειρός</b>   | πίεση               | 700 bar              |
|     |                        | χωρητικότητα τάνκερ | 2294 cm <sup>3</sup> |
|     |                        | βάρος               | 11,6 kg              |

(2) υποστηρίγματα με 4 (τέσσερα) M42 μπουλόνια/περικόχλια για τη συναρμολόγηση της φλάντζας του τυμπάνου.

(1) συρτή  
 (1) επέκταση για τον υδραυλικό γρύλο

Ο σκοπός της δοκιμής είναι να αποδεικτική ότι τα φρένα, όταν τοποθετηθούν και ρυθμιστούν σωστά, διατηρούν την ενδεδειγμένη πίεση φρεναρίσματος (P) στο βαρούλκο όταν ζητηθεί (πίνακας 4.5).

**Πίνακας 4.5** Ενδεδειγμένη πίεση φρεζαρίσματος. [13]

| Τύπος                                | 200HW   |
|--------------------------------------|---------|
| Ενδεδειγμένη πίεση φρεναρίσματος (P) | 40 tons |

Οι διαδικασίες δοκιμής είναι:

1. Τοποθετείται το μπουλόκι (pos 101) στις άνω τρύπες των υποστηριγμάτων και κλειδώνει με κλειδί περικοχλίου (pos 208).
2. Τοποθετείται ο υδραυλικός ανυψωτής με επέκταση (pos 200/102) κάτω από το μπουλόκι και ελέγχεται ότι όλα τα εξαρτήματα είναι σε σωστή θέση όπως φαίνεται στα παραπάνω σχέδια.
3. Ενεργοποιείται η πέδη και να ελέγχεται ότι είναι σωστά ρυθμισμένη. Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το μπουλόκι είναι σωστά τοποθετημένο στον υδραυλικό ανυψωτή (pos 102).

Η δύναμη φρεναρίσματος δοκιμής (T) υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$T = P * \frac{(D + d)}{2 * A}$$

Όπου:

| Μοντέλο βαρούλκου                                       | 200 HW   |
|---|--|
| P= ενδεδειγμένη πίεση φρεναρίσματος (ton)               | 40   |
| A= απόσταση του ανυψωτή από το κέντρο του τυμπάνου (mm) | 725mm (φλάντζα Φ 1250)<br>950mm (φλάντζα Φ 1700) |
| D= διάμετρο τυμπάνου (mm)                               | Φ 500  |
| d= διάμετρο συρματόσχοιου (mm)                          | Φ 32   |
| T= δύναμη φρεναρίσματος δοκιμής (ton)                   | 14 (φλάντζα Φ 1240)<br>11,2 (φλάντζα Φ 1490)     |

## <<ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ>>

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

#### 5.1 Μελετούμενο εξάρτημα αστοχίας – κόμπλερ υδραυλοκινητήρα.

Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει μια γενική άποψη του υδραυλοκινητήρα που χρησιμοποιείται για την ανύψωση άγκυρας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του.

#### **ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

##### **Μορφωτικός Σχεδιασμός:**

Επιτρέπει τους πολυάριθμους συνδυασμούς μεμονωμένων υποσυστημάτων και επιτρέπει τη μεγαλύτερη ευελιξία για γρήγορη ανταπόκριση στις απαιτήσεις του χρήστη.

##### **Απλή Τραχεία Κατασκευή:**

Ο κινητήρας αποτελείται από 5 βασικά υποσυστήματα. Αυτός ο κινητήρας προσφέρει εύκολη και χαμηλού κόστους συντήρηση, ελάχιστο χρόνο διακοπής (για επισκευή) και περισσότερο χρόνο ζωής.

##### **Χυτό Κύριο Σώμα:**

Η αυξημένη συνοχή και δύναμη του υλικού προσφέρει μείωση στις τομές των τοιχωμάτων, ελαχιστοποίηση του βάρους και αυξημένα ποσοστά πιέσεων (3625 psi) με αποτέλεσμα υψηλότερο λόγο ισχύος - βάρους.

##### **Φίλικό προς το Περιβάλλον:**

Άριστα χαρακτηριστικά λειτουργίας με συνθετικά, βιοδιασπώμενα, και υγρά με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό (H<sub>2</sub>O). Οι κινητήρες STAFFA είναι φίλικοι προς το περιβάλλον και μπορούν να λειτουργούν σε εφαρμογές με ιδιότητες κατά της αυτανάφλεξης.

##### **Επιλογές Αξόνων:**

Η διαθεσιμότητα πολλών διαφορετικών προτύπων σχεδίων διευκολύνει την ανταπόκριση των κινητήρων στις διαφορετικές ανάγκες του κάθε χρήστη.

**Σχήμα 5.1** Εξωτερικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα. [14]

Τα σχήματα 5.2 και 5.3 παρουσιάζουν τα βασικά εσωτερικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα του πυραυλοκινητήρα.

## **ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

### Υδροστατικά ισορροπημένη βαλβίδα διανομής:

Τέσσερις αιελακίσεις εξισορρόπησης πίεσης, δυο σε κάθε πλευρά, αντισταθμίζουν το πλευρικό φορτίο που δημιουργείται εξαιτίας των δυνάμεων πίεσης που δρουν στις θήρες των διανομένων πίεσης των βαλβίδων.

### Κόμπλερ (Συζευκτήρας Oldhams):

Επιτυγχάνεται θετικός συγχρονισμός βαλβίδων από μια άμεση σύζευξη του άξονα και της βαλβίδας διανομής με μια απλή χωρίς προβλήματα σύζευξη oldhams που ελαχιστοποιεί τις μηχανικές απώλειες και δεν επιτρέπει την μεταφορά πλευρικών φορτίων.

### Δαχτυλίδι συγκράτησης Conrod:

Τα εμβόλα conrod κρατούνται ενάντια στην έκκεντρη δύναμη που υφίσταται από τα δαχτυλίδια συγκράτησης που ελαχιστοποιούν την ζημιά σε περίπτωση παροδικής πτώσης στην πίεση ώθησης και παρέχουν μια υψηλότερη ανοχή σε δημιουργία σπινώσεων.

### Διατάξι σφραγισμένα έμβολα:

Δαχτυλίδι από nylon που υποστηρίζεται από ένα δαχτυλίδι PTFE για άριστη στεγανότητα και ελαχιστοποίηση της φθοράς. Αποδίδει υψηλότερη αποδοτικότητα και χρόνο ζωής.

### Κωνικά ρουλεμάν:

Σχεδιασμένα για μεγαλύτερο χρόνο ζωής και με σχήμα ειδικό για να αντέξει εσωτερικά υδραυλικά φορτία εκτός από εξωτερικά πλευρικά και ακτινικά φορτία στον άξονα.

### Υδροστατικά ισορροπημένα Conrod:

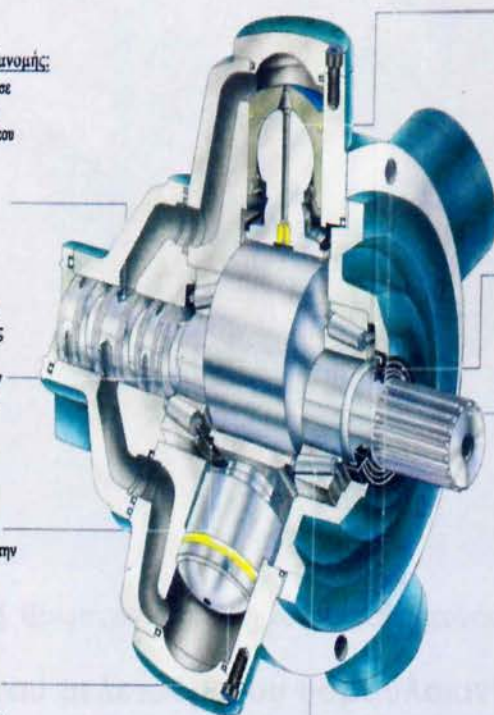
Οι δυνάμεις του εμβόλου μεταδίδονται στον άξονα μέσω ράβδων σύνδεσης από μια μεγάλη περιοχή επαφών, αντισυμμετρικά με την άξονα, αντισυμμετρικά με την άξονα, αντισυμμετρικά με την άξονα. Η παροχή του λαδιού γίνεται υπό πίεση διαμέσω ενός ρυθμιστή - περιοριστή στην λεπτότερη επιφάνεια του ρουλεμάν. Αυτός ο ρυθμιστής - περιοριστής παρέχει ένα αληθινά ισορροπημένο υδροστατικό 'ρουλεμάν' μεταξύ της λεπτής επιφάνειας και του στροφαλοφόρου άξονα, εξασφαλίζοντας περιστροφική σταθερότητα με ελάχιστες απώλειες λόγω τριβής. Αντί το χαρακτηριστικό προσφέρει στις μηχανές STAFFA εξαιρετική ροπή έναρξης και μηχανική αποδοτικότητα καθώς επίσης και μεγαλύτερο χρόνο ζωής.

### Δαχτυλίδι στεγανότητας άξονα με διπλό χείλος:

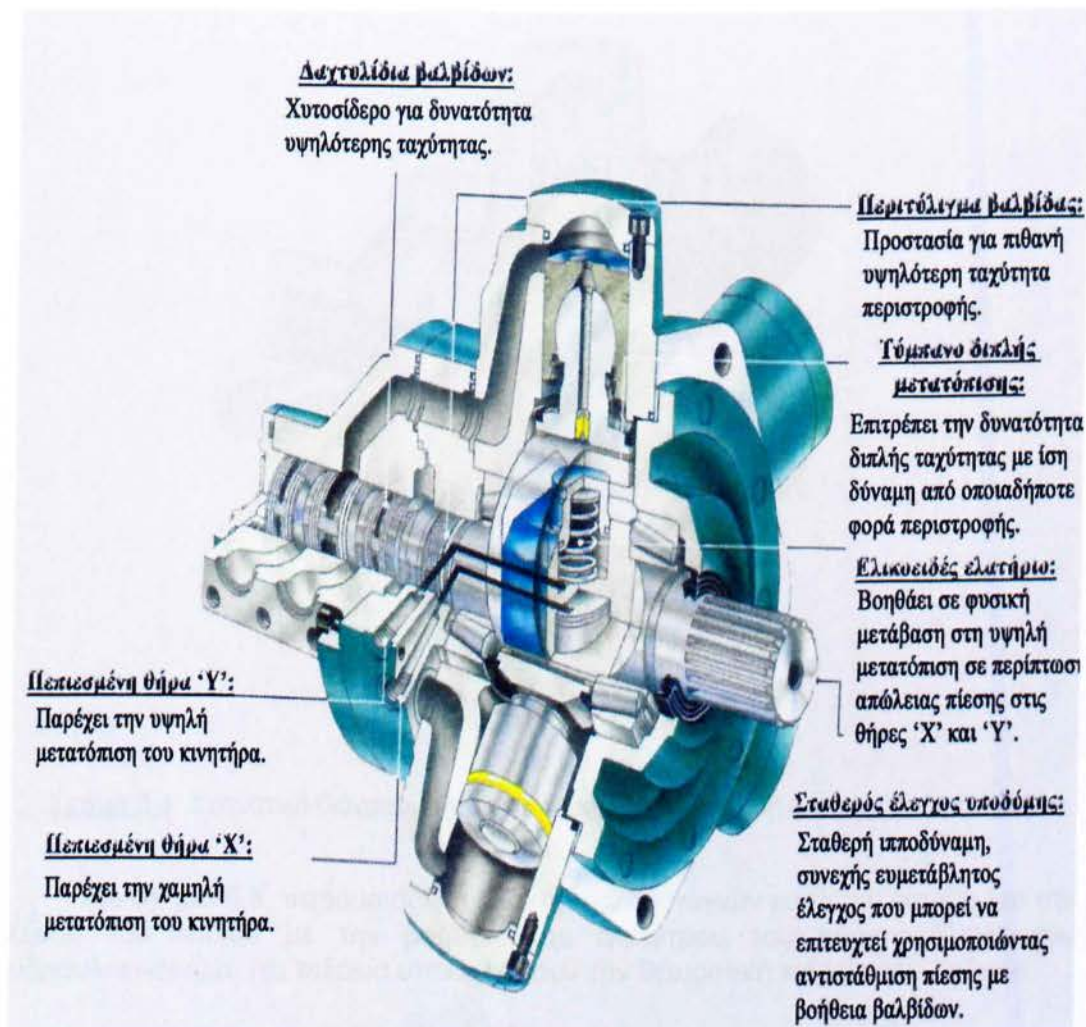
Τα δαχτυλίδια αυτά είναι σχεδιασμένα για αποδοτική στεγανοποίηση αργής ταχύτητας και είναι διαθέσιμα για τα τυποποιημένα υδραυλικά ρευστά καθώς επίσης και εστέρες φωσφορής. Διαθέσιμα

### Κατεύθυνση δύναμης:

Ίση ροπή σε κάθε κατεύθυνση που επιτυγχάνεται με απλή αλλαγή της κατεύθυνσης της δύναμης.



**Σχήμα 5.2** Εσωτερικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα. [14]

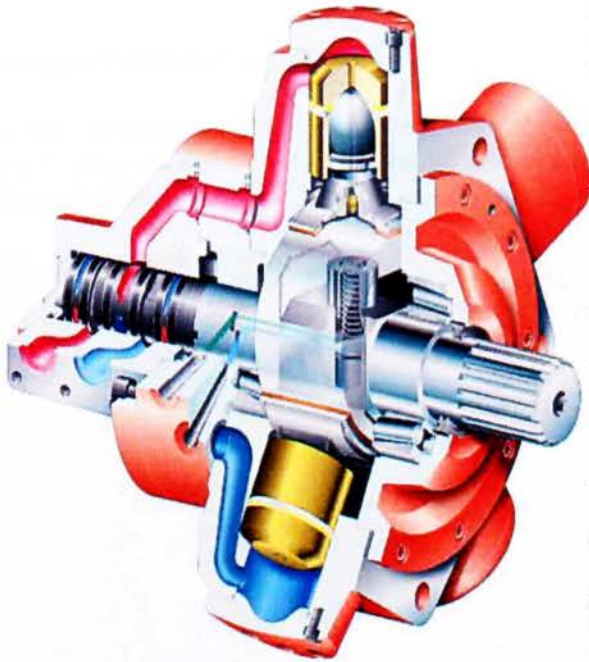


**Σχήμα 5.3** Εσωτερικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα. [14]

## 5.2 Λειτουργία του μελετούμενου υδραυλοκινητήρα.

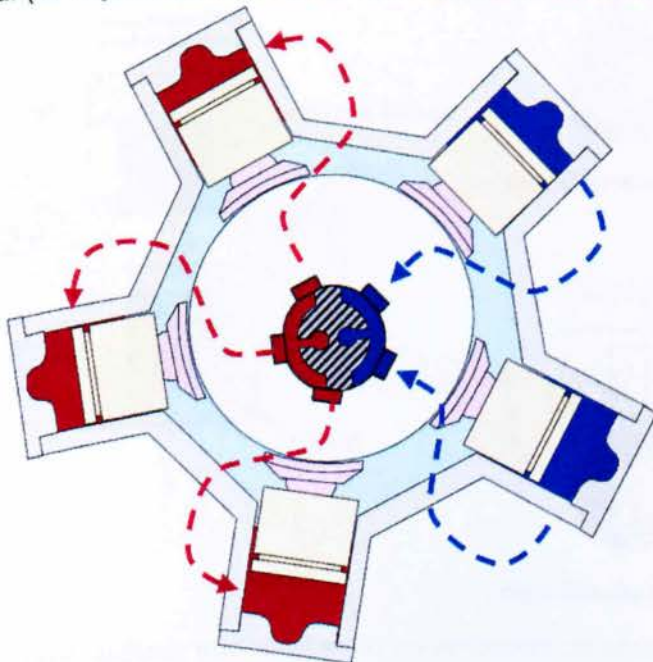
### 5.2.1 Γενικός τρόπος λειτουργίας του υδραυλοκινητήρα.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.4, ο υδραυλοκινητήρας κινείται με χρήση (εισροή – εκροή) λαδιού. Με την βοήθεια του λαδιού κινείται ο κύριος άξονας του υδραυλοκινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται με το κόκκινο χρώμα, παρουσιάζεται η είσοδος του λαδιού με υψηλή πίεση. Στην συνέχεια το λάδι οδηγείται στα πιστόνια που βρίσκονται στο άνω άκρο, με αποτέλεσμα να τα ωθούν προς το κάτω άκρο. Με αυτό τον τρόπο το έκκεντρο που έχει ο άξονας, παρασύρει τα άλλα πιστόνια που βρίσκονται στο κάτω άκρο προς το άνω άκρο. Έτσι δημιουργείται ταυτόχρονη έξοδος λαδιού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά με αποτέλεσμα την συνεχόμενη ροή του λαδιού (είσοδο – έξοδο) και την κίνηση του κύριου άξονα που με την σειρά του δίνει κίνηση στο βαρούλκο.



**Σχήμα 5.4** Σχηματικό διάγραμμα που παρουσιάζει την εισροή – εκροή λαδιού. [14]

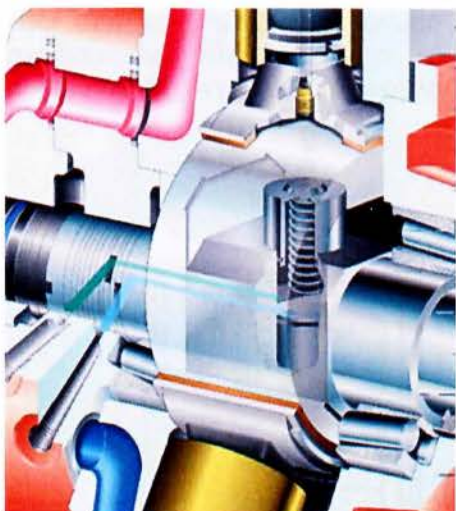
Στο σχήμα 5.5, παρουσιάζεται η θέση των πιστονιών κατά την είσοδο και την έξοδο του λαδιού με την βοήθεια του έκκεντρου του κύριου άξονα του υδραυλοκινητήρα. (τα τοξάκια υποδηλώνουν την θεωρητική πορεία του λαδιού).



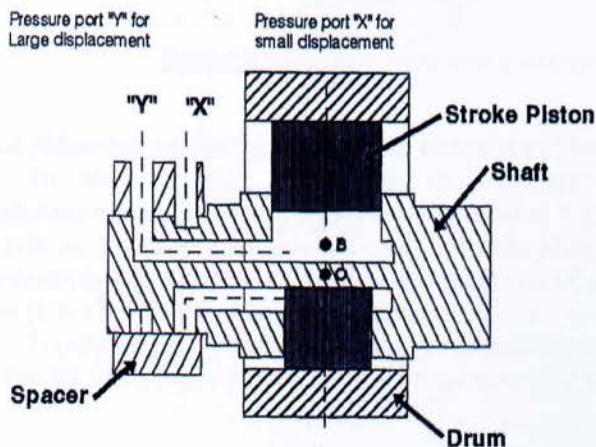
**Σχήμα 5.5** Θέση των πιστονιών κατά την είσοδο και την έξοδο του λαδιού. [14]

### 5.2.2 Ρύθμιση μετατόπισης του άξονα.

Υπάρχουν δυο εγκάρσιες οπές ως προς τον άξονα – κύριο σώμα της μηχανής – με τις οποίες μπορούμε να ρυθμίσουμε είτε μεγάλη μετατόπιση (θήρα "Υ") είτε μικρή μετατόπιση (θήρα "Χ").



**Σχήμα 5.6** Οπές από τις οποίες το λάδι που εισέρχεται ρυθμίζει την μετατόπιση. [14]



**Low Displacement**



**High Displacement**

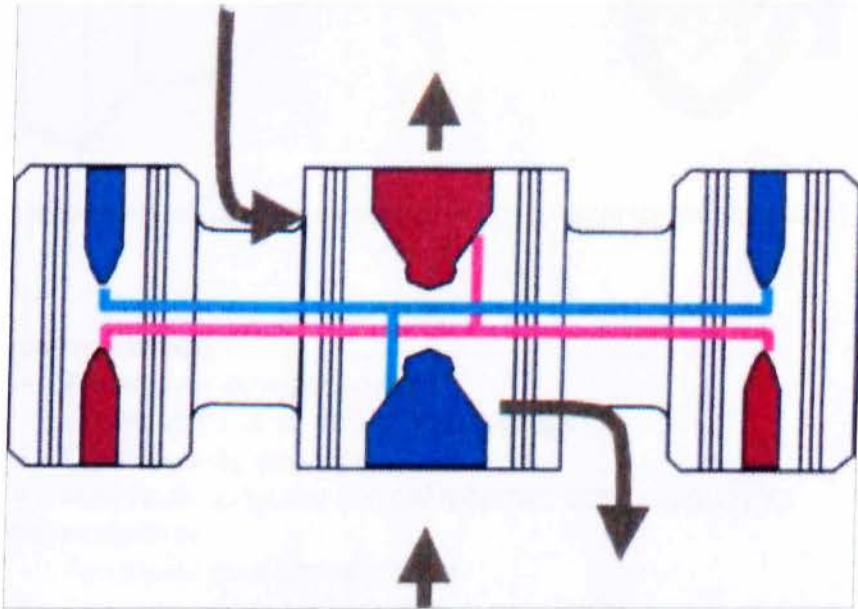
**Σχήμα 5.7** Τομή του κύριου άξονα που υποδεικνύει την λειτουργία της μετατόπισης . [14]



### 5.2.3 Χρησιμότητα του Valve spool.

Το valve spool είναι εκείνο που ρυθμίζει την κατεύθυνση του εισερχομένου λαδιού προς τα πιστόνια και του εξερχομένου από τα πιστόνια προς το γενικό δίκτυο λαδιού του πλοίου.

Η γεωμετρία του είναι τέτοια ώστε να έχει μεγάλη είσοδο (υψηλή πίεση) και μικρές αυλακώσεις (χαμηλή πίεση) για κατεύθυνση του λαδιού από και προς τα πιστόνια. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.8, η δομή του valve spool είναι τέτοια ώστε να αντισταθμίζονται οι πλευρικές δυνάμεις που δημιουργούνται. Δηλαδή, το λάδι από κάθε μεγάλη αυλάκωση οδηγείται σε δυο μικρές αυλακώσεις στην αντιδιαμετρική πλευρά, μια σε κάθε άκρο. Αυτές οι δυο μικρές αυλακώσεις αθροιστικά δέχονται τον ίδιο όγκο λαδιού με την μεγάλη κεντρική αυλάκωση.

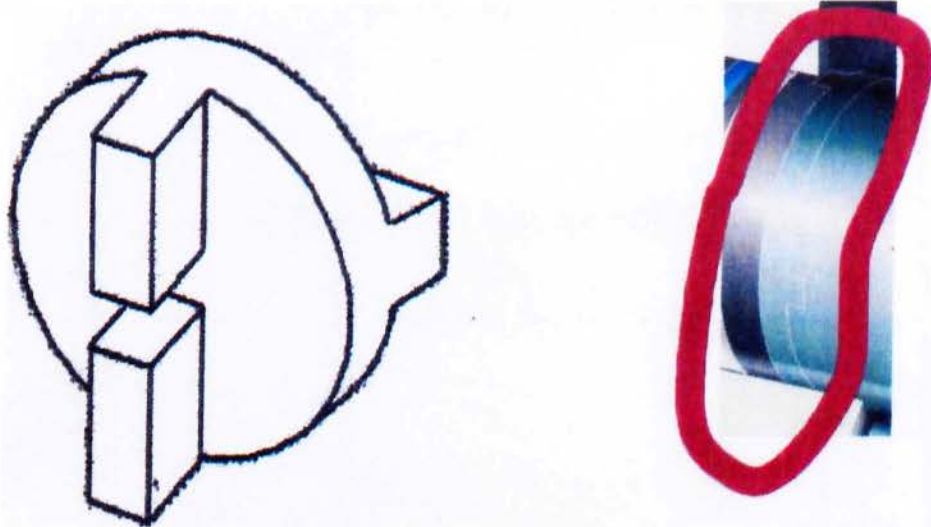


**Σχήμα 5.8** Μέθοδος λειτουργίας του Valve spool. [14]

### 5.2.4 Κόμπλερ σύζευξης – oldhams coupling (δοκίμια μελέτης αστοχίας).

Το κόμπλερ είναι ουσιαστικά το μικρότερο σε μέγεθος εξάρτημα του υδραυλοκινητήρα που συμμετέχει στην μετάδοση της κίνησης και σαν αποτέλεσμα δέχεται τις περισσότερες δυνάμεις και καταπονήσεις. Αυτό είναι το εξάρτημα που παρουσιάζει την αστοχία κατά την λειτουργία του υδραυλοκινητήρα και για αυτό το λόγο μελετάται λεπτομερώς στην συνέχεια.

Σύμφωνα με τις οδηγίες της κατασκευάστριας εταιρίας Kawasaki το κόμπλερ θα πρέπει να έχει την μορφή και την γεωμετρία που φαίνεται στο σχήμα 5.9.



**Σχήμα 5.9** Μορφή και γεωμετρία που πρέπει να έχει το κόμπλερ για την σωστή λειτουργία του. [14]

➤ **Χαρακτηριστικά:**

- Άνεση στην συναρμολόγηση
- Σταθερότητα με το υπόλοιπο μηχάνημα
- Όχι πλευρικές φορτίσεις
- Μονή ευθυγράμμιση (όχι άλλη δυνατή θέση εφαρμογής)

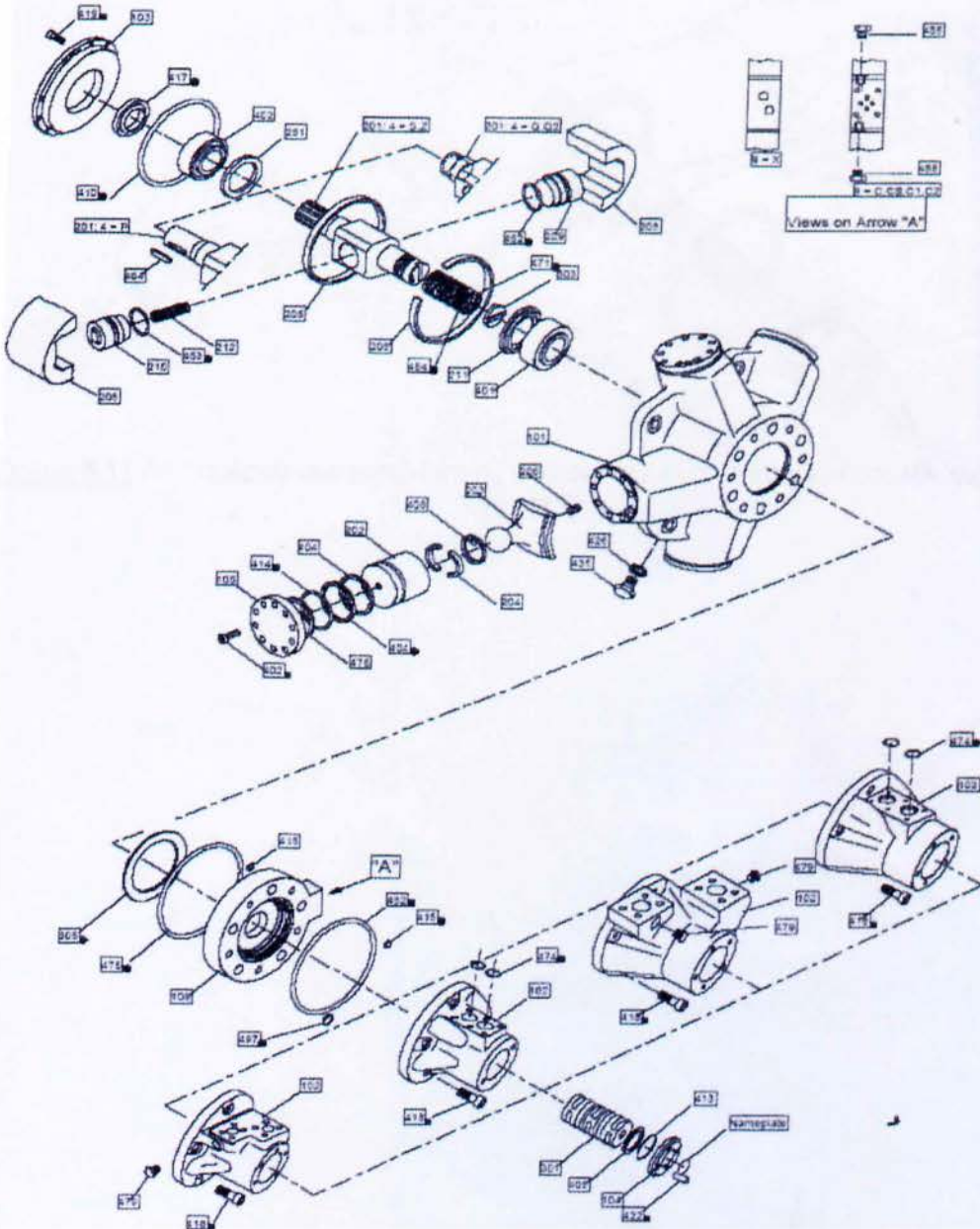
➤ **Πλεονεκτήματα:**

- Λειτουργία χωρίς προβλήματα
- Ελαχιστοποίηση των μηχανικών απωλειών
- Ευκολία στην αντικατάσταση του
- Μικρό κόστος
- Δεν χρειάζεται να αντικαταστήσεις ολόκληρο το εξάρτημα παρά μόνο αυτό.

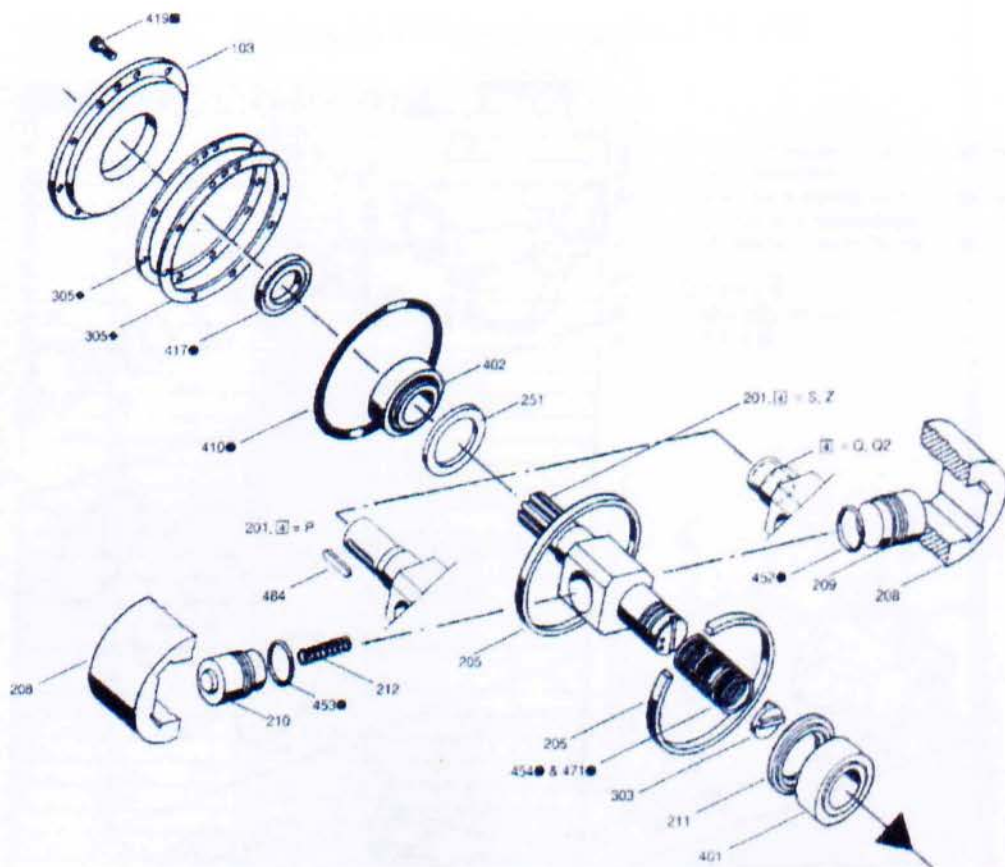
### 5.3 Μηχανολογικά σχέδια συναρμολόγησης του υδραυλοκινητήρα.

Στην εικόνα 5.10 παρουσιάζεται το σχέδιο συναρμολόγησης του υδραυλοκινητήρα.

## STAFFA MOTOR C200 SERIES 70



**Σχήμα 5.10** Σχέδιο συναρμολόγησης του υδραυλοκινητήρα. [13]



**Σχήμα 5.11** Λεπτομέρεια συναρμολόγησης η οποία περιέχει το πάνω μέρος του σχεδίου 5.10. [13]

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

**Πίνακας 5.1** Υπόμνημα του σχεδίου 5.10. [13]

| Item | Qty  | Description  |
|------|------|--|
| 101  | 1    | Motorcase  |
| 102  | 1    | Valve housing                                      |
| 103  | 1    | Front cover  |
| 104  | 1    | Valve end cap                                      |
| 105  | 5    | Cylinder head                                      |
| 109  | 1    | Valve spacer plate                                 |
| 151  | 1    | Shim plate   |
| 153  | 1    | Shuttle end cap                                    |
| 201  | 1    | Two-speed crankshaft                               |
| 202  | 5    | Piston   |
| 203  | 5    | Connecting rod                                     |
| 204  | 10   | Piston retaining half ring                         |
| 205  | 2    | Connecting rod retaining ring                      |
| 206  | 7    | Restrictor screw                                   |
| 208  | 1    | Displacement drum                                  |
| 209  | 1    | Large displacement piston                          |
| 214  | 1    | Small displacement piston                          |
| 211  | 1    | Rear plate   |
| 212  | 1    | Spring (displacement piston)                       |
| 254  | 1    | Front plate  |
| 256  | 1    | Back-up ring (shaft seal)                          |
| 301  | 1    | Valve spool  |
| 303  | 1    | Oldham coupling                                    |
| 305  | ■    | Shim kit (plastic and steel)                       |
| 321  | 1    | Nameplate  |
| 401  | 1    | Rear bearing                                       |
| 402  | 1    | Front bearing                                      |
| 404  | 5 •  | Piston seal ring                                   |
| 405  | 12 • | Valve seal ring                                    |
| 408  | 5    | Circlip (piston internal)                          |
| 410  | 1 •  | O-ring (front cover)                               |
| 413  | 1 •  | O-ring (valve end cap)                             |
| 414  | 5 •  | O-ring (cylinder end cap)                          |
| 415  | 5 •  | O-ring (internal ports: spacer plate to motorcase) |
| 415  | 5 •  | O-ring (internal ports)                            |
| 417  | □ •  | Shaft seal   |
| 418  | 1    | S.H.C.S (valve housing/spacer/motorcase)           |
| 419  | 10   | S.H.C.S. (front cover)                             |
| 420  | 50   | S.H.C.S (cylinder head cap)                        |
| 422  | ▲    | S.H.C.S (valve end cap)                            |
| 426  | 2 •  | Bonded seal, drain                                 |
| 435  | 2    | Drain Plug   |
| 452  | 1    | Small piston seal ring                             |
| 453  | 1    | Large piston seal ring                             |
| 454  | 1    | Shaft seal ring                                    |
| 456  | 2    | Plug (spacer plate)                                |
| 471  | 1    | Shaft seal backing ring                            |
| 474  | 2 •  | O-ring (external ports)                            |
| 475  | 1 •  | O-ring (spacer plate to motorcase)                 |
| 476  | 5 •  | Back up ring (cylinder end cap)                    |
| 479  | 2    | Steel plug (valve housing)                         |
| 480  | 7    | S.H.C.S (shim plate)                               |
| 482  | 1 •  | O-ring (valve housing surround)                    |
| 483  | 5 •  | Piston seal backing ring                           |
| 484  | 1    | Key  |
| 493  | 1 •  | O ring (shim plate)                                |
| 497  | 2 •  | O-ring (spacer plate pressure feed)                |
| 756  | 1    | Shuttle sleeve                                     |
| 757  | 1    | Plug (shuttle)                                     |
| 758  | 1    | Shuttle spool                                      |
| 759  | 1    | O-ring (shuttle)                                   |
| 760  | 1    | O-ring (shuttle)                                   |
| 761  | 1    | Back up ring (for CK)                              |
| 762  | 1    | Back up ring (for CL)                              |
| 763  | 1    | Shuttle stop pin                                   |

- (1) Can be supplied as a complete valve sub-assembly.
- (2) Can be supplied as 5 complete piston sub assemblies.
- Available only in Service Kit.
- 1 for 4
- Quantity as required.
- ▲ 4 for 8

• Available only in Service Kit

Shuttle Valves:  
Shuttle valve fitted when model Code.  
9 = "CS"

#### 5.4 Συλλογή ιστορικών δεδομένων.

Σύμφωνα με πληροφορίες του υπεύθυνου αρχιμηχανικού, ο υδραυλοκινητήρας ακολουθεί όλες τις οδηγίες λειτουργίας και συντήρησης του manual όπως προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.

Επίσης, από την στιγμή που ο συγκεκριμένος υδραυλοκινητήρας είναι διπλής ταχύτητας, η αστοχία συνήθως συμβαίνει κατά την διάρκεια καθόδου της άγκυρας, αφού κατά την λειτουργία αυτή, ο άξονας αποκτά υψηλή ταχύτητα περιστροφής, αρκετά πάνω από τα όρια ασφαλείας του λόγω του μεγάλου βάρους της άγκυρας. Το κόμπλερ σύζευξης (oldhams coupling) δέχεται απότομες αλλαγές πιέσεων και ροπών, με αποτέλεσμα να σπάει.

Από την στιγμή που ο υδραυλοκινητήρας ακολουθεί όλες τις οδηγίες λειτουργίας και συντήρησης που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία, το κόμπλερ δεν θα έπρεπε να σπάει πριν από την συμπλήρωση του χρόνου ζωής του.

Τέλος είναι γνωστό ότι τα κόμπλερ είναι κατασκευάζονται με την μέθοδο της χύτευσης για να παράγονται πολλά τεμάχια ταυτόχρονα. Στην συνέχεια υφίστανται μηχανουργική κατεργασία για να πάρουν τη τελική τους μορφή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ

#### 6.1 Οπτική επιθεώρηση και φωτογράφιση

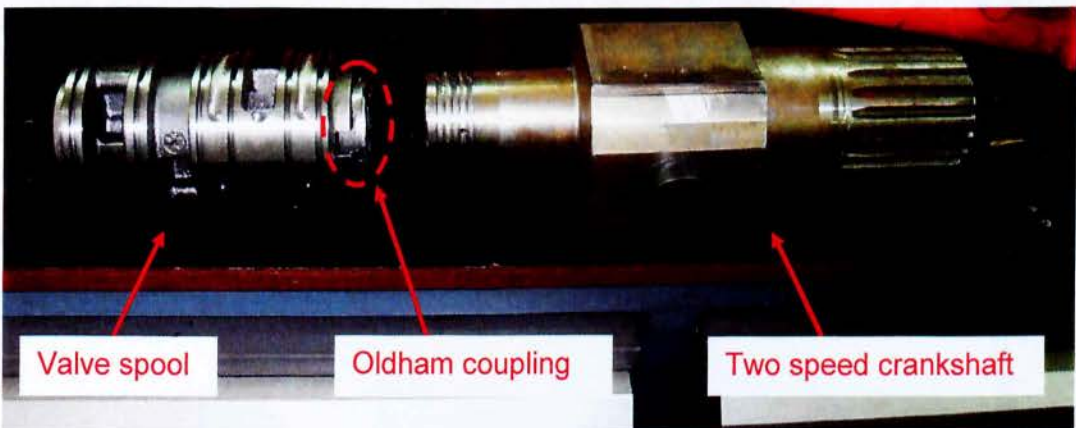
Για την μελέτη πάρθηκαν τρία δείγματα (Oldham coupling) που αστόχησαν, τα οποία θα αναλυθούν και θα περιγραφούν παράλληλα καθ' όλο το πειραματικό μέρος. Τα εξαρτήματα που παραλείφθηκαν εξετάστηκαν προσεκτικά με γυμνό μάτι και στη συνέχεια φωτογραφήθηκαν για τη δημιουργία αρχείου.

Η φωτογράφιση πραγματοποιήθηκε σε δυο στάδια. Πρώτα πάρθηκαν φωτογραφίες κατά την στιγμή της παραλαβής των εξαρτημάτων από την εταιρία FLUID POWER ENGINEERING, και σε δεύτερο στάδιο πάρθηκαν πιο αναλυτικές φωτογραφίες στο εργαστήριο Π.Ε.Τ.ΥΛ. του Α.Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε χωρίς τη χρήση επαγγελματικής φωτογραφικής μηχανής και τεχνητού φωτισμού.

Κατά την παραλαβή των αστοχούντων εξαρτημάτων από την εταιρία που είχαν σταλεί για επισκευή, έγινε οπτική επιθεώρηση που είχε σκοπό την συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα γενικά χαρακτηριστικά του κομματιού. Παρατηρήθηκαν προσεκτικά το σχήμα και το μέγεθος τους, η ποιότητα της επιφάνειας, την ύπαρξη ρωγμών και η ανάπτυξη τους, αναζητώντας οποιοδήποτε σημάδι το οποίο θα ήταν χρήσιμο στην ανάλυση αστοχίας.

Επιτόπου πραγματοποιήθηκε φωτογράφιση των επιμέρους εξαρτημάτων κατά τεμάχιο ξεχωριστά αλλά και σαν συναρμογή.

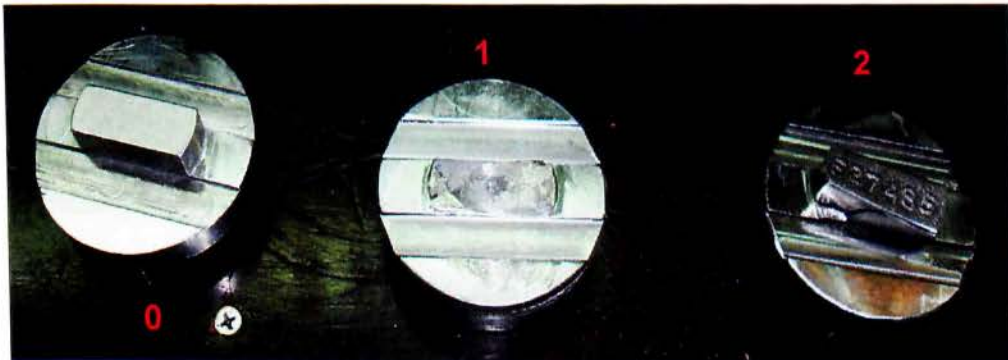
Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζονται τα κύρια μέρη συναρμογής που παραλήφθηκαν από το μηχανουργείο. Σε αυτά περιλαμβάνονται ο κύριος άξονας (two-speed crankshaft), ένα από τα δυο κόμπλερ (Oldham coupling) που πάρθηκαν, και το valve spool.



**Σχήμα 6.1** Τα κύρια μέρη συναρμογής που παραλήφθηκαν από το μηχανουργείο.

Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τρία κόμπλερ που χρησιμοποιούνται στον ίδιο τύπο υδραυλοκινητήρα που μελετάται. Το αριστερό κόμπλερ (αριθμός 0) είναι καινούριο. Τα αλλά δυο (αριθμός 1 και 2) πάρθηκαν από το μηχανουργείο για την

μελέτη ανάλυσης αστοχίας. Πρόκειται για παλιά εξαρτήματα τα οποία έχουν υποστεί διάφορα είδη φθορών κατά την λειτουργία τους και έγιναν ακατάλληλα για χρήση πριν το προβλεπόμενο χρόνο ζωής τους.



**Σχήμα 6.2** Κόμπλερ που χρησιμοποιούνται σε υδραυλοκινητήρα διπλής ταχύτητας. Το κόμπλερ (0) είναι καινούριο και τα κόμπλερ (1) και (2) έχουν υποστεί αστοχία.

Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τρία κόμπλερ με την ίδια γεωμετρία και διαστάσεις. Το κόμπλερ (0) είναι καινούριο και τα κόμπλερ (1) και (2) παρουσιάζουν αστοχία. Το εξάρτημα εμφανίζει μία προεξοχή (ένα δόντι) το οποίο χρησιμεύει στην συναρμολόγηση με το κύριο άξονα. Το μεσαίο κόμπλερ (1) εμφανίζει αστοχία με θραύση. Φαίνεται ότι το δόντι που έχει στο πάνω μέρος έχει αποκοπεί εντελώς. Το δεξί κόμπλερ (2) εμφανίζει αστοχία με παραμόρφωση και μερική αποκόλληση. Το δόντι έχει υποστεί εμφανής στρέψη.

Από την απλή οπτική επιθεώρηση μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι κατά την λειτουργία του υδραυλοκινητήρα το δόντι του κόμπλερ δέχεται έντονες στρεπτικές δυνάμεις. Οι τάσεις καταπόνησης υπερβαίνουν το όριο διαρροής του υλικού. Τα εξαρτήματα παραμορφώνονται με στρέψη και ορισμένα φτάνουν στο σημείο της θραύσης. Στο δεξί κόμπλερ (2) φαίνεται πως δεν έχει προλάβει να κοπεί όλο το δόντι αλλά η στρέψη προκάλεσε ρωγμές και μερική αποκόλληση.

Στα σχήματα 6.3 και 6.4 παρουσιάζεται η συναρμογή που επιτυγχάνεται μεταξύ του κόμπλερ (στην προκειμένη περίπτωση του κόμπλερ με αριθμό (1) του κύριου άξονα (two-speed crankshaft) και του valve spool. Στο σχήμα 6.3 παρατηρείται, ένα θραύσμα (σπασμένο δόντι) το οποίο έχει αποκολληθεί από άγνωστο κόμπλερ και έμεινε εγκλωβισμένο στην υποδοχή του κυρίου άξονα. Αυτό το κομμάτι θεωρήθηκε δοκίμιο (3) μελέτης ενός επιπλέον εξαρτήματος που αστόχησε και ακολούθησε όλα τα στάδια μελέτης.



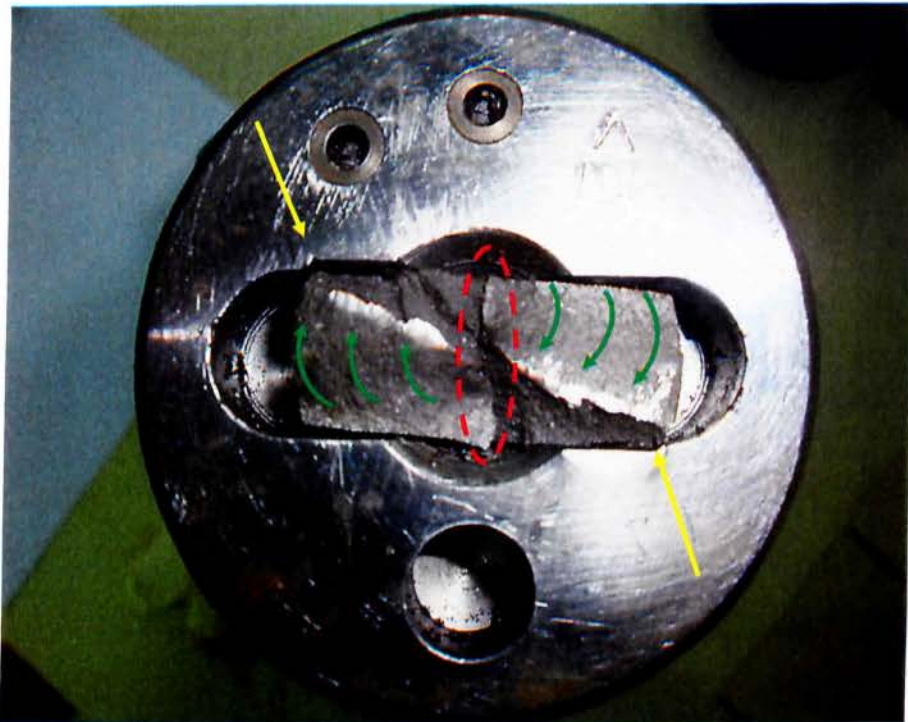


**Σχήμα 6.3** Θραύσμα (δόντι) άγνωστου κόμπλερ εγκλωβισμένο στην υποδοχή του κύριου άξονα.



**Σχήμα 6.4** Το κόμπλερ No 1 τοποθετείται στην άλλη υποδοχή του valve spool.

Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζεται, σε κοντινή προβολή, η πλευρά σύζευξης του κύριου άξονα (two-speed crankshaft) με το κόμπλερ (Oldhams coupling). Στο κέντρο του σπασμένου κομματιού έχει επισημανθεί με κόκκινο διακεκομμένο κύκλο μια μεγάλη ρωγμή που χωρίζει το κομμάτι σε δυο μικρότερα. Μικρότερα θραύσματα και ακαθαρσίες που έχουν παραμείνει στην επιφάνεια του είναι εμφανή με γυμνό μάτι. Με πράσινα βέλη σημειώνεται ο προσανατολισμός του υλικού που παρουσιάζει την φορά της κίνησης κατά την οποία έσπασε το κόμπλερ και την συσσώρευση και συμπίεση του υλικού σε αυτές τις περιοχές. Αυτό το γεγονός εξηγεί το σημείο που βρίσκεται η ρωγμή και την κατεύθυνση της. Τα κίτρινα βέλη δείχνουν τα σημεία που η υποδοχή του κύριου άξονα έχει υποστεί παραμόρφωση προς τα έξω, δηλαδή με φορά ίδια με αυτή που ασκείται η ροπή της κίνησης.



**Σχήμα 6.5** Η πλευρά σύζευξης του κύριου άξονα με το κόμπλερ.

Στα σχήματα 6.6 και 6.7 παρουσιάζεται το valve spool. Στο σχήμα 6.6 το valve spool φαίνεται σε διαγώνια όψη. Από αυτή την όψη διακρίνονται λίγο οι υποδοχές που διέρχεται το λάδι κατά την είσοδο και κατά την έξοδο από τον υδραυλοκινητήρα και η υποδοχή που μπαίνει το κόμπλερ και γίνεται η μετάδοση κίνησης. Το σχέδιο 6.7 επικεντρώνεται αποκλειστικά στην υποδοχή που εισέρχεται το κόμπλερ. Από αυτή την φωτογραφία φαίνεται ότι η υποδοχή είναι πέρα ως πέρα, σε αντίθεση με την υποδοχή του κύριου άξονα (two-speed crankshaft) που αφήνει κάποιο περιθώριο στις δυο άκρες, αριστερά – δεξιά. Η επιφάνεια δεν έχει κάποια συγκεκριμένη κατεργασία, αλλά έχει απομείνει ως έχει από την χύτευση του αντικειμένου. Επίσης δεν παρατηρείται κάποιο ιδιαίτερο ράδιο στις γωνίες της υποδοχής, όπως το ίδιο συμβαίνει και στην υποδοχή του κύριου άξονα.



**Σχήμα 6.6** Διαγώνια όψη του valve spool.



**Σχήμα 6.7** Η πλευρά σύζευξης του valve spool με το κόμπλερ.

Στο σχήμα 6.8 παραθέτονται τα κόμπλερ (1) και (2) το ένα δίπλα στο άλλο. Είναι φανερές οι διαφορές στον τρόπο αστοχίας. Στην πρώτη περίπτωση το δόντι υφίσταται πλαστική παραμόρφωση και στη δεύτερη περίπτωση ολική θραύση. Από την φωτογραφία φαίνεται ότι παρουσιάζουν ίδια γεωμετρία και διαστάσεις.

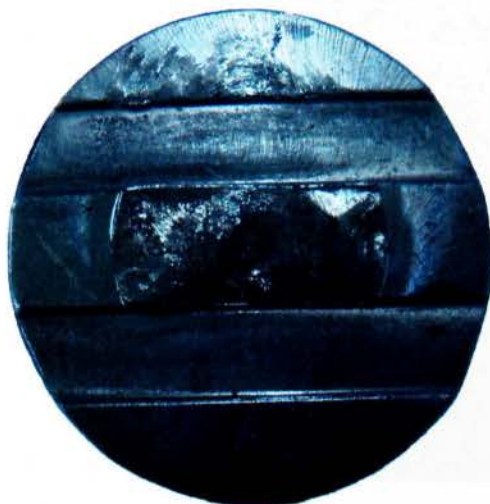


**Σχήμα 6.8** Τα αστοχούντα κόμπλερ.

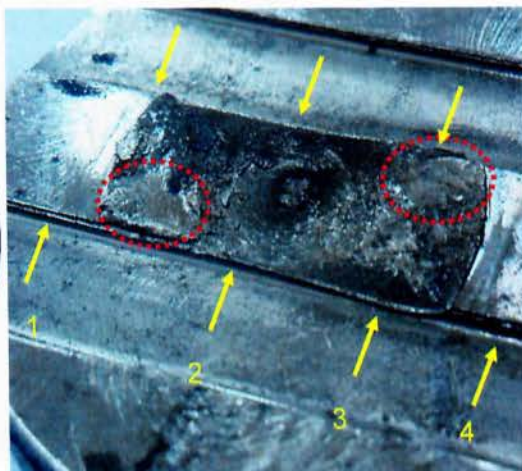
Κατά την ανάλυση παρατηρούνται λεπτομερώς το κάθε κόμπλερ ξεχωριστά. Στα σχήματα 6.9 και 6.10 εμφανίζεται το κόμπλερ No 1. Παρατηρούνται μικρά λούκια πάνω και κάτω από το δόντι. Κατά πάσα πιθανότητα σχεδιάστηκαν με σκοπό να δημιουργούν ένα μικρό βάθος στις περιοχές αυτές για να είναι δυνατή η ύπαρξη ραδίου (σχήμα 6.9). Λαμβάνοντας υπ' όψη το μέγεθος του δοντιού και γενικά την συνολική γεωμετρία και λειτουργία του κόμπλερ, το ράδιο δεν είναι επαρκές. Είναι φανερές επίσης κάποιες καμπυλωτές γραμμές πάνω σε όλη την επιφάνεια του κόμπλερ, γύρω από το δόντι. Αυτές οι γραμμές δεν έχουν μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και φορά. Μπορεί να οφείλονται στην κατεργασία που δέχτηκε το κόμπλερ σε μηχανήμα φρέζας κατόπιν της χύτευσης του, για να πάρει το τελικό σχήμα που πρέπει να έχει.

Παρατηρώντας τώρα το κόμπλερ σε κοντινή προβολή φαίνονται κάποιες αυλακώσεις που υπάρχουν πάνω στο σημείο θραύσης (σχήμα 6.10). Αυτά αποδεικνύουν πως προκλήθηκε αποκόλληση υλικού κατά την θραύση. Επίσης, στις δυο αντιδιαμετρικές περιοχές που περιγράφονται με το κόκκινο χρώμα, παρατηρείται μια περιοχή όπου το υλικό έχει δεχτεί κάποιου είδους λείανση. Η λείανση οφείλεται στο γεγονός ότι εκείνες οι περιοχές είναι οι πρώτες που δέχονται την απότομη στρεπτική ροπή και αποτελούν τα σημεία έναρξης θραύσης. Επομένως σε αυτά τα σημεία σπάει αρχικά το κόμπλερ ενώ το υπόλοιπο είναι σταθερό (δεν έχει σπάσει). Με την αντίθετη περιστροφή του κόμπλερ τα σημεία αυτά τρίβονται και λειαίνουν τοπικά την περιοχή. Η συνεχή καταπόνηση του κόμπλερ προκαλεί την πλαστική παραμόρφωση του δοντιού. Με κίτρινα βέλη παρουσιάζεται η μετατόπιση το υλικού του δοντιού λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης, πριν καταλήξει στην θραύση. Στο σημείο 1 το οποίο βρίσκεται

εκτός δοντιού εμφανίζεται το ράδιο που έχει κανονικά το κόμπλερ. Στα σημεία 2 και 3 το ράδιο χάνεται σταδιακά και το υλικό του δοντιού μετατοπίζεται προς τα έξω. Στο σημείο 4, το οποίο βρίσκεται εκτός δοντιού, το ράδιο υπάρχει κανονικά και δεν παρατηρείται καμία αλλαγή. Το ίδιο ισχύει και από την πάνω πλευρά του δοντιού.



**Σχήμα 6.9** Το κόμπλερ No1 σε προβολή από πάνω.



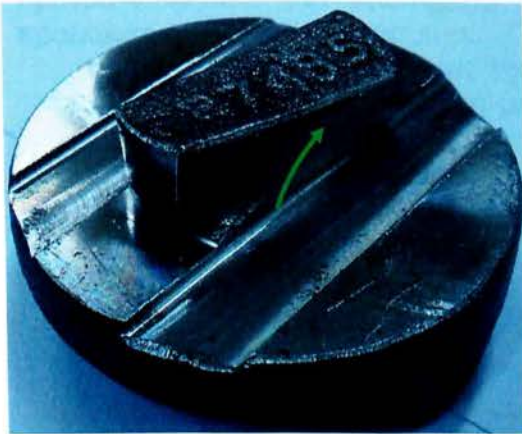
**Σχήμα 6.10** Το κόμπλερ No1 σε κοντινή προβολή της περιοχής της θραύσης.

Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζεται το κόμπλερ No 2 σε κάθετη όψη από πάνω και στα σχήματα 6.12 και 6.13, σε πλάγια όψη από αριστερά και δεξιά. Από την πάνω και από την κάτω πλευρά του δοντιού υπάρχει από ένα λούκι πέρα ως πέρα, που χρησιμεύει για την δημιουργία ραδίου. Η κατασκευή του έγινε με φρέζα που άφησε τις κυκλικές γραμμώσεις στην επιφάνειά του. Με κόκκινο βέλος φαίνονται οι περιοχές έναρξης θραύσης. Η πλαστική παραμόρφωση έχει προκαλέσει την μερική αποκόλληση του δοντιού. Οι περιοχές αυτές δέχονται λείανση κατά την λειτουργία του υδραυλοκινητήρα.

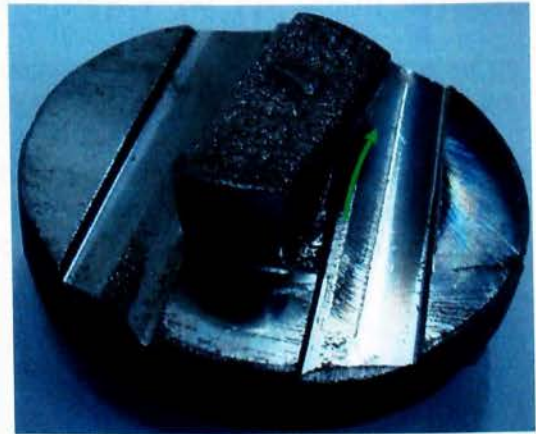
Στα σχήματα 6.12 και 6.13 φαίνεται το δόντι του κόμπλερ να έχει αλλάξει σχήμα όχι μόνο στην βάση του, όπου έχει υποστεί η μερική αποκόλληση, αλλά και στην κορυφή του όπου έχει πάρει μια καμπυλωτή μορφή. Όσο διαδίδεται η θραύση προς το κέντρο του δοντιού αλλάζει και δημιουργείται μια καμπυλωτή θραύση (σχήματα 6.12 και 6.13, πράσινα βέλη). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η περιστροφική ροπή του υδραυλοκινητήρα γίνεται μέγιστη στα άκρα του δοντιού (όπου σπάει κιάλας) και εκμηδενίζεται όσο πλησιάζει στο νοητό κέντρο του άξονα.



**Σχήμα 6.11** Το κόμπλερ No 3 σε όψη από πάνω.



**Σχήμα 6.12** Το κόμπλερ No2 σε πλάγια αριστερή όψη όπου φαίνεται η μια πλευρά της πλαστικής παραμόρφωσης.



**Σχήμα 6.13** Το κόμπλερ No2 σε πλάγια δεξιά όψη όπου φαίνεται η άλλη πλευρά της πλαστικής παραμόρφωσης.

Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζονται τα κόμπλερ από την κάτω πλευρά τους όπου γίνεται η σύμπλεξη με το valve spool. Τα αστοχούντα κόμπλερ δεν έχουν υποστεί καμία βλάβη από την πίσω πλευρά. Παρατηρείται λίγη επιφανειακή φθορά λόγω σκουριάς η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι εκτέθηκαν στο περιβάλλον απροστάτευτα.



**Σχήμα 6.14** Γενική άποψη της πλευράς σύζευξης του κόμπλερ με το valve spool.

## 6.2 Συμπεράσματα.

Σύμφωνα με την προκαταρκτική εξέταση και την οπτική επιθεώρηση που πραγματοποιήθηκε στα εξαρτήματα που λήφθηκαν για την μελέτη αστοχίας προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

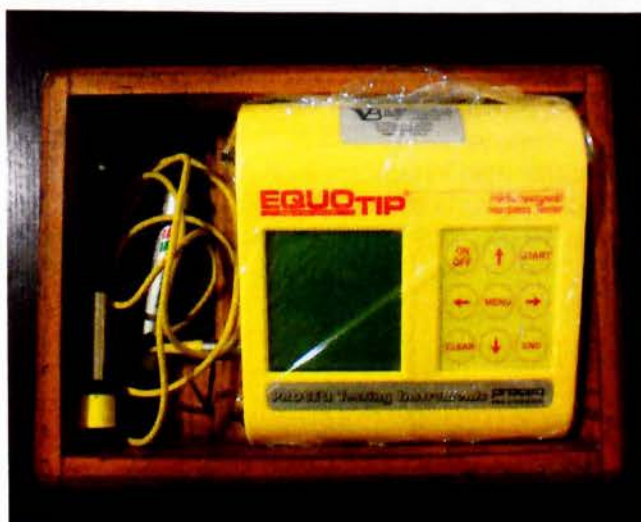
- 1) Ο σχεδιαστής προέβλεψε πολύ μικρή επιφάνεια εμπλοκής (σε σχέση με την μάζα που εμπλέκεται) μεταξύ του κόμπλερ και των valve spool και τον άξονα.
- 2) Το κόμπλερ παρουσιάζει σχεδιαστικό λάθος σχετικά με το ράδιο. Παρατηρείται ελάχιστο έως ανύπαρκτο ράδιο στην περιοχή της σύζευξης, τόσο στα κόμπλερ όσο και στο valve spool και στο άξονα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

### 7.1 Διαδικασία μέτρησης σκληρότητας.

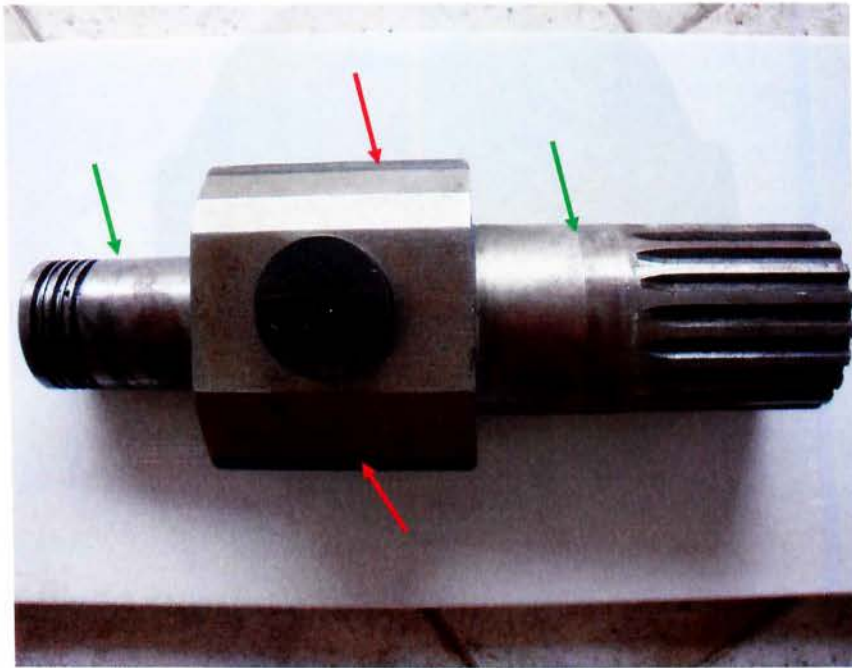
Η σκληρομέτρηση πραγματοποιήθηκε στην εταιρία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM A.E.B.E. Τα εξαρτήματα που σκληρομετρήθηκαν ήταν τα δυο κόμπλερ (oldhams couplng), ο κύριος άξονας και το valve spool.

Αρχικά σκληρομετρήθηκε το valve spool και ο κύριος άξονας με την χρήση του μηχανήματος **EQUO<sub>TIP</sub>** (σχήμα 7.1). Οι σκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τυχαία σημεία και τα αποτελέσματα έδειξαν και στις δυο περιπτώσεις ομοιογενές υλικό. Το valve spool παρουσιάζει κατά μέσο όρο  $20 \div 21$  HRC και ο κύριος άξονας ,κατά μέσο όρο 28 HRC (στις περιοχές που δείχνουν τα πράσινα βέλη). Η βαμμένη επιφάνεια (σχήμα 7.2) στα πλάγια του κυρίου άξονα έχει σκληρότητα  $58 \div 64$  HRC (στις περιοχές που δείχνουν τα κόκκινα βέλη). Αυτή η διαφορά στην σκληρότητα επιδιώκεται. Σε εκείνα τα σημεία ο κύριος άξονας έρχεται σε επαφή με το έκκεντρο το οποίο μεταδίδει κίνηση στα έμβολα και εσωτερικά του οποίου ρυθμίζεται η μετατόπιση (μικρή ή μεγάλη) που θα χρησιμοποιηθεί. Για την ρύθμιση αυτή εισέρχεται με πίεση λάδι ασκώντας μεγάλη πίεση στον κύριο άξονα στις συγκεκριμένες περιοχές (όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 5).



**Σχήμα 7.1** Σκληρόμετρο EQUO<sub>TIP</sub>.





**Σχήμα 7.2** Τα σημεία που διαφοροποιείται η σκληρότητα του κυρίου άξονα. Στα κόκκινα βέλη είναι η βαμμένη περιοχή και στα πράσινα βέλη η κανονική περιοχή.

Πραγματοποιήθηκε λεπτομερέστερη σκληρομέτρηση στα τρία δοκίμια που υπόκεινται σε ανάλυση αστοχίας. Αυτές οι σκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το μηχάνημα ALPHA DUROMATIC, AB R. ALMKVIST ο CO, serial number: 2026, model: 25850. Το σκληρόμετρο ήταν βαθμονομημένο από την εταιρία και ακολουθούσε τις προδιαγραφές ASTM E18-03<sup>E1</sup>. [15]

Τα σημεία των σκληρομετρήσεων παρουσιάζονται στις εικόνες 7.3 και 7.4 για το κόμπλερ No 1, στις εικόνες 7.5 και 7.6 για το κόμπλερ No 2 και στις εικόνες 7.7 και 7.8 για το δοκίμιο No 3. Τα αποτελέσματα δίνονται στους πίνακες 7.1, 7.2 και 7.3 αντίστοιχα.



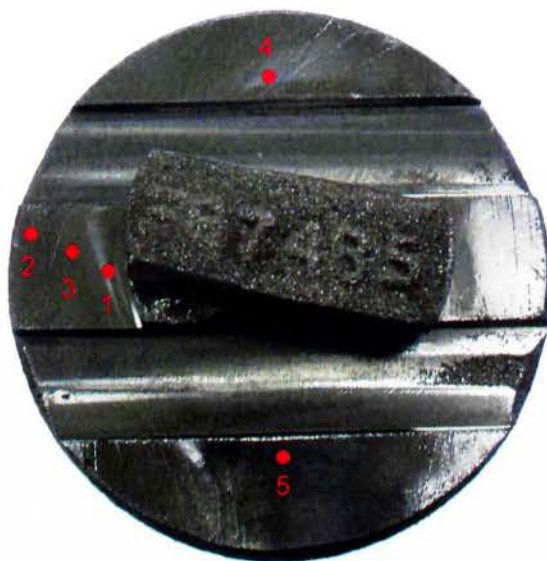
**Σχήμα 7.3** Κόμπλερ Νο 1. Σκληρομετρήσεις από την πίσω πλευρά.



**Σχήμα 7.4** Κόμπλερ Νο1. Σκληρομετρήσεις από την μπροστινή πλευρά.

**Πίνακας 7.1** Οι σκληρομετρήσεις του κόμπλερ Νο2 σε κάθε ένα σημείο.

| Σημεία Μέτρησης  | (1) | (2)  | (3) | (4) | (5)  | (6) |
|------------------|-----|------|-----|-----|------|-----|
| Σκληρότητα (HRC) | 17  | 17,5 | 31  | 31  | 22,5 | 23  |



**Σχήμα 7.5** Κόμπλερ Νο 2. Σκληρομετρήσεις από την μπροστινή πλευρά.



**Σχήμα 7.6** Κόμπλερ Νο 2. Σκληρομετρήσεις από την πίσω πλευρά.

**Πίνακας 7.2** Οι σκληρομετρήσεις του κόμπλερ Νο2 σε κάθε ένα σημείο.

| Σημεία           | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Σκληρότητα (HRC) | 22  | 22  | 23  | 23  | 22  | 22  |



**Σχήμα 7.7** Θραύσμα από κόμπλερ Νο 3. Σκληρομετρήσεις από την πλευρά της τομής.



**Σχήμα 7.8** Θραύσμα από κόμπλερ Νο 3. Σκληρομετρήσεις από την πάνω όψη του σχήματος 7.7.

**Πίνακας 7.3** Οι σκληρομετρήσεις του κόμπλερ Νο3 σε κάθε ένα σημείο.

| Σημεία           | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Σκληρότητα (HRC) | 20  | 20  | 22  | 23  | 19  | 21  |

## 7.2 Συμπεράσματα.

Σύμφωνα με τις σκληρομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο κύριος άξονας και το valve spool έχουν ομοιογενές υλικό αφού η σκληρότητα τους είναι παρόμοια σε όλο το σώμα του εξαρτήματος.
- Το κόμπλερ Νο1 δεν παρουσιάζει ομοιογενή σκληρότητα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το κόμπλερ είναι χυτό. Κατά την κατασκευή τους χυτεύονται πολλά κόμπλερ ταυτόχρονα, το ένα διπλά στο άλλο. Σε αυτή την περίπτωση δεν προλαβαίνει να ψύχεται ταυτόχρονα όλο το σώμα του εξαρτήματος, και παρουσιάζουν διαφορά σκληρότητας. Στην συνέχεια επεξεργάζονται για να πάρουν την τελική μορφή (όπως εμφανίζονται τώρα). Οι υψηλές τιμές σκληρότητας μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το υλικό είναι επιβελτιωμένο.
- Τα κόμπλερ Νο2 και Νο3 έχουν ομοιόμορφη σκληρότητα. Αυτά τα κόμπλερ ακολούθησαν πιο σωστή διαδικασία κατασκευής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι καταστροφικές δοκιμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν περιλαμβάνουν: την δοκιμή μικροσκληρότητας, χημική ανάλυση υλικού, οπτική μικροσκοπική ανάλυση και ηλεκτρονική μικροσκοπική ανάλυση (SEM). Για την διεξαγωγή της μελέτης επιλέχθηκαν δείγματα κατάλληλα για την κάθε διαδικασία.

### 8.1 Επιλογή δειγμάτων

Τα εξαρτήματα κόπηκαν σε περισσότερα τεμάχια. Η κοπή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ. Χρησιμοποιήθηκε κοπτικό (σχήμα 8.1) παραγωγής δειγμάτων της εταιρείας Struers Labotom-3 (Type: 05326146/Serial No: 5321698), μοτέρ μικροτόμου: ABB MOTORS (No: 80709 893/6, Classification: F).



**Σχήμα 8.1** Κοπτικό παραγωγής δειγμάτων Struers Labotom-3.

Πριν γίνει η κοπή των κόμπλερ, πραγματοποιήθηκε τομή στον κύριο άξονα για την αφαίρεση θραύσματος (3<sup>ο</sup> δοκίμιο προς ανάλυση) του κόμπλερ που έχει σπάσει στο εσωτερικό της υποδοχής. Η τομή έγινε στην κόκκινη διακεκομμένη γραμμή όπως απεικονίζεται στο σχήμα 8.2. Το κομμάτι αφαιρέθηκε με προσοχή με την βοήθεια ενός κατσαβιδιού, για να μην προκληθεί καμία αλλοίωση στα θραύσματα που υπήρχαν εσωτερικά στο λούκι.



**Σχήμα 8.2** Το σημείο της τομής του κύριου άξονα.

Η τομή αυτή πραγματοποιήθηκε στην εταιρία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM A.E.B.E. γιατί χρειαζόταν ειδικό μηχάνημα λόγω του μεγέθους του άξονα. Χρησιμοποιήθηκε μηχάνημα KASTO SSB 260 VA (CNC), Serie:112.249, Type number: 6510, Co number: 145.212. Οι ρυθμίσεις κατά την λειτουργία της μηχανής είναι:

- Δόντια ανά inch:  $2^{2/3}/1''$
- Πρόωση: 6,5mm



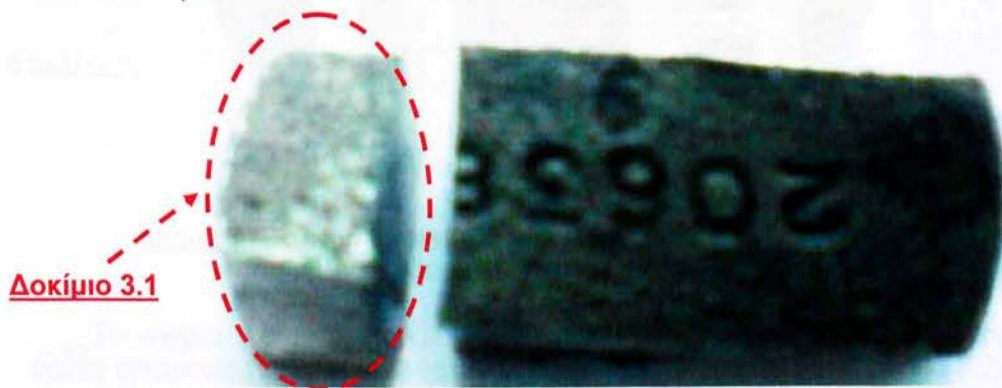
**Σχήμα 8.3** Μηχάνημα Kasto SSB 260 VA (CNC).

Το σχήμα 8.4 παρουσιάζει το θραύσμα του κόμπλερ Νο2 που εξήχθη από τον κύριο άξονα.



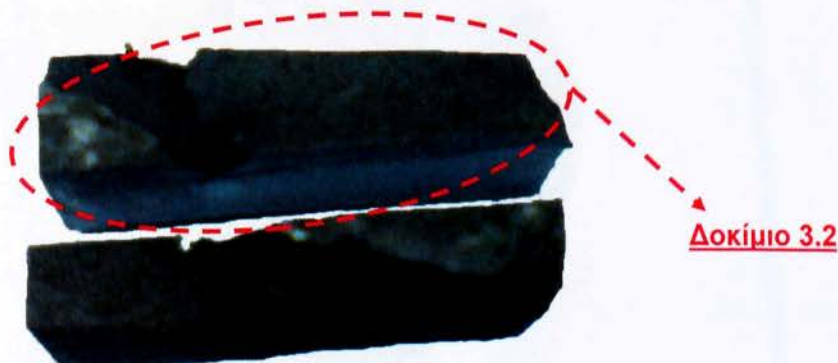
**Σχήμα 8.4** Το θραύσμα του κόμπλερ No3 μετά την εξαγωγή του από τον κύριο άξονα.

Το θραύσμα κόπηκε στα δύο και το ένα κομμάτι, το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 8.5 με διακεκομμένο κύκλο, χρησιμοποιήθηκε για εξέταση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM. Το δοκίμιο αυτό συμβολίζεται με (3.1) για να ξεχωρίζεται από τα άλλα δοκίμια.



**Σχήμα 8.5** Τεμαχισμός του θραύσματος του κόμπλερ No3. Επιλογή (3.1) δοκιμίου.

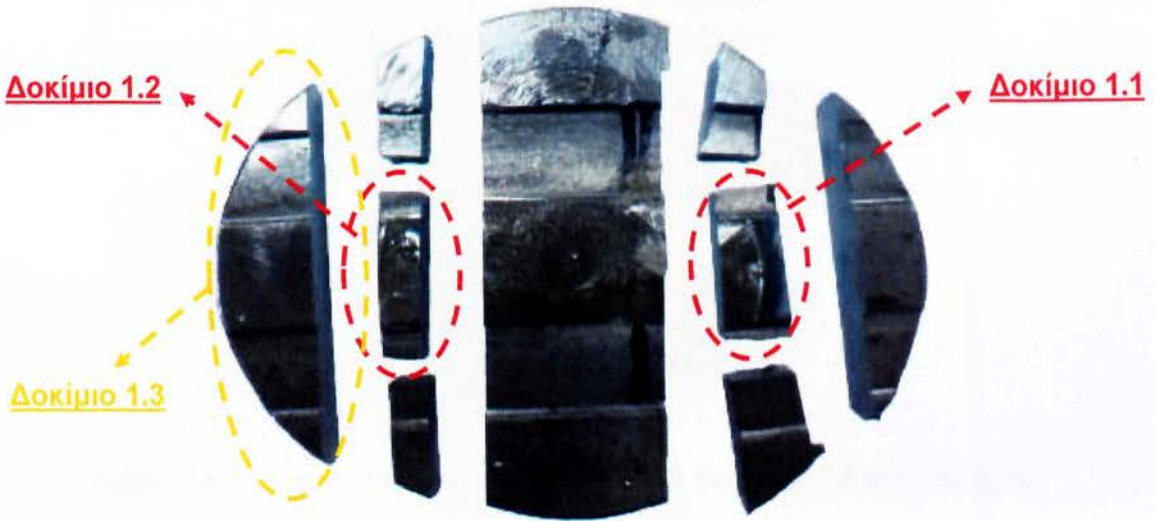
Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια παράλληλη τομή κατά μήκος του δοντιού. Το ένα κομμάτι προορίζεται για μεταλλογραφική εξέταση και θα υποστεί εγκιβωτισμό. Το δοκίμιο αυτό συμβολίζεται με (3.2) (διακεκομμένο κύκλο στο σχήμα 8.6).



**Σχήμα 8.6** Τεμαχισμός του θραύσματος του κόμπλερ No3. Επιλογή 3.2 δοκιμίου.

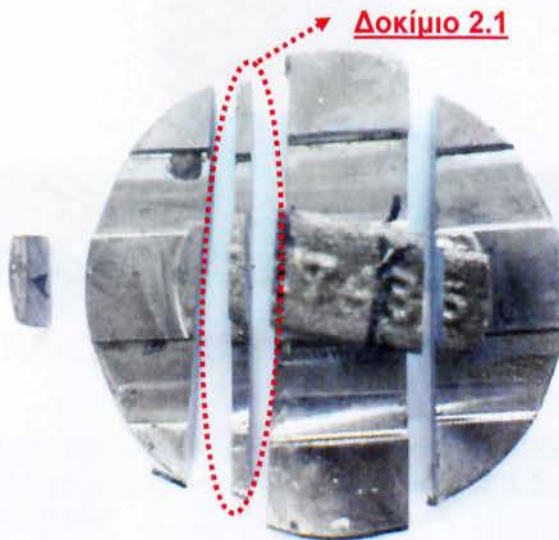


Το κόμπλερ Νο1 τεμαχίστηκε αρχικά σε πέντε μέρη (σχήμα 8.7). Δυο τεμάχια κόπηκαν στην συνέχεια σε τρία μέρη το καθένα και επιλέχτηκαν τα δοκίμια για την περαιτέρω μελέτη. Το δοκίμιο 1.1 χρησιμοποιήθηκε για μικροσκοπικό έλεγχο σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM, το δοκίμιο 1.2 χρησιμοποιήθηκε για εγκιβωτισμό και μελέτη με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο και το δοκίμιο 1.3 χρησιμοποιήθηκε στην χημική ανάλυση του κόμπλερ Νο1.

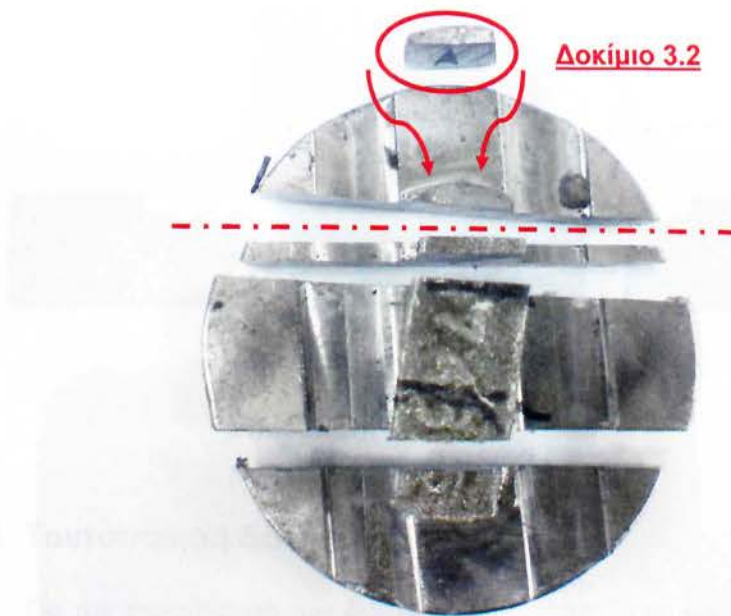


**Σχήμα 8.7** Το κόμπλερ Νο1. Τα δοκίμια που πάρθηκαν μετά τις τομές για να υποβληθούν σε διάφορες κατεργασίες – έρευνες.

Το σχήμα 8.8 παρουσιάζει τον τεμαχισμό του κόμπλερ Νο2. Στην αρχή έγιναν εγκάρσιες τομές και πάρθηκαν 5 τεμάχια (όπως φαίνεται στο σχήμα 8.8). Το ένα τεμάχιο χρησιμοποιήθηκε για την θραυστογραφική μελέτη με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (δοκίμιο 2.2 στο σχήμα 8.9). Ένα δεύτερο κομμάτι επιλέχτηκε για την κατασκευή περαιτέρω δοκιμίων (δοκίμιο 2.1 στο σχήμα 8.8).

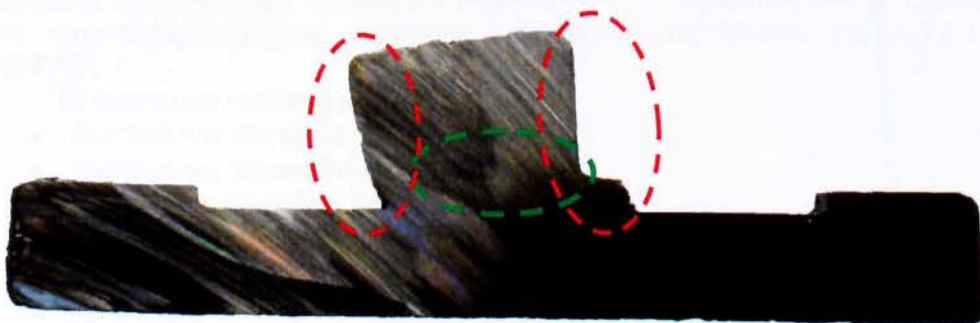


**Σχήμα 8.8** Τεμαχισμός του κόμπλερ Νο2.



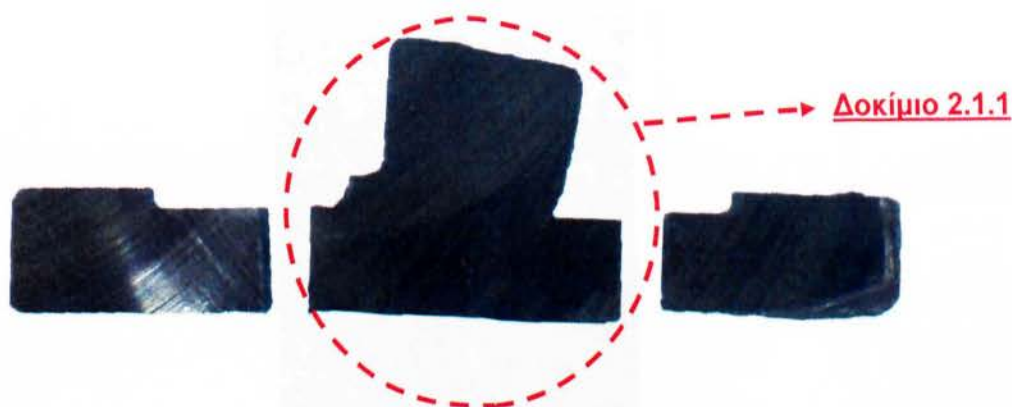
**Σχήμα 8.9** Το σημείο από το οποίο αποκολλήθηκε το δοκίμιο 2.2 κατά την τομή.

Παρατηρώντας τώρα το δοκίμιο 2.1 (σχήμα 8.10) που πάρθηκε κατά την εγκάρσια τομή του κόμπλερ Νο 2, με το κόκκινο χρώμα είναι φανερή η στρέψη που έχει δεχτεί το δόντι του κόμπλερ (σχήμα 8.8). Πιο συγκεκριμένα στην δεξιά πλευρά το δόντι έχει υποστεί και μετατόπιση προς τα αριστερά. Με το πράσινο χρώμα υποδεικνύεται θολά μια ρωγμή. Αυτή η ρωγμή φανερώνει την αρχή της θραύσης του δοντιού. Το δοκίμιο 2.1 έπειτα δόθηκε για την πραγματοποίηση χημικής ανάλυσης του κόμπλερ Νο 2.



**Σχήμα 8.10** Οπτική επιθεώρηση του δοκιμίου 2.1.

Μετά την χημική ανάλυση το κομμάτι κόπηκε σε τρία μέρη όπως φαίνεται στο σχήμα 8.11. Επιλέχθηκε το δοκίμιο με ονομασία 2.1.1 για εγκιβωτισμό και μεταλλογραφική ανάλυση.



**Σχήμα 8.11** Τεμαχισμός του δοκιμίου 2.1.

## 8.2 Ταυτοποίηση δειγμάτων

Για την ταυτοποίηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε και αναγράφηκε ένας αριθμητικός κωδικός που ήδη εφαρμόστηκε για την απεικόνιση τους (π.χ. 1, 1.1, 2.1.1 κτλ.), και αποτελείται από έναν αριθμό και η ακολουθία των τομών συμβολίζεται με μια τελεία (.) και στην συνέχεια ο αριθμός της τομής που είναι.

## 8.3 Προετοιμασία δοκιμίων για μεταλλογραφική ανάλυση.

### Εγκιβωτισμός, λείανση και στίλβωση δοκιμίων

Για τον εγκιβωτισμό των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εγκιβωτισμού (σχήμα 8.12) CitoPress 1, Category Number: 05776127, Serial Number: 5770313, του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ.

Τα συστατικά εγκιβωτισμού ήταν:

- Durofast της Struers (Σκληρό)
- Multifast της Struers (Μαλακό)
- Αντικολλητική πούδρα Antistick της Struers

Οι ρυθμίσεις λειτουργίας του μηχανήματος ήταν:

- Θερμοκρασία: 180 °C
- Πίεση: 250 bar
- Συνολικός χρόνος: 5 min από τα οποία 3 min διήρκεσε η διαδικασία heating και 2 min η διαδικασία cooling.

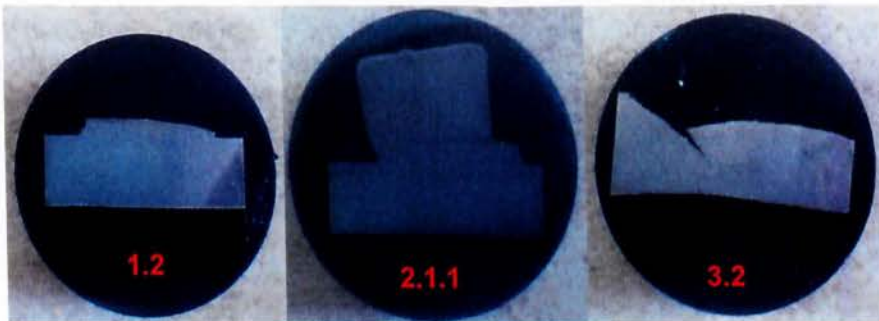


**Σχήμα 8.12** Η μηχανή εγκιβωτισμού CitoPress 1.

Συγκεντρωτικά τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για εγκιβωτισμό ήταν:

- Δοκίμιο 1.2 (από το κόμπλερ No 1)
- Δοκίμιο 2.1.1 (από το κόμπλερ No 2)
- Δοκίμιο 3.2 (από το κόμπλερ No 3)

Μετά τον εγκιβωτισμό τα δοκίμια έχουν την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 8.13.



**Σχήμα 8.13** Τα δοκίμια μετά τον εγκιβωτισμό.

Στην συνέχεια τα δοκίμια υφίστανται λείανση και στίλβωση στην μηχανή Struers (Type: 05326146, Serial Number: 5321698) του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ. Χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά της εταιρίας Struers από P80 μέχρι P1200.

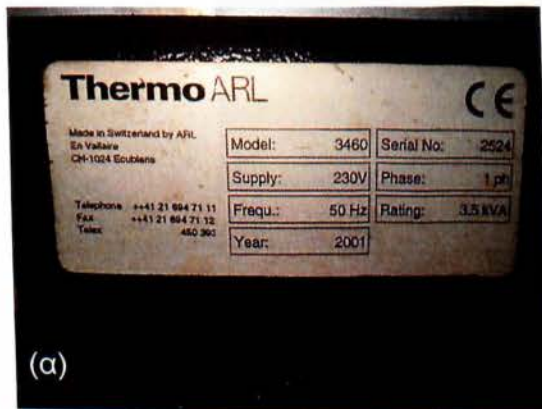
Για την στίλβωση χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά:

- Αιώρημα διαμαντιού Presi, μέγεθος κόκκου 6μm
- Διαμανταλοιφή DP-Paste, μέγεθος κόκκου 3μm
- Διαμανταλοιφή DP-Paste, μέγεθος κόκκου 1μm
- Αιώρημα διαμαντιού Presi, μέγεθος κόκκου 0,25μm
- Λιπαντικό DP-Lubricant Blue, Struers
- Απιονισμένο νερό
- Μεθανόλη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

### 9.1 Διαδικασία χημικής ανάλυσης δοκιμίων

Η χημική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της φασματοσκοπίας οπτικής εκπομπής στην εταιρεία ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. Για τον έλεγχο του υλικού χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος τύπου OE Spectrometer Thermo ARL model: 3460, serial No: 2524.(σχήμα 9.1)



**Σχήμα 9.1** (α): πλακέτα στοιχείων, (β): φασματογράφος.

Η διαδικασία απαιτεί το γυάλισμα και καθαρισμό της επιφάνειας για την αφαίρεση εξωτερικά εναποτεθειμένων σωματιδίων. (Σχήμα 9.2)



**Σχήμα 9.2** Προετοιμασία της επιφάνειας με την αφαίρεση εξωτερικά εναποτεθειμένων σωματιδίων.

Στη συνέχεια τοποθετείται το δοκίμιο στο φασματογράφο (σχήμα 9.3) και η χημική του ανάλυση εμφανίζεται σε οθόνη υπολογιστή και αν είναι επιθυμητό εκτυπώνεται.



**Σχήμα 9.3** Τοποθέτηση εξαρτήματος στο φασματογράφο για χημική ανάλυση.

Στον πίνακα 9.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του κόμπλερ No1 συγκριτικά με την τυπική σύσταση κατά Stahlschlusssel [16] και του prospectus της Metal Ravne [17]. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το κομπλερ No 1 είναι κατασκευασμένο από έναν τυπικό χάλυβα Ck 60 κατά DIN (1060 κατά AISI ή 1.1221 κατά W.Nr).

**Πίνακας 9.1** Χημική ανάλυση του κόμπλερ No1.

|                                   | Στοιχείο [%] |          |          |         |      |           |       |
|-----------------------------------|--------------|----------|----------|---------|------|-----------|-------|
|                                   | C            | Si       | Mn       | Cr      | Cu   | Mo        | Ni    |
| <b>ΧΑΛΥΒΟΥΡΚΙΚΗ<br/>Α.Ε.</b>      | 0,56         | 0,26     | 0,74     | 0,18    | 0,12 | 0,025     | 0,076 |
| <b>Stahlschlusssel</b>            | 0,38-0,43    | 0,1-0,35 | 0,75-1,0 | 0,8-1,0 | ---- | 0,15-0,25 | ----  |
| <b>Prospectus<br/>Metal Ravne</b> | 0,61         | <0,40    | 0,75     | <0,40   | ---- | <0,10     | <0,40 |

Στον πίνακα 9.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του κόμπλερ No2 συγκριτικά με την χημική σύσταση κατά Stahlschlusssel και του prospectus της Bohler Uddeholm Australia [18]. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το κομπλερ No 2 είναι κατασκευασμένο από έναν τυπικό επιβελτιωμένο χάλυβα 41CrMo4 κατά DIN (4140 κατά AISI ή 1,7225 κατά W.Nr).

**Πίνακας 9.2** Χημική ανάλυση του κόμπλερ Νο2.

|   | Στοιχείο [%] |      |         |         |        |          |        |
|---|--------------|------|---------|---------|--------|----------|--------|
|   | C            | Si   | Mn      | Cr      | S      | Mo       | P      |
| <b>ΧΑΛΥΒΟΥΡΚΙΚΗ<br/>Α.Ε.</b>                        | 0,42         | 0,25 | 0,79    | 1,04    | 0,03   | 0,18     | 0,019  |
| <b>Stahlschlüssel</b>                               | 0,38-0,45    | ≤0,4 | 0,6-0,9 | 0,9-1,2 | ≤0,035 | 0,15-0,3 | ≤0,035 |
| <b>Prospectus<br/>Bohler Uddeholm<br/>Australia</b> | 0,4          | 0,2  | 0,8     | 1,0     | ---    | 0,2      | ---    |

Στον πίνακα 9.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του θραύσματος από το κόμπλερ Νο3. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το κόμπλερ Νο 3 είναι κατασκευασμένο από έναν χυτοσίδηρο. Η χημική ανάλυση είναι ενδεικτική με τις παρούσες συνθήκες μέτρησης και η ταυτοποίηση του δεν είναι δυνατή λόγω μη διαθεσιμότητας κατάλληλης μεθοδολογίας.

**Πίνακας 9.3** Πραγματική χημική ανάλυση του θραύσματος του κόμπλερ Νο3.

|                              | Στοιχείο [%] |      |       |       |       |      |       |       |       |
|------------------------------|--------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|                              | C            | Si   | Mn    | P     | Cr    | Cu   | Mo    | S     | Ni    |
| <b>ΧΑΛΥΒΟΥΡΚΙΚΗ<br/>Α.Ε.</b> | >5,16        | 2,25 | 0,198 | 0,019 | 0,025 | 0,64 | 0,025 | 0,018 | 0,031 |

## 9.2 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια, μπορούν να βγουν τα συμπεράσματα ότι:

- Το κόμπλερ Νο1 είναι ένας τυπικός χάλυβας CK-60 κατά DIN.
- Το κόμπλερ Νο2 είναι ένας τυπικός επιβελτιωμένος χάλυβας 41CrMo4 κατά DIN.
- Και το κόμπλερ Νο3 είναι χυτοσίδηρος της οποίας ταυτοποίηση δεν ήταν δυνατή να πραγματοποιηθεί με την μέθοδο χημικής ανάλυσης που είχαμε στην διάθεση μας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 PROSPECTUS ΧΑΛΥΒΩΝ

### 10.1 Prospectus χάλυβα 41CrMo4 [18]

**BOHLER UDDEHOLM**  
**Australia**

*"High Performance Metals"*

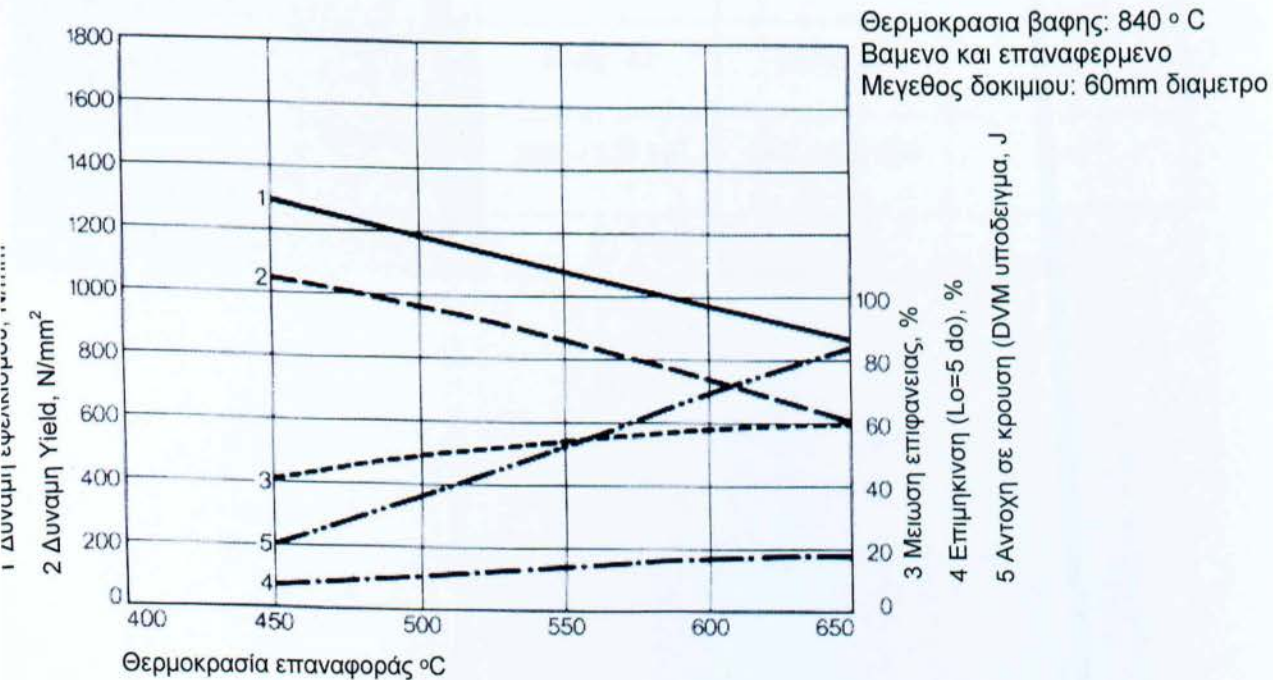
|                        |      |     |                  |      |                     |     |       |       |
|------------------------|------|-----|------------------|------|---------------------|-----|-------|-------|
| ΤΥΠΙΚΗ<br>ΑΝΑΛΥΣΗ (%)  | C    | Si  | Mn               | Ni   | Cr                  | Mo  | S     | P     |
|                        | 0,4  | 0,2 | 0,8              | ---- | 1                   | 0,2 | 0,025 | 0,025 |
| ΔΙΕΘΝΗ<br>ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ | AS   |     | DIN              |      | BS                  |     | AISI  |       |
|                        | 4140 |     | 17225<br>41CrMo4 |      | ~En19A<br>~708 M 40 |     | 4140  |       |

|           |  |
|-----------|--|
| ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ | <p>Ο χρωμιομολυβδαινιούχος χάλυβας χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή εφελκυστική αντοχή και σκληρότητα, ιδίως σε μεσαίες και μεγάλες διατομές με βαμμένες και επαναφερμένες επιφάνειες. Οι προσθήκες μολυβδαινιού προστατεύουν τον χάλυβα από το να είναι ευπαθής στην ευθραυστότητα μετά την επαναφορά.</p> |
|-----------|--|

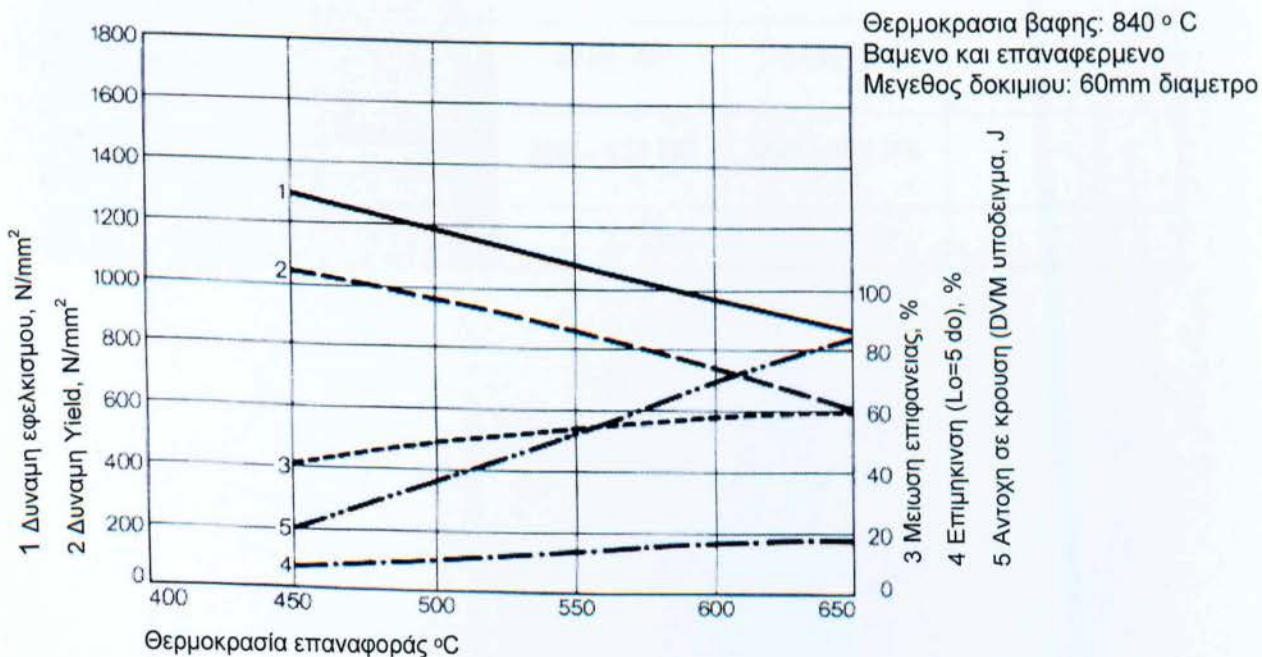
|           |   |
|-----------|---|
| ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ | <p>Ο χάλυβας 4140 είναι ο πιο διαδεδομένος χάλυβας από τους χάλυβες με υψηλή εφελκυστική αντοχή με ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία, κατασκευές μηχανών και μηχανημάτων, στροφαλοφόρους άξονες, φορείς τροχών, κόμπλερ, ατράκτους, ενδιάμεσες μηχανές, αντλίες και κιβώτια ταχυτήτων, παξιμάδια και περικόχλια.</p> |
|-----------|---|



|                                 |                    |   |
|---------------------------------|--------------------|---|
| <b>ΘΕΡΜΙΚΕΣ<br/>ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ</b> | ΣΦΥΡΙΛΑΤΙΣΗ        | 850°-1050°C. Ψύξη σε κλίβανο.   |
|                                 | ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ         | 840°-880°C. Ψύξη στο αέρα.  |
|                                 | ΑΝΟΠΤΗΣΗ           | 680°-720°C. Αργή ψύξη σε ελεγχόμενο κλίβανο.  |
|                                 | ΑΠΟΤΑΤΙΚΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ | Σε βαμμένη και επαναφερμένη κατάσταση, περίπου 30°-50°C κάτω από την θερμοκρασία επαναφοράς. Ψύξη στον αέρα. Σε ανοπτημένη κατάσταση, 600°-650°C. Ψύξη στον αέρα. |
|                                 | ΒΑΦΗ               | 830°-860°C. Απόψυξη σε λάδι.  |
|                                 | ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ          | 540°-680°C για 1 ώρα τουλάχιστον, απόψυξη στον αέρα, (βλέπε διάγραμμα επαναφοράς, σχήμα 10.1)   |
|                                 | ΕΝΑΖΩΤΩΣΗ          | Κατάλληλο για εναζώτωση (σε αέριο ή υγρό περιβάλλον).   |



|                                 |                    |   |
|---------------------------------|--------------------|---|
| <b>ΘΕΡΜΙΚΕΣ<br/>ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ</b> | ΣΦΥΡΙΛΑΤΙΣΗ        | 850°-1050°C. Ψύξη σε κλίβανο.   |
|                                 | ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ         | 840°-880°C. Ψύξη στο αέρα.  |
|                                 | ΑΝΟΠΤΗΣΗ           | 680°-720°C. Αργή ψύξη σε ελεγχόμενο κλίβανο.  |
|                                 | ΑΠΟΤΑΤΙΚΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ | Σε βαμμένη και επαναφερμένη κατάσταση, περίπου 30°-50°C κάτω από την θερμοκρασία επαναφοράς. Ψύξη στον αέρα. Σε ανοπτημένη κατάσταση, 600°-650°C. Ψύξη στον αέρα. |
|                                 | ΒΑΦΗ               | 830°-860°C. Απόψυξη σε λάδι.  |
|                                 | ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ          | 540°-680°C για 1 ώρα τουλάχιστον, απόψυξη στον αέρα, (βλέπε διάγραμμα επαναφοράς, σχήμα 10.1)   |
|                                 | ΕΝΑΖΩΤΩΣΗ          | Κατάλληλο για εναζώτωση (σε αέριο ή υγρό περιβάλλον).   |



| ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ<br>ΥΨΗΛΕΣ<br>ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ | Για βαμμένα και επαναφερμένα μεγάλων δοκιμίων |       |                       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|---|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | Διάμετρος                                     |       | Δύναμη εφελκυσμού MPa |       |       |       |       |       |       |
|                                     | Πάνω από                                      | Μέχρι | 20°C                  | 100°C | 200°C | 250°C | 300°C | 350°C | 400°C |
|                                     |   | 250   | 510                   | 486   | 461   | 441   | 422   | 392   | 363   |
|                                     | 250   | 500   | 460                   | 431   | 412   | 402   | 382   | 353   | 324   |
| 500                                 | 750   | 390   | 333                   | 333   | 324   | 304   | 275   | 245   |       |

|                      |   |       |       |       |       |       |
|----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| ΦΥΣΙΚΕΣ<br>ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ | Πυκνότητα<br>(kg/dm <sup>3</sup> )                          | 7,85  |       |       |       |       |
|                      | Μέτρο<br>ελαστικότητας<br>10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> | 210   |       |       |       |       |
|                      | Θερμική<br>αγωγιμότητα<br>W/(m.K)                           | 42    |       |       |       |       |
|                      | Ηλεκτρική<br>ειδική<br>αντίσταση<br>Ohm.mm <sup>2</sup> /m  | 0,19  |       |       |       |       |
|                      | Ειδική<br>θερμική<br>ικανότητα<br>J/(kg.K)                  | 460   |       |       |       |       |
|                      | Μέτρο<br>ελαστικότητας<br>10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> | 100°C | 200°C | 300°C | 400°C | 500°C |
|                      |   | 205   | 195   | 185   | 175   | 165   |
|                      | Θερμική<br>διαστολή<br>10 <sup>6</sup> m/(m.K)              | 100°C | 200°C | 300°C | 400°C | 500°C |
|                      |   | 11,1  | 12,1  | 12,9  | 13,5  | 13,9  |

## 10.2 Prospectus χάλυβα CK 60 [17]



### Ταυτοποίηση

| Καθορισμός από πρότυπα |           |          |      |    |      |
|------------------------|-----------|----------|------|----|------|
| Όνομασία Ravne         | Ravne No. | Mat. No. | DIN  | EN | AISI |
| CK60                   | 622       | 1.1221   | CK60 | -- | 1060 |

### Χημική σύσταση

| Χημική σύσταση κ.β. % |              |      |              |              |              |    |    |                           |
|-----------------------|--------------|------|--------------|--------------|--------------|----|----|---------------------------|
| C                     | Si           | Mn   | Cr           | Mo           | Ni           | V  | W  | Άλλα                      |
| 0,61                  | Μεγ.<br>0,40 | 0,75 | Μεγ.<br>0,40 | Μεγ.<br>0,10 | Μεγ.<br>0,40 | -- | -- | (Cr+Mo+Ni) =<br>μεγ. 0,63 |

### Γενικές πληροφορίες

#### Περιγραφή

Ο χάλυβας CK60 είναι ένας από τους χάλυβες με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άνθρακα (0,60%). Είναι πιο δύσκολος στην παράγωγη του από ότι οι άλλοι χάλυβες με λιγότερο άνθρακα.

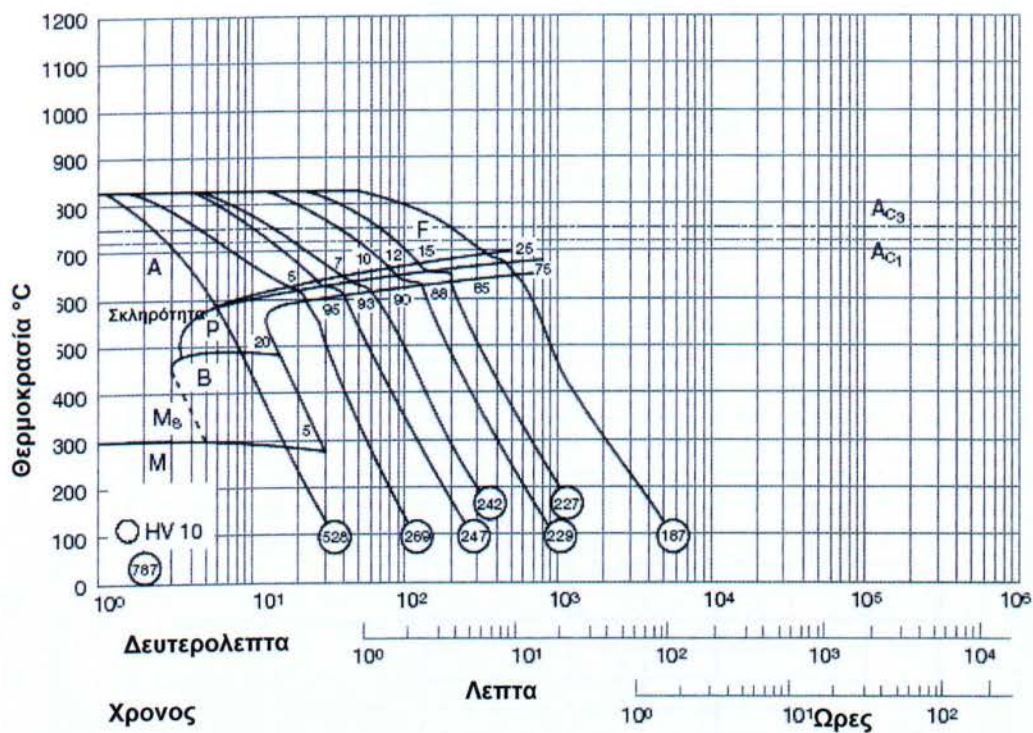
#### Εφαρμογές

Άξονες, μπουσες, κόμπλερ, μηχανολογικά εξαρτήματα, γεωργικά εργαλεία, μεγάλα σφουρήλατα, ελατήρια, ελάσματα ψυχρής έλασης.

### Ιδιότητες

Φυσικές ιδιότητες σε μέσες θερμοκρασίες:  
 Μέτρο ελασικότητας [ $10^3 \times \text{N/mm}^2$ ]: 210  
 Πυκνότητα [ $\text{g/cm}^3$ ]: 7,85

### Διάγραμμα συνεχούς απόψυξης θερμοκρασίας (CCT)



### Θερμική κατεργασία

#### Ανόπτηση για μαλακτοποίηση

Θέρμανση στους 650°-700°C , και ψύξη αργή στον κλίβανο. Αυτή η μέθοδος θα αποδώσει μέγιστη σκληρότητα κατά Brinell 241 HB.

#### Εξομάλυνση

Θερμοκρασία εξομάλυνσης : 820°-850°C.

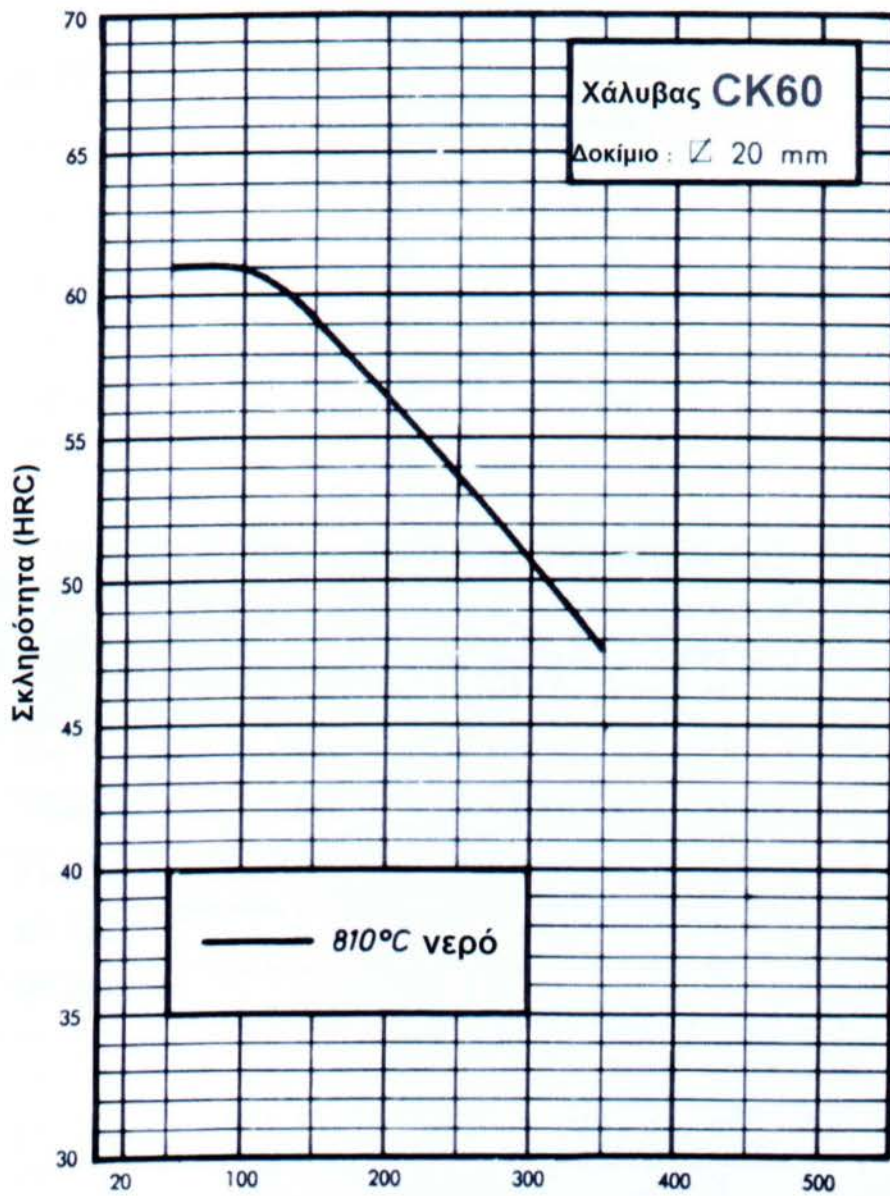
#### Βαφή

Σκλήρυνση από θερμοκρασία 800°-830°C, 810°-840°C ακολουθούμενη από απόψυξη σε νερό ή λάδι.

#### Επαναφορά

Θερμοκρασία επαναφοράς: 540°-680°C.

Διάγραμμα επίδρασης θερμοκρασίας επαναφοράς στην σκληρότητα



**Θερμοκρασία (°C), 1 ώρα**

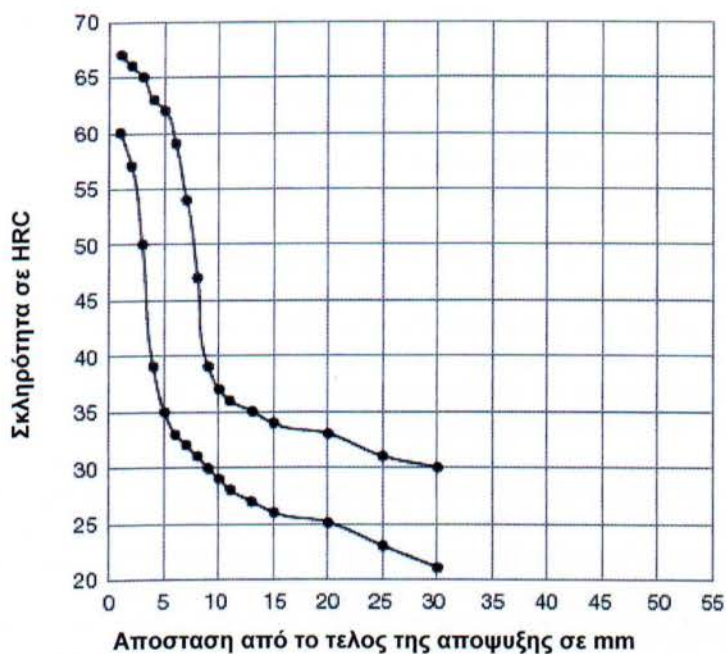
**Μηχανικές ιδιότητες μετά από εξομάλυνση δομής**

| Διάμετρος (mm) | 0,2% δύναμη proof (N/mm <sup>2</sup> ) | Δύναμη εφελκυσμού (N/mm <sup>2</sup> ) | Επιμήκυνση (%) |
|----------------|--|--|----------------|
| έως 16         | 380                                    | 710                                    | 10             |
| 17-40          | 340                                    | 670                                    | 11             |
| 41-100         | 340                                    | 670                                    | 11             |
| 101-160        | 310                                    | 650                                    | 11             |
| 161-250        | 310                                    | 650                                    | 11             |

**Μηχανικές ιδιότητες σε βαμμένη και επαναφερμένη κατάσταση**

| Διάμετρος (mm) | 0,2% δύναμη proof (N/mm <sup>2</sup> ) | Δύναμη εφελκυσμού (N/mm <sup>2</sup> ) | Επιμήκυνση (%) | Μείωση (%) |
|----------------|--|--|----------------|------------|
| έως 16         | 580                                    | 850-1000                               | 11             | 25         |
| 17-40          | 520                                    | 800-950                                | 13             | 30         |
| 41-100         | 450                                    | 750-900                                | 14             | 35         |
| 101-160        | --                                     | --                                     | --             | --         |
| 161-250        | --                                     | --                                     | --             | --         |

### Διάγραμμα εμβαπτότητας



### Κατεργασιμότητα

#### Σφαιρηλάτηση

Θερμή διαμόρφωση σε: 1100°-850°C.

#### Κατεργασιμότητα

Η κατεργασιμότητα του χάλυβα ck 60 και όλων των χαλύβων με υψηλότερο ποσοστό σε άνθρακα είναι σχετικά φτωχή. Ο ck60 είναι 55-60% του χάλυβα AISI 1112, ο οποίος είναι 100% κατεργάσιμος.

### Άλλες πληροφορίες

**Αντίσταση στην διάβρωση:** αυτός ο χάλυβας δεν είναι αντιδιαβρωτικός. Διαβρώνεται αν δεν προστατευτεί.

**Συγκόλληση:** ο χάλυβας ck60 συγκολλείται με όλους τους τρόπους συγκόλλησης. Σε αντίθεση με το υψηλό ποσοστό του σε άνθρακα, είναι σημαντικό να προθερμαίνεται στους 150° έως 260°C και να αναθερμαίνεται στους 590°-650°C ανά διαδικασία συγκόλλησης.

**Κατεργασία εν ψυχρώ:** κατεργασία εν ψυχρώ είναι δύσκολη ακόμα και σε κατάσταση annealed αν και μπορεί να γίνει και με συμβατικές μεθόδους αλλά απαιτεί μεγαλύτερη δύναμη από ότι σε χάλυβες με μικρότερο ποσοστό σε άνθρακα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

### 11.1 Διαδικασία μικροσκληρομέτρησης

Η δοκιμή μικροσκληρομέτρησης πραγματοποιήθηκε βάση προδιαγραφών ASTM στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ [19]. Χρησιμοποιήθηκε μικροσκληρόμετρο Shimadzu (S/N: 341-64278), με πρότυπο βάρος 200gr και τα αποτυπώματα μετρήθηκαν σε συνολική μεγέθυνση Mx400.

Το δοκίμιο τοποθετήθηκε στην βάση για τα βάρη του μικροσκληρομέτρου. Επιλέχθηκε πρότυπο βάρος 200gr στον διεισδυτή του οργάνου, για το οποίο ελέγχθηκε και εξακριβώθηκε η διαφορά της ρύθμισης της θέσης που δίνεται από τον χειριστή με την θέση που ενεργεί ο διεισδυτής. Με αυτή την διαδικασία επιτυγχάνονται ελεγχόμενες μικροσκληρομετρήσεις σε προεπιλεγμένα σημεία.

Για την διαδικασία μικροσκληρομέτρησης χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο:

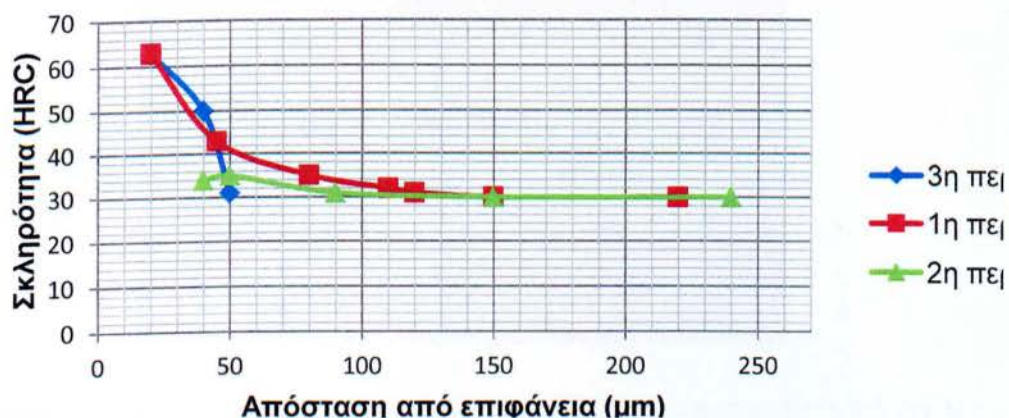
- i. Δοκίμιο 1.2 (από το κόμπλερ Νο 1)

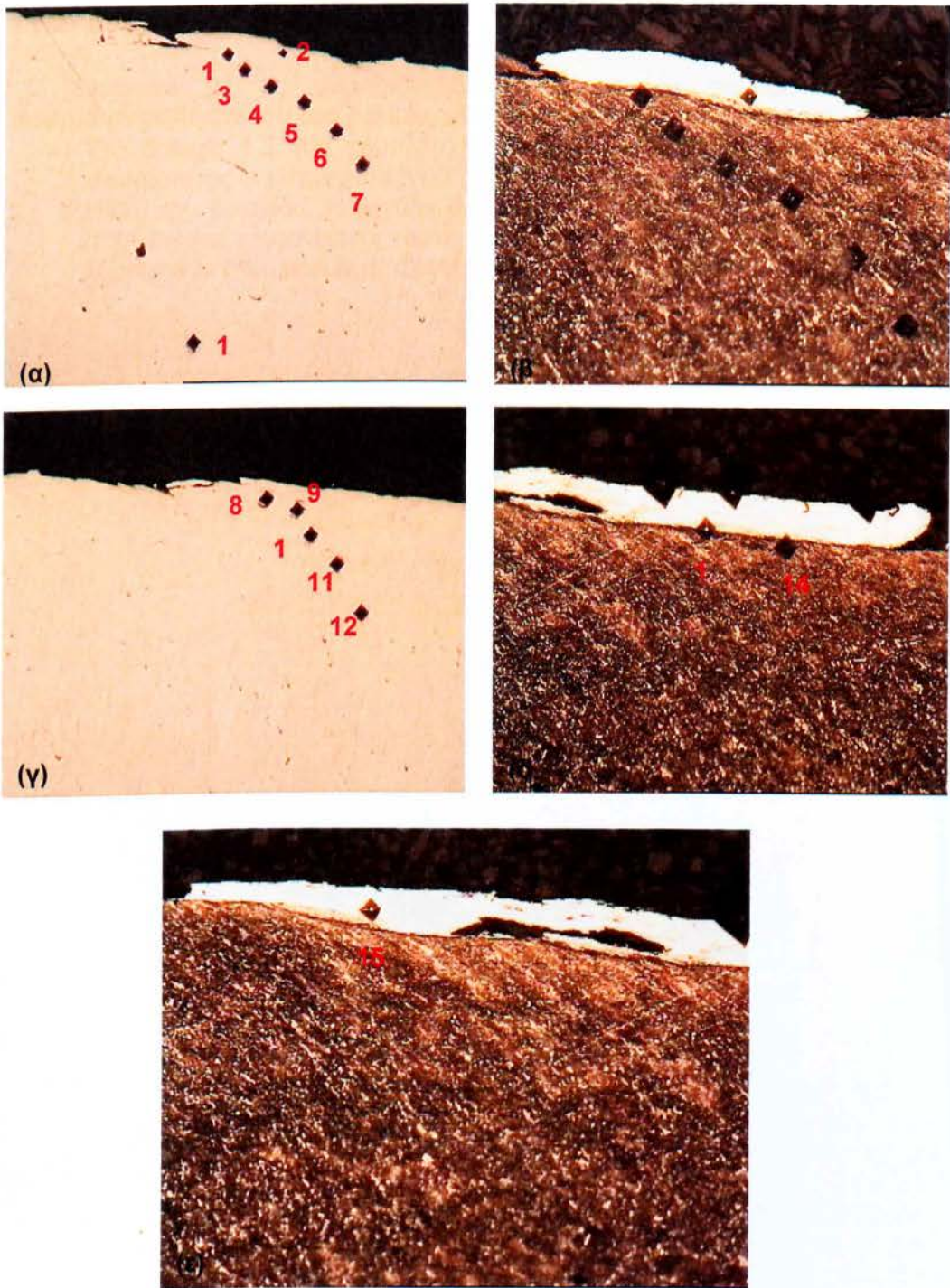
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μικροσκληρομετρήσεις του δοκιμίου με τη βοήθεια του πίνακα 11.1 και αντίστοιχα ακολουθούν οι φωτογραφίες που παρήχθησαν όπου υποδεικνύονται τα σημεία που έγιναν οι μικροσκληρομετρήσεις (σχήμα 11.1), όπως και το γράφημα που παρουσιάζει πως κυμαίνεται η σκληρότητα όσο προχωράνε οι μικροσκληρομετρήσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου στο εσωτερικό του.

**Πίνακας 11.1** Μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 1.2.

| Σημείο μέτρησης | Απόσταση από επιφάνεια (μm) | Σκληρότητα ( $MV_{0.2}$ ) | Σκληρότητα (HRC) |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| (1)             | 45                          | 420,5                     | 43               |
| (2)             | 20                          | 766,3                     | 63               |
| (3)             | 80                          | 345                       | 35               |
| (4)             | 110                         | 321                       | 32               |
| (5)             | 120                         | 313,4                     | 31               |
| (6)             | 150                         | 304,5                     | 30               |
| (7)             | 220                         | 301                       | 30               |
| (8)             | 40                          | 335,5                     | 34               |
| (9)             | 50                          | 342,6                     | 35               |
| (10)            | 90                          | 311,6                     | 31               |
| (11)            | 150                         | 304,5                     | 30               |
| (12)            | 240                         | 302,8                     | 30               |
| (13)            | 50                          | 311,6                     | 31               |
| (14)            | 40                          | 508,8                     | 50               |
| (15)            | 20                          | 773,3                     | 63               |
| (16)            | τυχαίο σημείο               | 272,4                     | 26               |

**Γράφημα διακύμανσης σκληρότητας**





**Σχήμα 11.1** Μικροσκληρομετρήσεις του δοκιμίου 1.2 από το κόμπλερ Νο 2. (α), (γ): M x 100, όπως φαίνονται οι σκληρομετρήσεις στο μικροσκληρόμετρο (β), (δ), (ε): M x 200, όπως φαίνονται οι σκληρομετρήσεις στο οπτικό μικροσκόπιο.

## 11.2 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις μικροσκληρομετρήσεις και τα σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκαν στα δυο δοκίμια, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι:

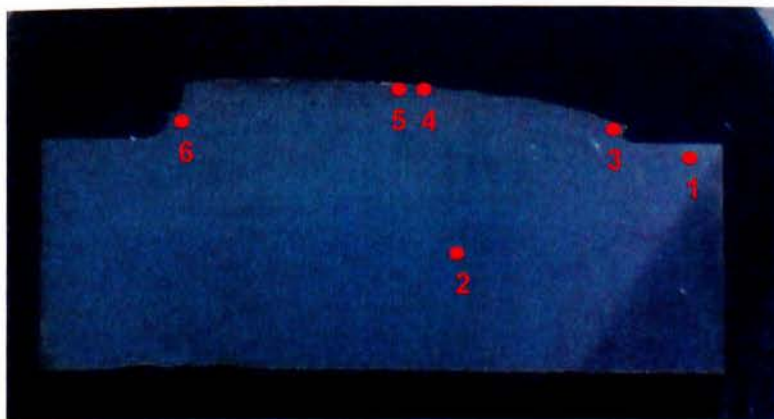
- Στο δοκίμιο 1.2 του κόμπλερ Νο 1, είναι εμφανής η διακύμανση της σκληρότητας από την επιφάνεια (έως 63 HRC) προς το εσωτερικό (έως 26 HRC) του δοκιμίου. Η μεγάλη διαφορά σκληρότητας μπορεί να οφείλεται στις μεγάλες επιφανειακές τάσεις οι οποίες προκάλεσαν την συμπίεση των εξωτερικών στρωμάτων με αποτέλεσμα την εργοσκλήρυνση τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

### 12.1 Οπτική μικροσκοπία

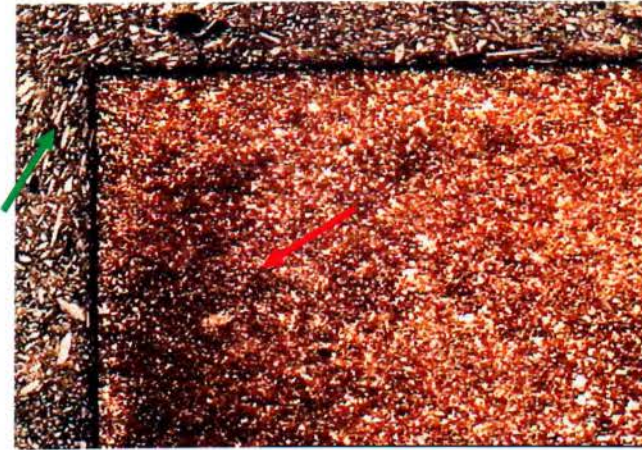
Για την εξέταση χρησιμοποιήθηκε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων φακών Metalvert της Leica και πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ποιοτικός Έλεγχος και Τεχνολογία Υλικών του Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια 1.2, 2.1.1, 3.2. Τα δοκίμια υπέστησαν κατάλληλη προετοιμασία (λείανση και στίλβωση όπως Κεφάλαιο 8.3) και χημική προσβολή με ήπιο οξύ Nital 5% (μίγμα μεθανόλης  $\text{CH}_3\text{OH}$  και 3% νιτρικού οξέος  $\text{HNO}_3$ ). Η χημική προσβολή πραγματοποιήθηκε με τμηματική βύθιση στο Nital για να αποφευχθεί οποιαδήποτε βλάβη στην επιφάνειά τους.

Αρχικά εξετάστηκε το Δοκίμιο 1.2 (από το κόμπλερ Νο 1) και οι φωτογραφίες πάρθηκαν από τα αριστερά προς τα δεξιά όπως βλέπουμε το εγκιβωτισμένο δοκίμιο. Το σημείο που αντιπροσωπεύει η κάθε φωτογραφία ενδείκνυται στο σχήμα 12.1.



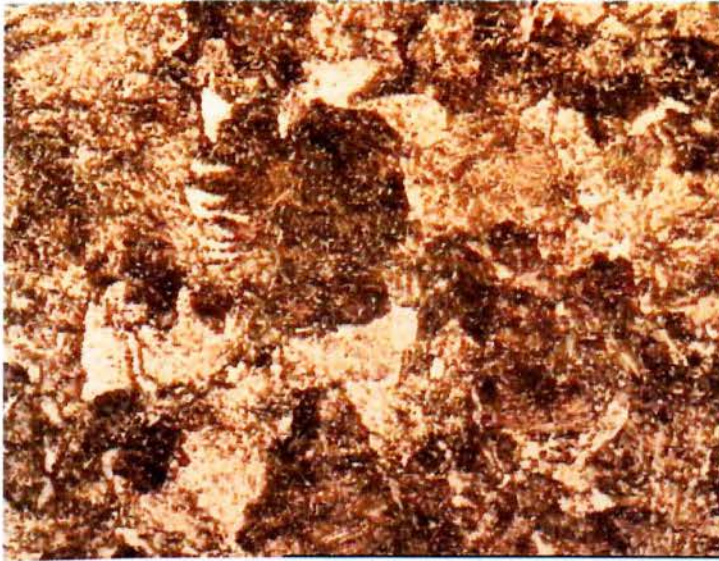
**Σχήμα 12.1** Οι περιοχές μελέτης με οπτικό μικροσκόπιο στο δοκίμιο 1.2 του κόμπλερ Νο 1.

Στο σχήμα 12.2 παρατηρείται το σημείο (1) του δοκιμίου 1.2 της οποίας η δομή είναι ανέπαφη και δεν έχει δεχτεί καμία ιδιαίτερη παραμόρφωση κατά την διάρκεια της λειτουργίας του υδραυλοκινητήρα ή τη στιγμή της αστοχίας του κόμπλερ (No1). Στην περιοχή που υποδεικνύει το κόκκινο βέλος εμφανίζεται συσσωρευμένος μπενίτης. Το υλικό σε αυτήν την περιοχή δεν είναι ομοιόμορφα καταναμημένο. Η ανομοιομορφία δομής οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα σε κακή χύτευση του κόμπλερ. Η ακατάλληλη χύτευση είναι μια σοβαρή αιτία που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του εξαρτήματος. Με πράσινο χρώμα υποδεικνύεται η περιοχή γύρω από το δοκίμιο που εμφανίζει τα συστατικά εγκιβωτισμού (Κεφάλαιο 8.3) του δοκιμίου.



**Σχήμα 12.2** Η ανέπαφη δομή του δοκιμίου 1.2 στο σημείο (1) του σχήματος 12.1 σε οπτικό μικροσκόπιο (M x 50).

Στο σχήμα 12.3 εμφανίζεται η δομή του υλικού για μεγάλη μεγέθυνση (Mx1000). Η φωτογραφία παρουσιάζει το κέντρο περίπτου του δοκιμίου, σημείο (2), μια ανέπαφη περιοχή. Η δομή αποτελείται από φερρίτη (λευκό χρώμα), περλίτη (άσπρο-γκρι χρώμα) και μπενίτη (μαύρο χρώμα).



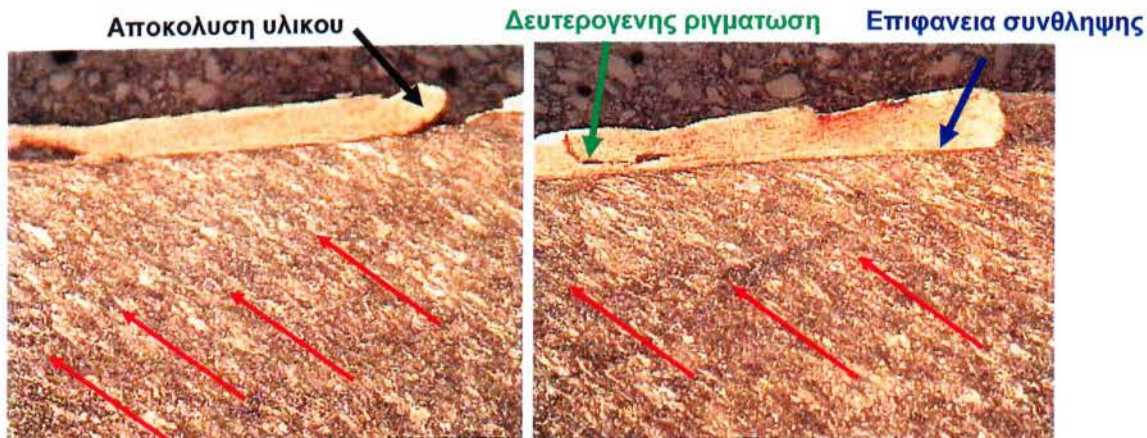
**Σχήμα 12.3** Η μικροδομή του δοκιμίου 1.2 (M x 1000), στο σημείο (2) του σχήματος 12.1.

Η φωτογραφία στο σχήμα 12.4 έχει παρθεί από το σημείο (3) του δοκιμίου 1.2. Είναι φανερή η στρέβλωση που έχει δεχτεί το υλικό από την έντονη καταπόνηση με αποτέλεσμα να έχει πάρει αυτή την κυκλική εξωτερική μορφή. Οι κόκκοι εσωτερικά του υλικού έχουν κυκλικό σχήμα. Όσο πλησιάζουμε στην εξωτερική επιφάνεια οι κόκκοι δέχονται μια συμπίεση λόγω της στρέψης και παραμορφώνονται. Τέλος, παρουσιάζουν ένα προσανατολισμό προς την κατεύθυνση των τάσεων.



**Σχήμα 12.4** Η μικροδομή του δοκιμίου 1.2 στην περιοχή καταπόνησης στο σημείο (3) του σχήματος 12.1 (Μ x 100).

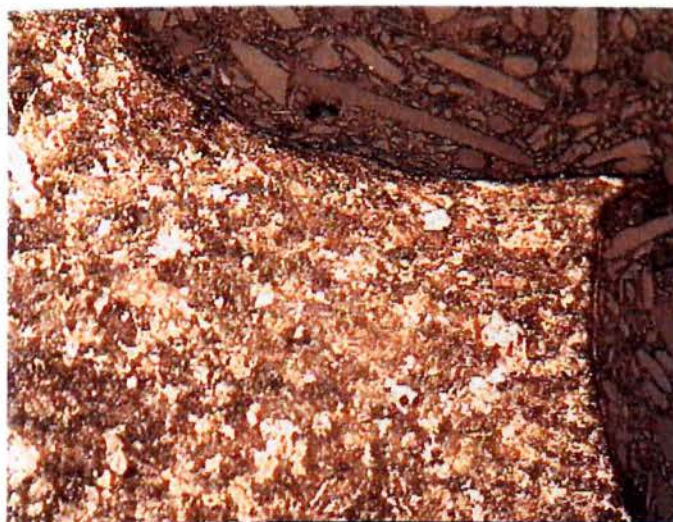
Τα σχήματα 12.5 και 12.6 παρουσιάζουν την πάνω επιφάνεια του δοκιμίου 1.2, στα σημεία (4) και (5) αντίστοιχα. Αυτή η επιφάνεια έχει υποστεί στρέψη και στην συνέχεια θραύση κατά την λειτουργία του υδραυλοκινητήρα. Η δομή της παρουσιάζει τον προσανατολισμό που έχουν υποστεί οι κόκκοι όπως και η συμπίεση, η οποία έχει αλλάξει το σχήμα τους. Στην πάνω επιφάνεια της θραύσης εμφανίζεται μια επίστρωση η οποία φαίνεται με διαφορετικό χρώμα από την υπόλοιπη δομή του δοκιμίου. Σε αυτήν τη περιοχή οι κόκκοι έχουν υποστεί έντονη παραμόρφωση (λόγο της στρέψης) και έντονη σύνθλιψη ταυτόχρονα (λόγο της πίεσης και της τριβής σε εκείνη την περιοχή μετά την θραύση). Το άσπρο χρώμα της επιφάνειας αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι εκεί δημιουργείται μια διαβάθμιση προς τα πάνω σε σχέση με την υπόλοιπη δομή του υλικού γιατί είναι τρομερά σκληρό λόγω της σύνθλιψης που έχει υποστεί και δεν έχει λειανθεί στον ίδιο βαθμό όσο η άλλη δομή (που είναι πιο μαλακή). Επίσης η εναλλαγή χρώματος σε αυτή την περιοχή (άσπρο-κόκκινο-καφέ) είναι λόγω των μεγάλων τάσεων που συγκεντρώνονται εκεί και κατά την χημική προσβολή η διείσδυση του οξέως (nitral 5%) είναι μεγαλύτερη από την υπόλοιπη περιοχή. Στο σχήμα 12.5 παρατηρείται ότι αρχίζει αποκόλληση της συνθλιμμένης επιφάνειας λόγω της μεγάλης διαφοράς σκληρότητας. Στο σχήμα 12.6 παρατηρείται μια δευτερογενής ριγμάτωση στην εξωτερική αυτή επιφάνεια.



**Σχήμα 12.5** Δομή της πάνω επιφάνειας του δοκιμίου 1.2 ( M x 200), στο σημείο 4 του σχήματος 12.1. Αποκόλληση συνθλιμμένης επιφάνειας.

**Σχήμα 12.6** Δομή της πάνω επιφάνειας του δοκιμίου 1.2 ( M x 200), στο σημείο 5 του σχήματος 12.1. Δευτερογενής ριγμάτωση εσωτερικά της συνθλιμμένης επιφάνειας.

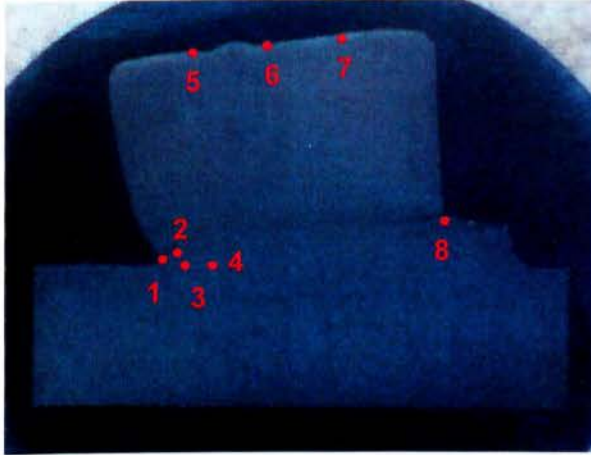
Στην εικόνα 12.7 έχει παρουσιάζεται η πάνω δεξιά επιφάνεια του δοκιμίου 1.2. Προς το εσωτερικό η δομή δεν εμφανίζεται παραμορφωμένη και το σχήμα των κόκκων είναι ανέπαφο. Στην επιφανειακή περιοχή οι κόκκοι έχουν δεχτεί σύνθλιψη λόγω της στρέψης. Το σχήμα της εικόνας είναι εμφανίζει το μεγάλο βαθμό στο οποίο έχει παραμορφωθεί το δοκίμιο σε εκείνη την περιοχή, κατά την διάρκεια της λειτουργίας του υδραυλοκινητήρα.



**Σχήμα 12.7** Η μικροδομή του δοκιμίου 1.2 στο σημείο 6 του σχήματος 12.1 (M x 200).

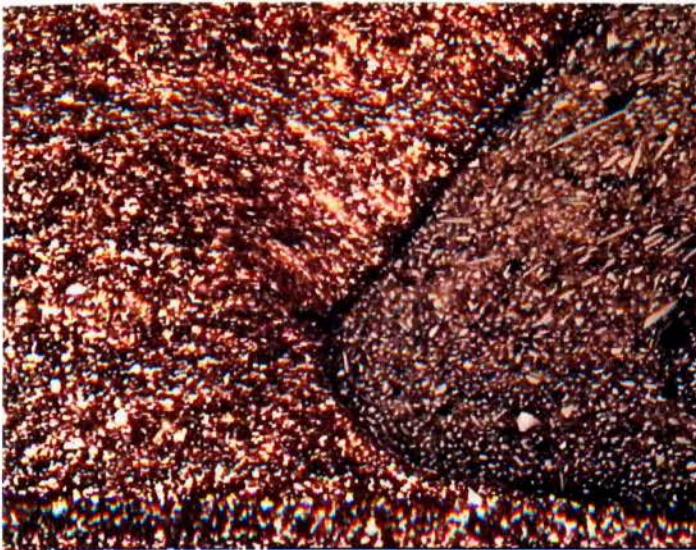
Για την μικροσκοπική εξέταση του κόμπλερ No 2 χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο 2.1.1. Το σχήμα 12.8 παρουσιάζει μια κάτοψη του εγκιβωτισμένου δοκιμίου η οποία περιέχει τα σημεία όπου πάρθηκαν οι φωτογραφίες για την μελέτη μικροδομής.



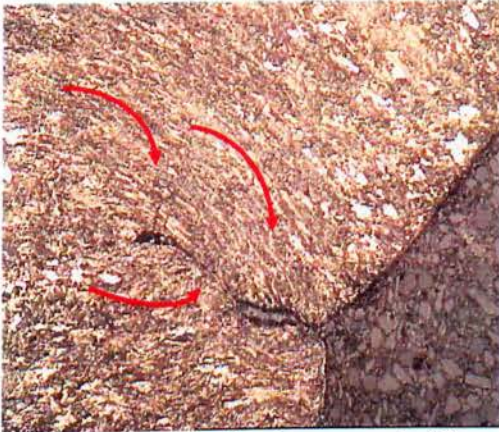


**Σχήμα 12.8** Οι περιοχές μελέτης δομής με οπτικό μικροσκόπιο στο δοκίμιο 2.1.1 του κόμπλερ No 2.

Στο σημείο (1), σε μικρή μεγέθυνση, το δοκίμιο εμφανίζει ομαλή δομή (σχήμα 12.9). Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση παρατηρείται η αρχή μια ρωγμής η οποία διεισδύει εσωτερικά του δοκιμίου (σημεία 2 και 3, σχήματα 12.10 και 12.11). Κοντά στην ρωγμή οι κόκκοι αλλάζουν μορφή και από κυκλικούς μετατρέπονται σε μακρόστενους. Αυτό οφείλεται στο ότι δέχονται μεγάλη εγκάρσια τάση και έτσι συμπιέζονται και παραμορφώνονται. Σε συνδυασμό με την στρεπτική τάση που δέχεται το εξάρτημα κατά την λειτουργία του υδραυλοκινητήρα, καταπονείται σε αυτά τα σημεία με τάσεις που υπερβαίνουν το όριο διαρροής του υλικού. Κατά συνέπεια δημιουργούνται ρωγμές οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην τελική αποκόλληση του υλικού. Η κατεύθυνση που παίρνουν οι κόκκοι κατά την παραμόρφωση τους δείχνουν και την κατεύθυνση των τάσεων (όπως φαίνονται με το κόκκινο τοξάκι).



**Σχήμα 12.9** Μικροδομή στο σημείο (1) του σχήματος 12.8 του δοκιμίου 2.1.1 (M x 50).

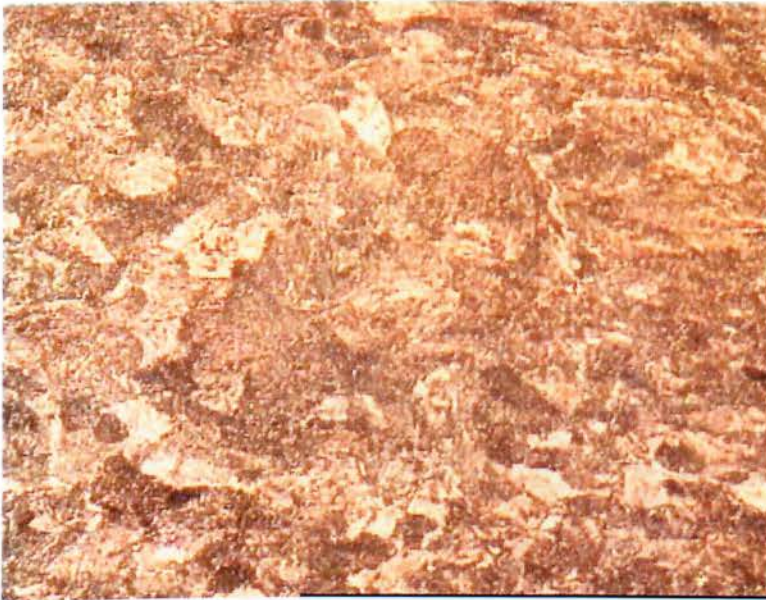


**Σχήμα 12.10** Μικροδομή στο σημείο (2) του σχήματος 12.8 του δοκιμίου 2.1.1 (Mx200).



**Σχήμα 12.11** Μικροδομή στο σημείο (3) του σχήματος 12.8 του δοκιμίου 2.1.1 (Mx500).

Η μελέτη εσωτερικά του δοκιμίου, (σημείο 4) αποδεικνύει ότι η δομή δεν έχει δεχτεί κάποιο είδους παραμόρφωση. Η δομή κυρίως αποτελείται από φερρίτη (το έντονο λευκό χρώμα) και περλίτη (το γκρι-καφέ χρώμα).



**Σχήμα 12.12** Η μικροδομή του δοκιμίου 2.1.1 στο σημείο 4 του σχήματος 12.8, εσωτερικώς της επιφάνειας προς μελέτη (M x 500).

Τα σχήματα 12.13, 12.14 και 12.15 παρουσιάζουν τα σημεία 5,6 και 7 αντίστοιχα του δοκιμίου 2.1.1. Το σχήμα 12.13 εμφανίζει την αναμενόμενη δομή χωρίς ρωγμές ή κάποια εμφανή παραμόρφωση των κόκκων. Παρατηρείται ότι οι κόκκοι που συσσωρεύονται στο πάνω μέρος του δοκιμίου έχουν ένα πιο ανοιχτό χρώμα σε σχέση με αυτό των κόκκων που είναι στο εσωτερικό του δοκιμίου. Αυτή η διαφορά στο χρώμα αποδεικνύει ότι η κατανομή του υλικού κατά την χύτευση δεν έγινε σωστά, και έτσι η δομή του δοκιμίου είναι ανομοιομορφη.

Στο σχήμα 12.14 φαίνεται η διαδικασία αποκόλλησης ενός σημείου της δομής του υλικού. Και εδώ είναι εμφανής η διαφορά κατανομής του υλικού όπως φαίνεται από το χρώμα των κόκκων. Αυτός μπορεί να είναι και ο λόγος που γίνεται σε εκείνο το σημείο η αποκόλληση του υλικού.

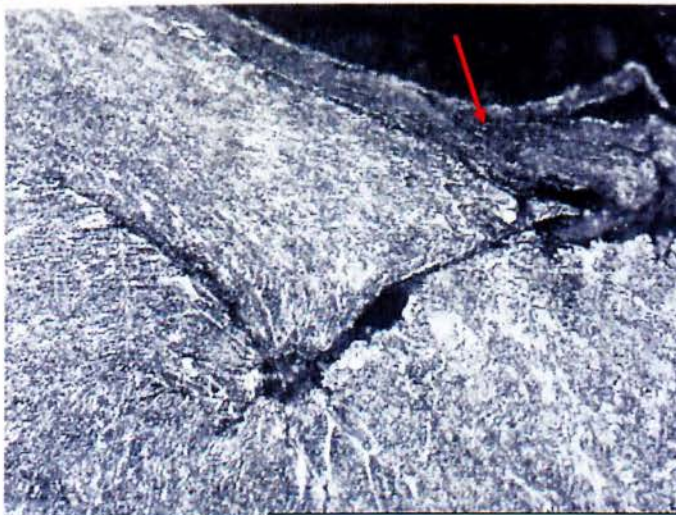


**Σχήμα 12.13** Η μικροδομή στο σημείο 5 του σχήματος 12.8 του δοκιμίου 2.1.1 (Mx50).



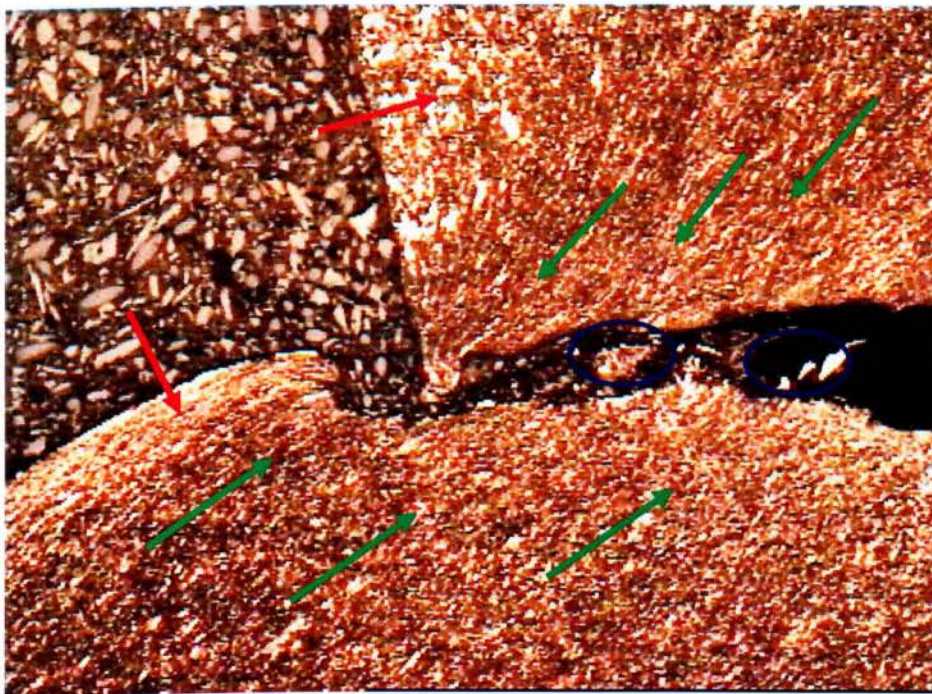
**Σχήμα 12.14** Αρχή αποκόλλησης στο σημείο 6 του σχήματος 12.8 του δοκιμίου 2.1.1 (Mx100).

Το σχήμα 12.15 παρουσιάζει μια δευτερογενή ριγμάτωση η οποία είχε κατεύθυνση στο εσωτερικό της δομής του δοκιμίου και σε κάποιο σημείο αλλάζει φορά. Αυτή η αλλαγή της κατεύθυνσης οφείλεται στο ότι η ρωγμή έπεσε πάνω σε μια αρκετά σκληρή φάση της δομής η οποία την υποχρέωσε να αλλάξει φορά και κατεύθυνση. Στην επιφάνεια του δοκιμίου στο σημείο που πάρθηκε η φωτογραφία, έχει διαμορφωθεί μια επίστρωση. Αυτή έχει διαφορετική δομή και οφείλεται στην τριβή που δέχτηκε το δοκίμιο σε εκείνο το σημείο (υποδεικνύεται με το κόκκινο βέλος). Ως αποτέλεσμα της τριβής, η τοπική ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών οι οποίες οδήγησαν στην την τοπική τήξη και πήξη του υλικού και την δημιουργία διαφορετικής δομής.



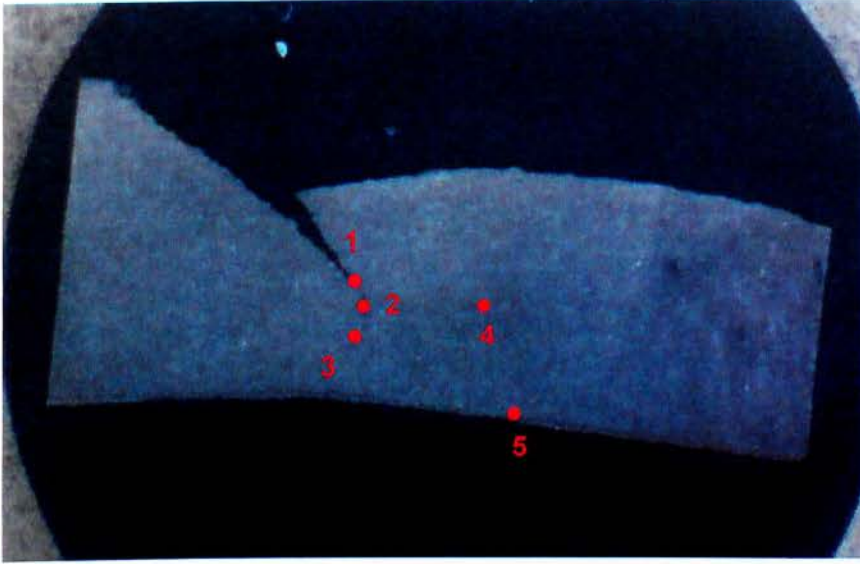
**Σχήμα 12.15** Δευτερογενής ριγμάτωση στο σημείο 7 του σχήματος 12.8 του δοκιμίου 2.1.1 (M x 500).

Το σχήμα 12.16 πάρθηκε από το σημείο 8 του δοκιμίου 2.1.1. Στο σχήμα παρουσιάζεται η ρωγμή που είναι φανερή και με το μάτι κοιτώντας το δοκίμιο από πάνω. Επίσης είναι φανερή με διαφορετικό φωτισμό η μη όμοια κατανομή του υλικού (στα σημεία που δείχνουν τα κόκκινα και πράσινα βέλη). Επίσης, στην περιοχή που δείχνουν τα κόκκινα βέλη, φαίνονται οι κόκκοι να είναι συμπιεσμένοι ιδιαίτερα στην κάτω περιοχή της ρωγμής. Σε εκείνο το σημείο εμφανίζεται η αρχή της ρωγμής και το υλικό δέχτηκε υψηλές τάσεις στρέψης και ταυτόχρονα συμπίεσης. Πιο εσωτερικά στην δομή του υλικού με τα πράσινα βέλη παρουσιάζεται ο προσανατολισμός των κόκκων, το οποίο φανερώνει και την φορά των τάσεων κατά την διάδοση των ρωγμών. Ενδιάμεσα στη ρωγμή φαίνονται διαφορά θραύσματα (μέσα σε μπλε κύκλο). Τα θραύσματα κατά την λειτουργία του υδραυλοκινητήρα επιβαρύνουν το πρόβλημα, αυξάνοντας τις τριβές τοπικά. Σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία αυξήθηκε υπερβολικά διευκολύνοντας την επέκταση της ρωγμής και οδηγώντας στην θραύση πιο εύκολα. Τα θραύσματα δεν ήταν δυνατό να απομακρυνθούν κατά τον καθαρισμό του δοκιμίου.



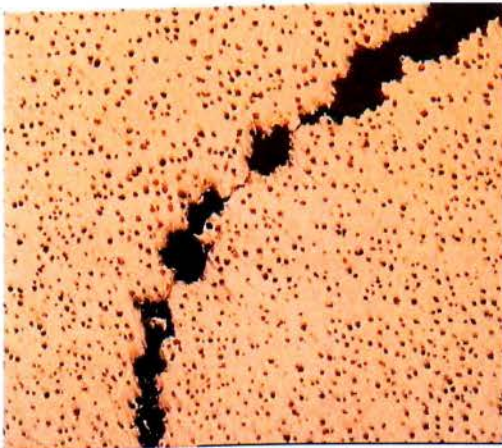
**Σχήμα 12.16** Δευτερογενής ριγμάτωση στο σημείο 8 του σχήματος 12.8 του δοκιμίου 2.1.1(M x 100).

Τέλος εξετάστηκε το δοκίμιο 3.2. Το σχήμα 12.17 παρουσιάζει μια κάτοψη του εγκιβωτισμένου δοκιμίου όπου εμφανίζονται τα σημεία μελέτης.



**Σχήμα 12.17** Οι περιοχές μελέτης με οπτικό μικροσκόπιο στο δοκίμιο 3.2 του κόμπλερ No3

Το δοκίμιο 3.2 κατά την διάρκεια της στίλβωσης εμφάνισε κάποια μαύρα στίγματα στην επιφάνεια του τα όποια δεν απομακρύνονταν ούτε μετά το πέρας δυο διαδικασιών λειάνσεως. Το σχήμα 12.18 παρουσιάζει το δοκίμιο πριν την χημική προσβολή και το σχήμα 12.19 μετά την χημική προσβολή. Στις φωτογραφίες αυτές επίσης παρατηρείται στο κέντρο-σημείο 1 και 2, η ρωγμή που έχει δημιουργηθεί κατά την θραύση του δοντιού του κόμπλερ.



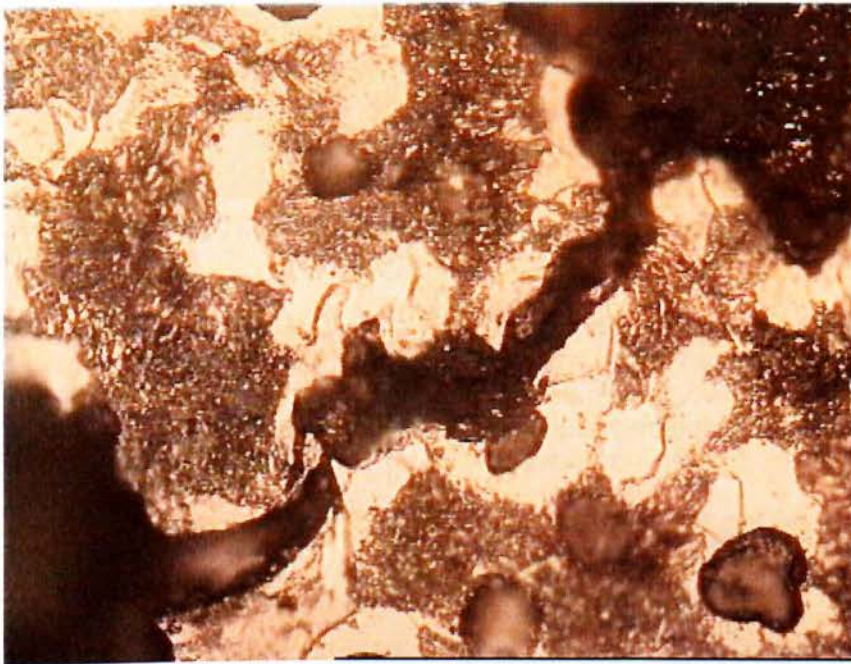
**Σχήμα 12.18** Το δοκίμιο 3.2 πριν τη χημική προσβολή (M x 50), στο σημείο 1 του σχήματος 12.17.



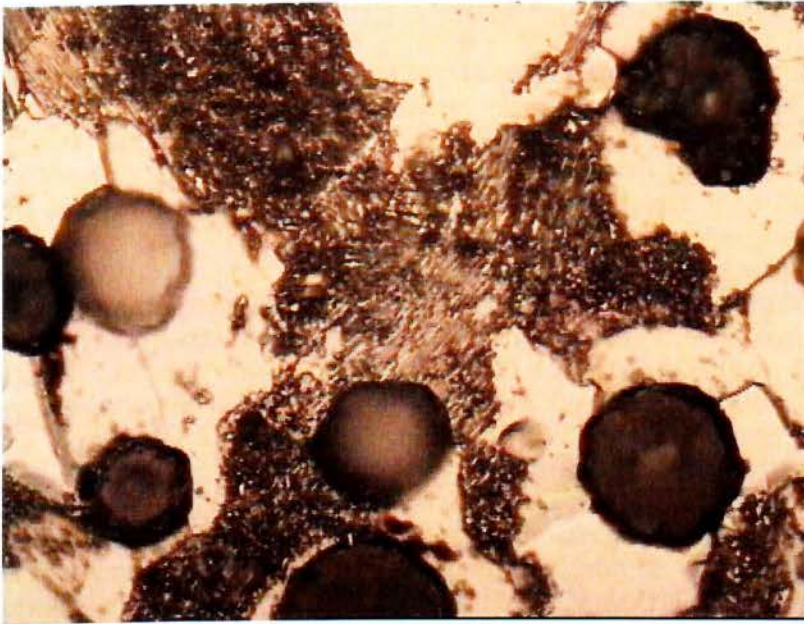
**Σχήμα 12.19** Το δοκίμιο 3.2 μετά τη χημική προσβολή (M x 50), στο σημείο 2 σχήματος 12.17.

Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση (σχήμα 12.20 και 12.21) εμφανίζεται καθαρά η δομή του κόμπλερ στα σημεία 3 και 4 αντίστοιχα. Το υλικό του προς μελέτη εξαρτήματος είναι χυτοσίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη. Οι κυκλικοί κόκκοι που φαίνονται από την μικρότερη (x50) έως και την μεγαλύτερη (x1000) μεγέθυνση είναι σφαιροειδής γραφίτες, οι όποιοι είναι και ιδιαίτερα ψαθυροί. Σε μεγάλη μεγέθυνση ξεχωρίζουν μεγάλοι κόκκοι γραφίτη οι οποίοι είναι ευτικτικοί κόκκοι και μικρότεροι κόκκοι δευτερογενούς γραφίτη. Το υπόλοιπο της δομής αποτελείται από λευκούς φερριτικούς κόκκους και μεικτούς κόκκους λεδεμβουριτικής μορφής.

Η κύρια ρωγμή η οποία αναπήχθηκε στο κέντρο του θραύσματος ακολουθεί τα όρια των κόκκων και αναπτύσσεται γύρω από τους κόκκους του γραφίτη. Σε πολλές περιοχές γίνεται απομάκρυνση των γραφιτών γύρω από την ρωγμή, λόγω της μεγάλης διαφοράς σκληρότητας το γραφίτη με το υπόλοιπο υλικό.

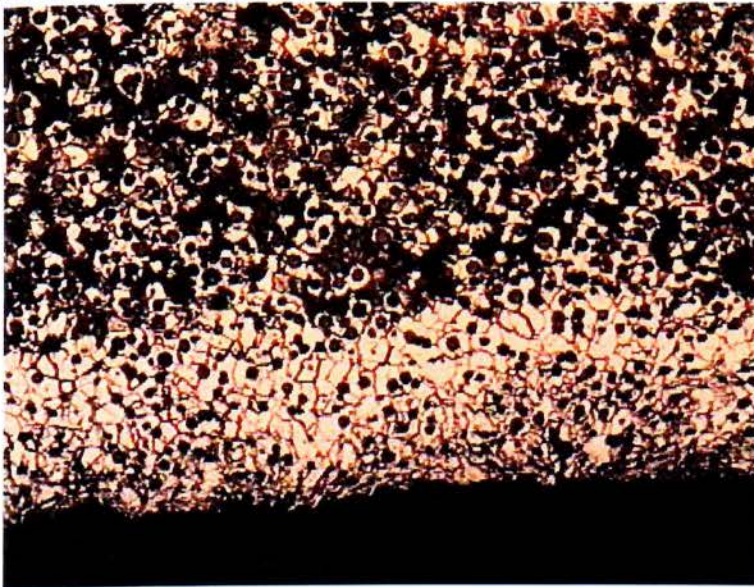


**Σχήμα 12.20** Η ρωγμή ακολουθεί τα όρια των κόκκων των γραφιτών. Επίσης σε πολλές περιπτώσεις απομακρύνονται οι γραφίτες. (M x 500), σημείο 3 σχήματος 12.17.



**Σχήμα 12.21** Η δομή από την οποία αποτελείται το δοκίμιο 3.2 (M x 1000) στο σημείο 4 σχήματος 12.17.

Η παρατήρηση της δομής σε εγκάρσια διατομή αποδεικνύει ότι το υλικό δεν είναι ομοιογενές (σχήμα 12.22), στο σημείο 5. Στην επιφάνεια του είναι κυρίως φαιός (πιο λευκή περιοχή), και προς το κέντρο είναι σικτικός. Αυτό οφείλεται στην κακή χύτευση του υλικού αποδεικνύοντας ότι ο ρυθμός απόψυξης δεν είναι ο ίδιος στην διατομή του εξαρτήματος και ότι η επιφάνεια του ψύχεται πολύ του πιο γρήγορα από ότι το εσωτερικό του.



**Σχήμα 12.22** Μικροδομή του δοκιμίου 3.2 στην κάτω επιφάνεια (M x 100), στο σημείο 5 σχήματος 12.17.

## 12.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία SEM

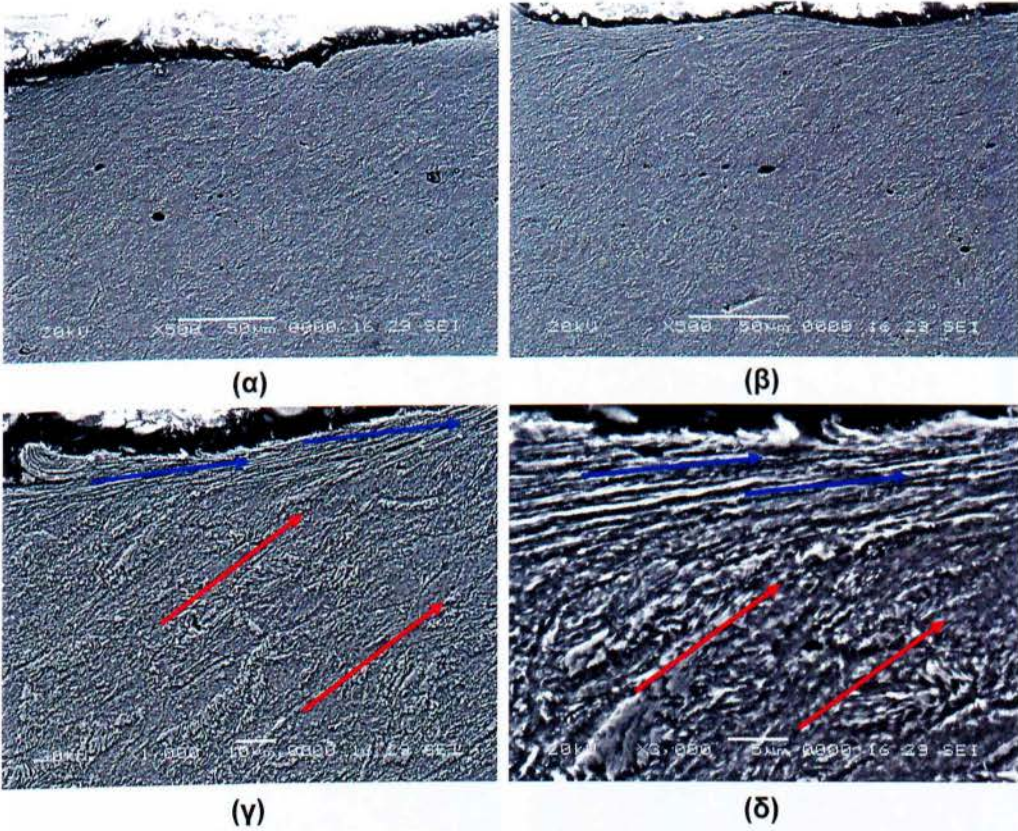
Η μεταλλογραφική ανάλυση των επιφανειών θραύσης πραγματοποιήθηκε σε εργαστήριο εκτός Ελλάδας. Χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Bandelin Electronic Type: RK255H. Σε συνδυασμό με την ηλεκτρονική μικροσκοπία πραγματοποιήθηκε και τοπική χημική ανάλυση με περίθλαση ακτίνων Χ (EDX) με μηχανήμα τύπου Oxford Inst. Inca 200 Soft. Η εφαρμογή των ακτίνων Χ στην ηλεκτρονική μικροσκοπία επιτρέπει την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των μεταλλογραφικών δοκιμίων. Πριν τη μελέτη τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε καθαρισμό με υπερηχητικές εκπομπές σε λουτρό αλκοόλης.

Αρχικά εξετάστηκαν δοκίμια από το κόμπλερ Νο 1. Στο σχήμα 12.23 παρουσιάζεται σταδιακά από μεγέθυνση Mx500 έως και μεγέθυνση Mx3000 η επιφάνεια θραύσης του κόμπλερ από την οποία έχει αποκολληθεί εντελώς το δόντι. Στο σχήμα 12.23,α παρατηρείται μια ινώδης ομοιόμορφη δομή, με κυτταροειδή καρβίδια, στην οποία οι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι (κόκκινα βέλη). Στο σχήμα 12.23,β, εμφανίζεται στην άκρη μια επιφανειακή στρώση στην οποία οι ινώδης κόκκοι αλλάζουν κατεύθυνση, και διανέμονται παράλληλα με την επιφάνεια θραύσης (μπλε βέλη). Αυτό δημιουργείται διότι σε εκείνη την περιοχή, όπως φαίνεται πιο λεπτομερέστερα στις μεγεθύνσεις Mx1000 (Σχ.12.23,γ) και Mx3000 (Σχ.12.23,δ), το δοκίμιο υφίσταται συμπίεση και αύξηση των επιφανειακών τάσεων.

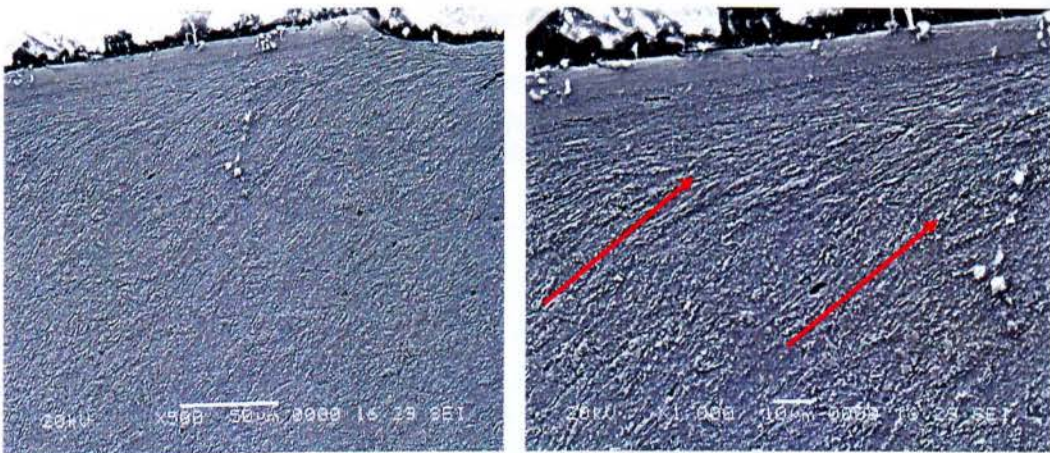
Ακλουθώντας την ηλεκτρονική εξέταση παράλληλα με την επιφάνεια θραύσης, παρατηρείται μια εναλλαγή στην δομή της επιφανειακής συμπιεσμένης στρώσης (Σχήμα 12.24, μεγέθυνση Mx500 και Mx1000). Αυτές οι επιφάνειες έχουν υποστεί τόσο μεγάλες τάσεις συμπίεσης που η δομή έχει χάσει την ινώδη κυτταροειδή μορφή της και έχει μετατραπεί σε μια ενιαία μάζα. Λόγω σύνθλιψης οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζονται πιο λειασμένες από αυτές του σχήματος 12.23 υποδηλώνοντας την τριβή που υπέστη μετά την θραύση το δόντι του κόμπλερ Νο 1.

Στο σχήμα 12.25 παρουσιάζεται η δομή της πάνω πλευράς του δοκιμίου, δηλαδή η επιφάνεια στην οποία έχει γίνει η αποκόλληση του δοντιού. Σε αυτή την επιφάνεια εμφανίζονται αναδιπλώσεις εξαιρετικά μικρές οι οποίες δεν αναγνωρίζονται από το EDX. Αυτές προφανώς δημιουργήθηκαν με την τριβή του δοντιού πάνω στο κύριο σώμα του κόμπλερ αφού είχε ήδη γίνει η θραύση του. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση Mx1000, Mx3000 παρατηρούνται μεγάλες οπές οι οποίες πρέπει να είναι το κενό που δημιουργήθηκε μετά την απομάκρυνση των οξειδίων από τον καθαρισμό με υπερηχητικές εκπομπές σε λουτρό αλκοόλης.

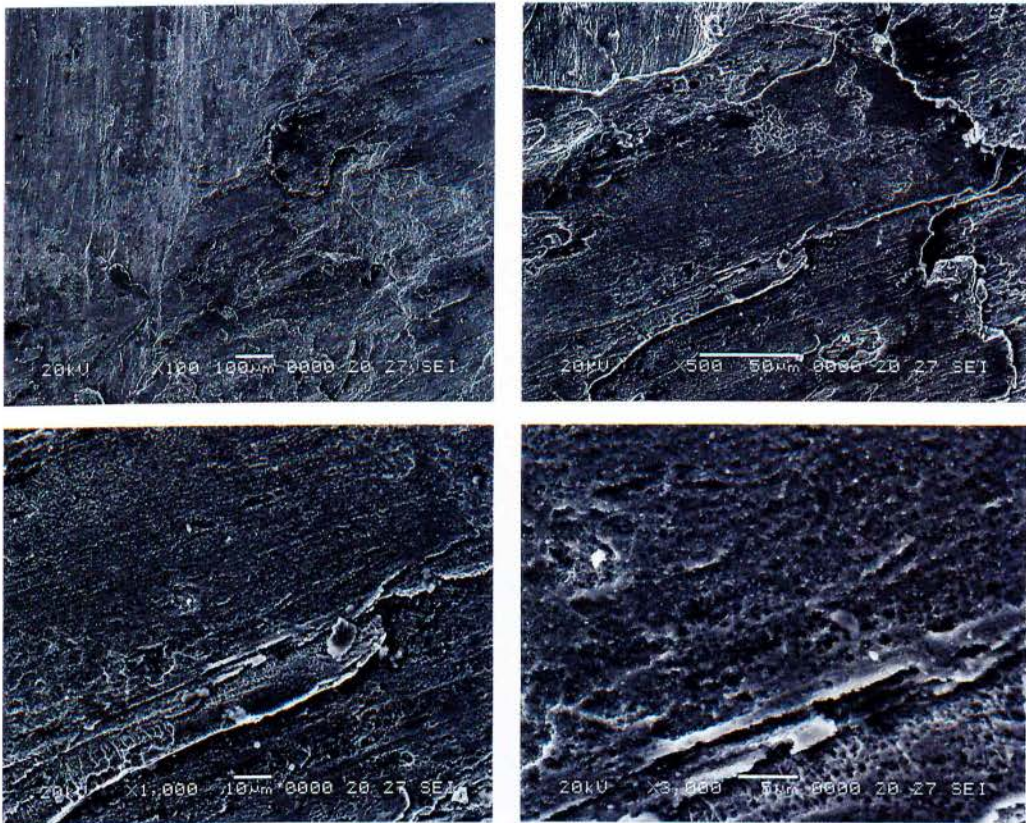




**Σχήμα 12.23** Η δομή του δοκιμίου 1.2 του κόμπλερ Νο 1 σε ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

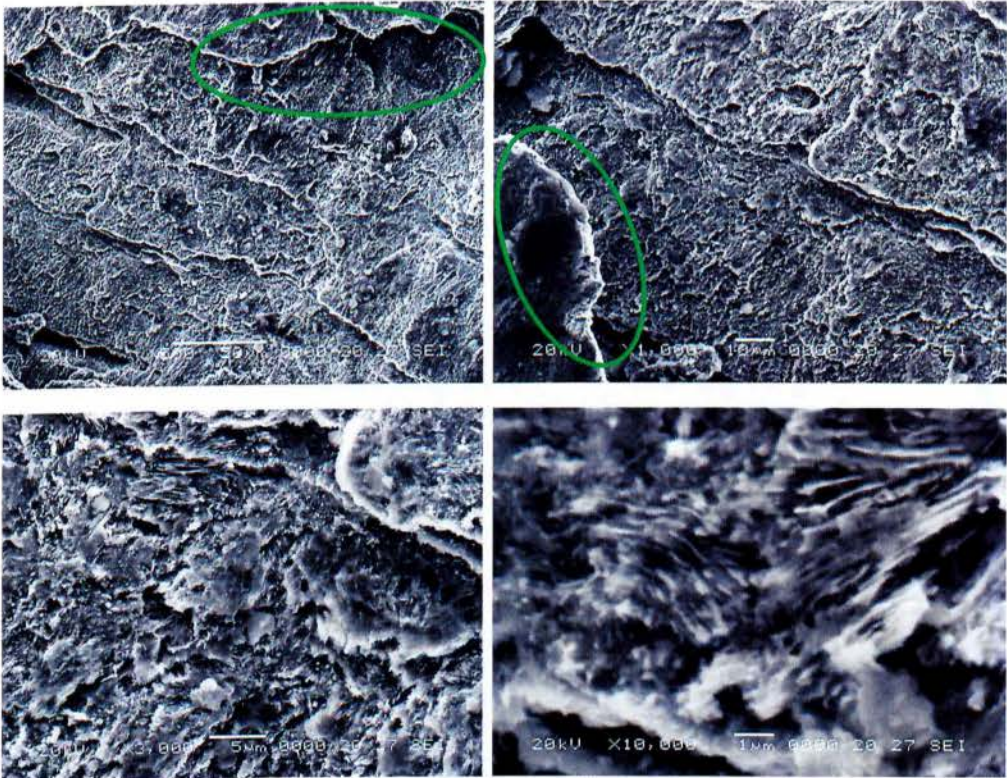


**Σχήμα 12.24** Μικροδομή σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM της εγκάρσιας διατομής του κόμπλερ Νο 1 όπου παρατηρείται η συμπιεσμένη επιφάνεια.



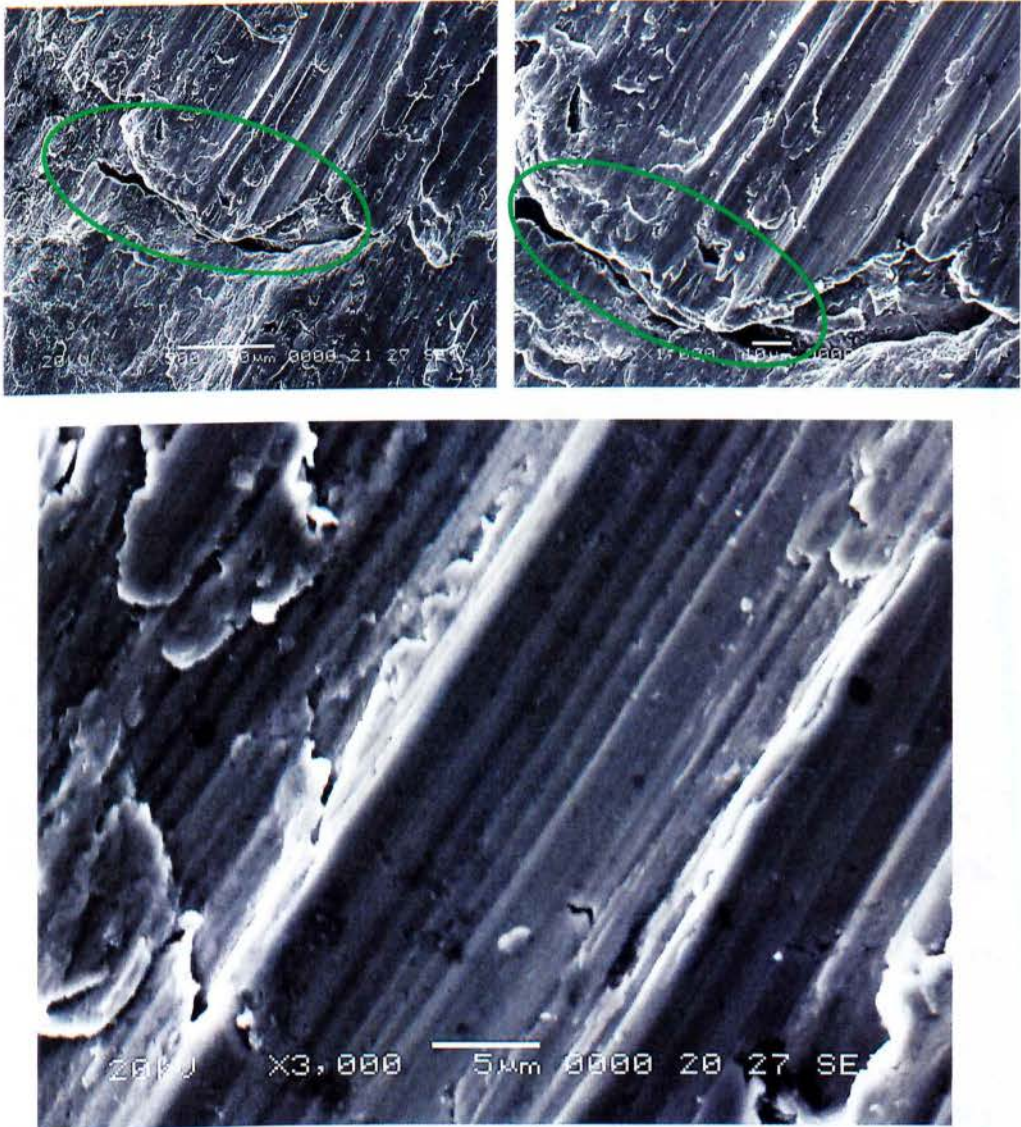
**Σχήμα 12.25** Μικροδομή στην επιφάνεια αποκόλλησης δοντιού από το κόμπλερ No 1 σε ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

Το σχήμα 12.26 παρουσιάζει μια περιοχή του ίδιου δοκιμίου που έχει υποστεί μεγαλύτερες, πιο εμφανείς αναδιπλώσεις (πράσινο χρώμα). Στις μεγεθύνσεις Mx3000 και Mx10000 είναι εμφανής βελονοειδή μορφές οι οποίες μοιάζουν να είναι μαρτενσίτης. Στην μεγέθυνση Mx10000 οι βελόνες έχουν μήκος 1μm και πάχος 0,1μm όποτε δεν είναι βελόνες γιατί θα φαίνονταν και στο οπτικό μικροσκόπιο.



**Σχήμα 12.26** Επιφάνεια αποκόλλησης δοντιού από το κόμπλερ No 1 σε ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

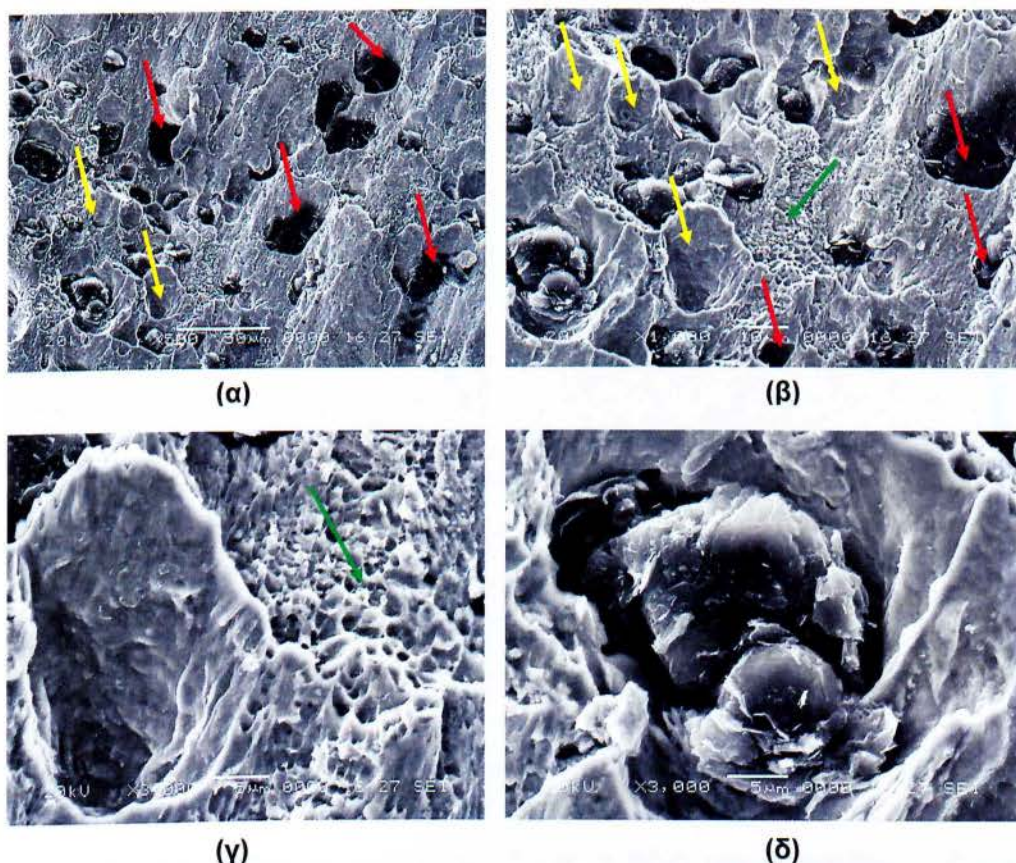
Η εξέταση δοκιμίου από το κόμπλερ No2 ανέδειξε διάφορες περιοχές. Στο σχήμα 12.27 εμφανίζεται μια περιοχή όπου υπάρχει έντονη επιφανειακή τριβή, ολίσθηση του υλικού και μικρές αναδιπλώσεις του υλικού. Πιθανών οι γραμμές ολίσθησης οι οποίες υπάρχουν σε μεγάλη μεγέθυνση να έχουν διαμορφωθεί από την τριβή των επιφανειών θραύσης. Στις μεγεθύνσεις Mx500 και Mx1000 παρατηρείται μια ρωγμή (πράσινο χρώμα) η οποία σχεδόν καλύπτεται από το υλικό που έχει ολισθήσει.



**Σχήμα 12.27** Επιφάνεια με ιδιαίτερα επιμηκυσμένους κόκκους στην δομή του κόμπλερ No 2 μετά από ανάλυση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

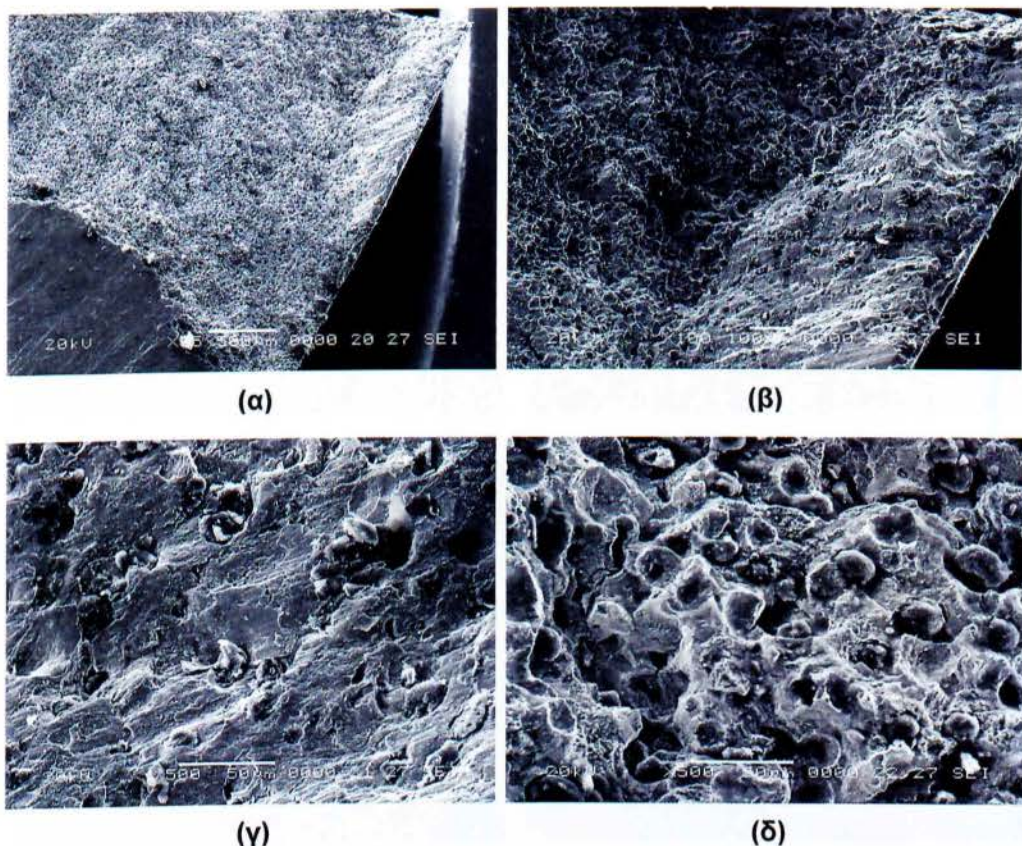
Το σχήμα 12.28 παρουσιάζει μία περιοχή στην οποία οι κόκκοι δεν φαίνονται ιδιαίτερα προσανατολισμένοι. Η θραύση εμφανίζεται κυρίως περικρυσταλλική, αλλά εντοπίζονται και περιοχές όπου φαίνεται διακρυσταλλική (πράσινο βελάκι). Οι μεγάλες τάσεις την στιγμή της τελικής αποκόλλησης προκάλεσε τοπική επιμήκυνση των κόκκων. Σε πολλά σημεία τα καρβίδια έχουν αποκολληθεί βίαια αφήνοντας κενά στην επιφάνεια θραύσης (κίτρινα βέλη). Σε άλλα σημεία τα καρβίδια έμειναν εγκλωβισμένα άλλα οι μεγάλες τάσεις κατά την θραύση προκάλεσε την μερική θραύση τους (κόκκινα βέλη). Στις φωτογραφίες 12.28 ,γ και δ σε μεγέθυνση Mx3000 φαίνονται καθαρά η μορφή δυο διαφορετικών μεγάλων

κόκκων που στην πρώτη περίπτωση έχει αποκολληθεί διακρισταλικά και φαίνεται το κάτω όριο του κόκκου. Στην δεύτερη περίπτωση το καρβίδιο είναι ξεκάθαρο με μαύρο χρώμα και φαίνονται και τα όρια του κόκκου του.



**Σχήμα 12.28** Επιφάνεια με τοπική παραμόρφωση κόκκων στο δοκίμιο του κόμπλερ No 2 μετά από ανάλυση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

Στο σχήμα 12.29 εμφανίζεται η γωνία του δοκιμίου. Στην κάτω αριστερά περιοχή της φωτογραφίας (α) η δομή φαίνεται λειασμένη ενώ στο υπόλοιπο δοκίμιο εμφανίζεται ανέπαφη επιφάνεια θραύσης. Η απότομη αυτή αλλαγή υποδεικνύει ότι η επιφάνεια προς εξέταση αποτελεί την τελευταία περιοχή αποκόλλησης όπου η θραύση εμφανίζεται ιδιαίτερα βίαια. Στην φωτογραφία (β) παρατηρούνται διακυμάνσεις βάθους στην επιφάνεια του δοκιμίου με μορφή κρατήρα. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, (εικόνα (γ)) στην δεξιά πλευρά του κρατήρα παρατηρείται επιμήκυνση κόκκων με προσανατολισμό προς τον κρατήρα αποδεικνύοντας την φορά της τάσης στο τελευταίο στάδιο της θραύσης. Στην εικόνα (δ) παρουσιάζεται η εικόνα θραύσης στο βάθος του κρατήρα στο τελευταίο σημείο αποκόλλησης. Εκεί η θραύση είναι ψαθυρή και κυρίως περικρυσταλλική.

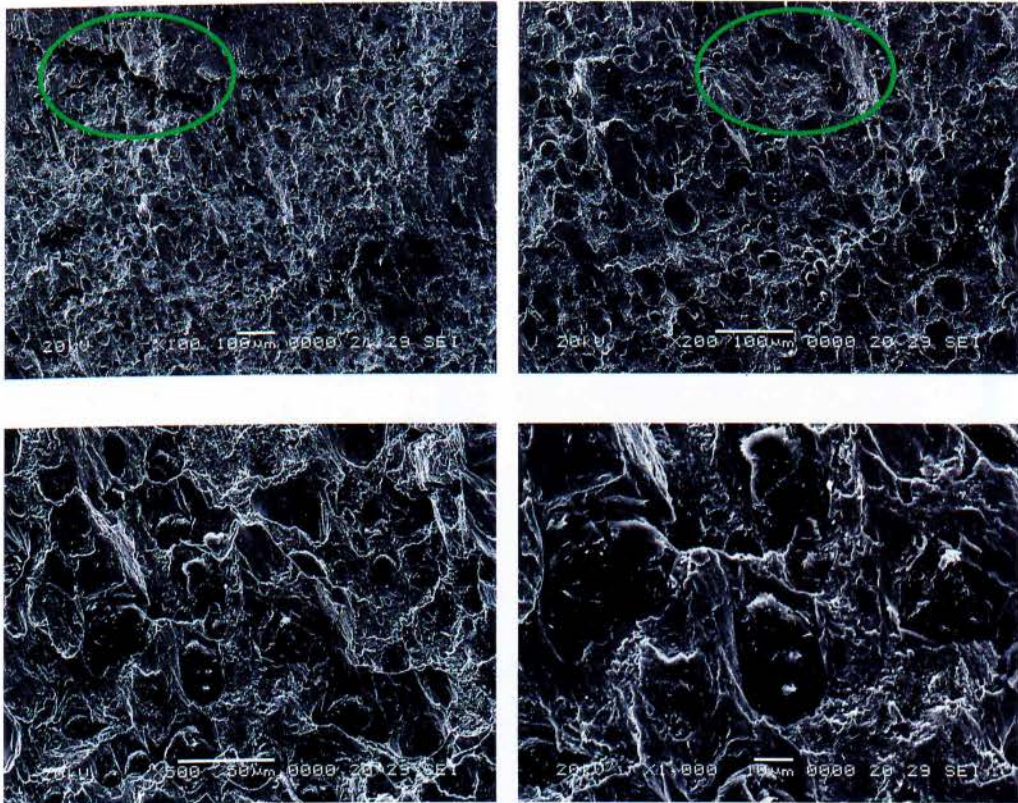


**Σχήμα 12.29** Μικροδομή σε ανάλυση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM του κόμπλερ Νο 2 στην περιοχή της τελικής αποκόλλησης.

Τελευταίο εξετάστηκε το δοκίμιο 1.2 από το δόντι που αφαιρέθηκε από τον κύριο άξονα (two crank-shaft). Πρώτα αναλύεται η επιφάνεια που έγινε η θραύση του δοντιού από το υπόλοιπο κομπλερ, και στην συνέχεια παρουσιάζονται φωτογραφίες από το εγκιβωτισμένο δοκίμιο. Το δοκίμιο είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 8.6 κεφάλαιο 8 και εξετάστηκε από τα δεξιά προς τα αριστερά όπως φαίνεται στην φωτογραφία.

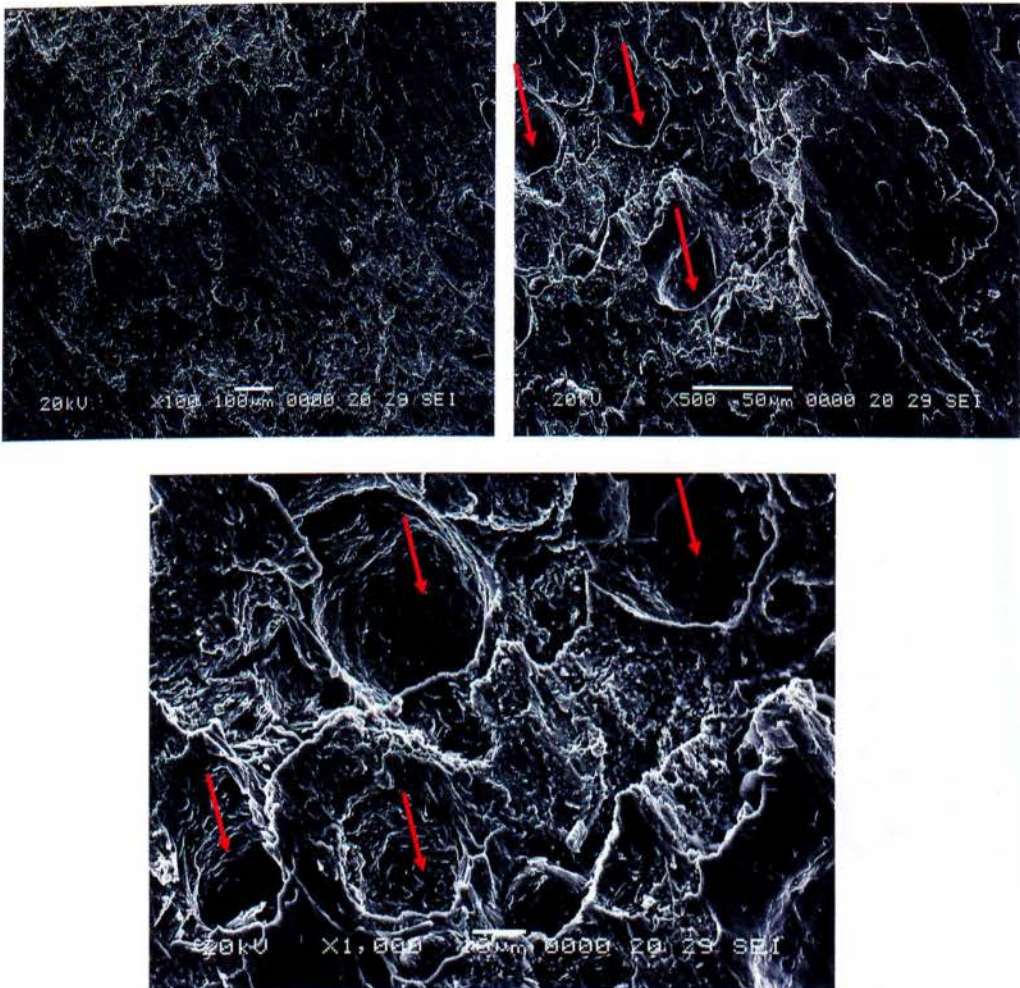
Η ανάλυση του δοκιμίου 3.2 από το θραύσμα που αφαιρέθηκε από τον κύριο άξονα παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες. Πρώτα πραγματοποιείται ανάλυση θραύσης με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM, και στην συνέχεια παρουσιάζονται φωτογραφίες από το εγκιβωτισμένο δοκίμιο.

Η επιφάνεια θραύσης παρουσιάζει διαφορετικές περιοχές. Από δεξιά προς αριστερά, η πρώτη περιοχή παρουσιάζει ψαθυρή θραυση (σχήμα 12.30). Οι κόκκοι παρουσιάζουν ένα ανεπαισθητο προσανατολισμό λόγω των μεγάλων δυνάμεων στρέψης που προκάλεσε την θραύση του εξαρτήματος. Σε ορισμένα σημεία παρατηρούνται αναδιπλώσεις του υλικού (πράσινο κύκλο) που οφείλονται στον ίδιο λόγο. Στους θύλακες αποκόλλησης, σε μεγαλύτερη μεγέθυνση παρατηρείται ο γραφίτης με σφαιροειδή μορφή.



**Σχήμα 12.30** Μικροδομή επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου από το δόντι που αφαιρέθηκε από το two-speed-crankshaft σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

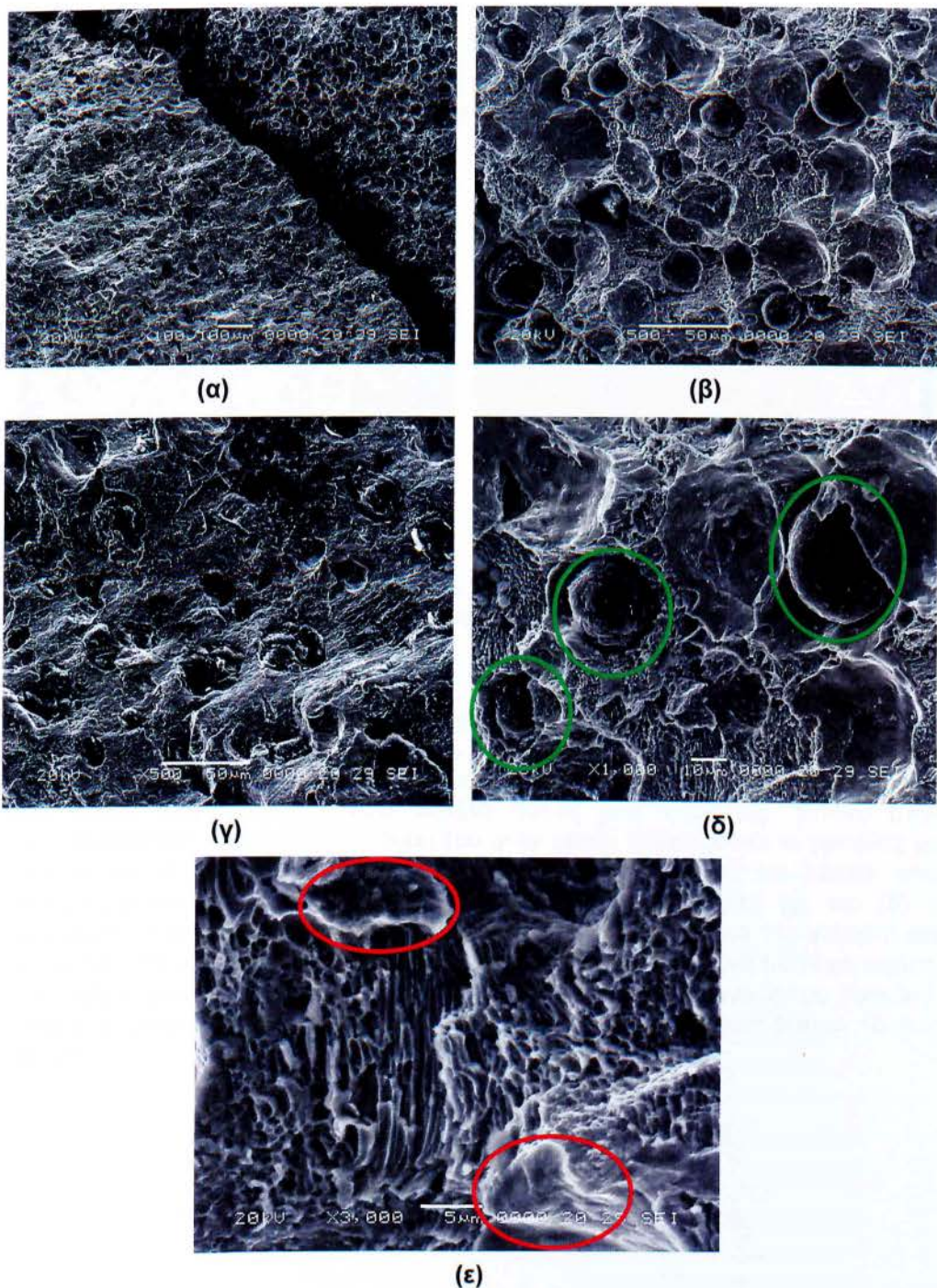
Στην συνέχεια πιο δεξιά (σχήμα 12.31) φαίνεται η επιφάνεια να γίνεται πιο ανώμαλη, υπάρχει αυξημένη ολίσθηση υλικού και έντονα παραμορφωμένοι κόκκοι (κόκκινο βέλος).



**Σχήμα 12.31** Λίγο πιο αριστερή επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου από το δόντι που αφαιρέθηκε από το two-speed-crankshaft σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

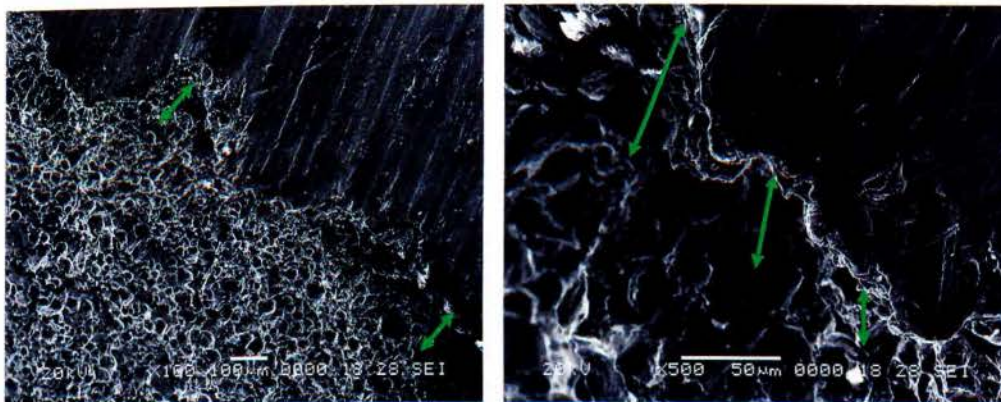
Πλησιάζοντας κοντά στην ρωγμή, αριστερά και δεξιά της, υπάρχουν διακρυσταλλικοί και περικρυσταλλικοί κόκκοι, στην αριστερή πλευρά φαίνονται οι κόκκοι να είναι επιμηκυμένοι όπως μια όλκιμη θραύση (γ), ενώ στην άλλη πλευρά οι κόκκοι είναι ομαλοί όπως μια ψαθυρή θραύση (β). Στην μεγέθυνση x1000 φαίνεται η δεξιά πλευρά της ρωγμής, όπου είναι ορατοί καθαρά οι κόκκοι γραφίτη που δεν έχουν αποκολληθεί (πράσινο κύκλο). Τέλος στην εικόνα (ε) είναι φανεροί οι γραμμωτοί κόκκοι περλίτη όπως και πλακίδια φερρίτη (κόκκινο κύκλο).





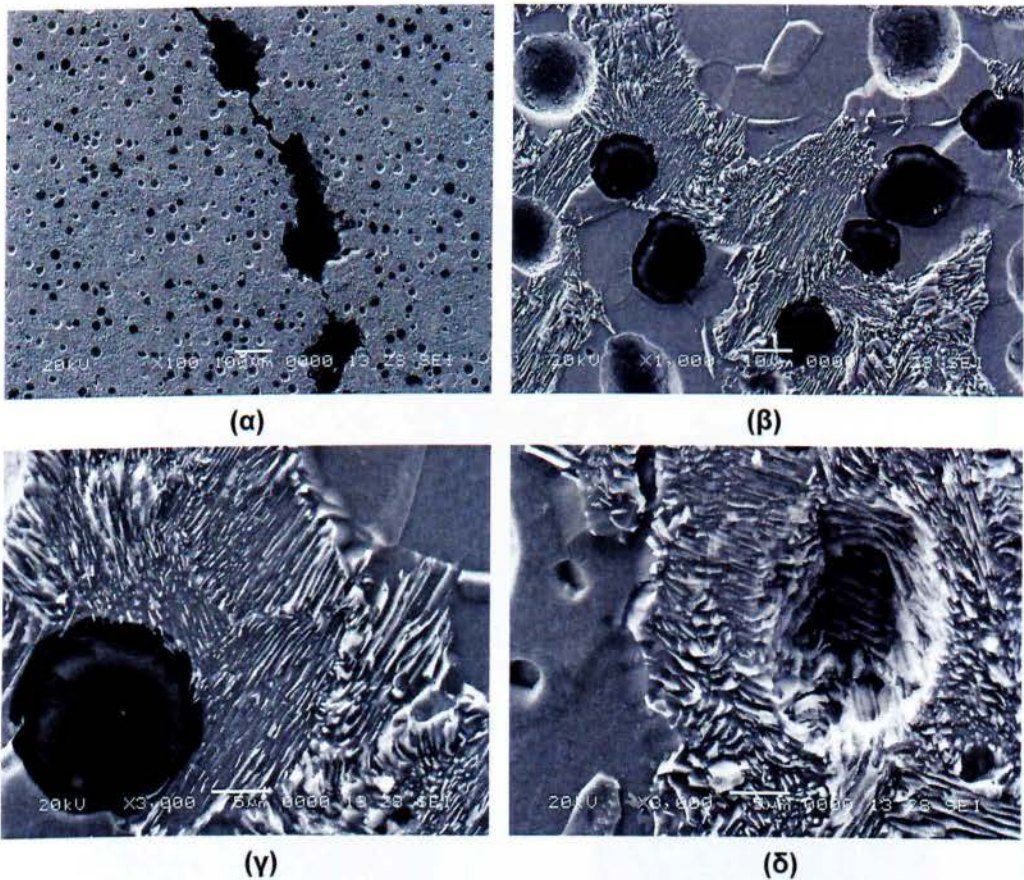
**Σχήμα 12.31** Γύρω από την ρωγμή του δοκιμίου από το δόντι που αφαιρέθηκε από το two-speed-crankshaft σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

Έπειτα εξετάστηκε η επιφάνεια στην δεξιά πλευρά (σχήμα 12.32) όπου φαίνεται να υπάρχουν δυο επίπεδα (πράσινο χρώμα), ένα πιο πάνω, το οποίο φαίνεται να έχει υποστεί ιδιαίτερη στρέψη και είναι ξεκάθαρη η τριβή του υλικού, και ένα πιο κάτω το οποίο είναι σε κάποια μέρη λείο και σε άλλα μέρη υπάρχει καθαρή αποκόλληση κόκκων.



**Σχήμα 12.32** Δεξιά πλευρά του δοκιμίου από το δόντι που αφαιρέθηκε από το two-speed-crankshaft σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

Εξετάζοντας την επιφάνεια του εγκιβωτισμένου δοκιμίου (σχήμα 12.33), από την φωτογραφία (α) μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι η ρωγμή δεν διαδίδεται ομοιόμορφα σε σχέση με τους υπόλοιπους χάλυβες, δηλαδή σε κάποια σημεία έχει λεπτό πάχος και σε άλλα μεγάλο πάχος σαν κρατήρας. Έπειτα στην φωτογραφία (β) είναι φανερή η δομή του στην οποία εμφανίζονται οι γραφίτες με έντονο μαύρο χρώμα και γύρω τους λείες περιοχές, όπως και κόκκοι από λεδεμβουριτική μορφή (μη λείες περιοχές). Στις φωτογραφίες (γ) και (δ) η μεγέθυνση παρουσιάζει πολύ ωραία στην πρώτη (γ), τον κόκκο του γραφίτη και γύρω του την λεδεμβουριτική μορφή και στην δεύτερη (δ), το κενό που έχει αφήσει ο γραφίτης μετά την αποκόλληση του κατά την διαδικασία λείανσης του δοκιμίου. Γενικά ο γραφίτης εμφανίζεται ομοιόμορφα κατανεμημένος, διαστάσεων 10 έως 30 μm.



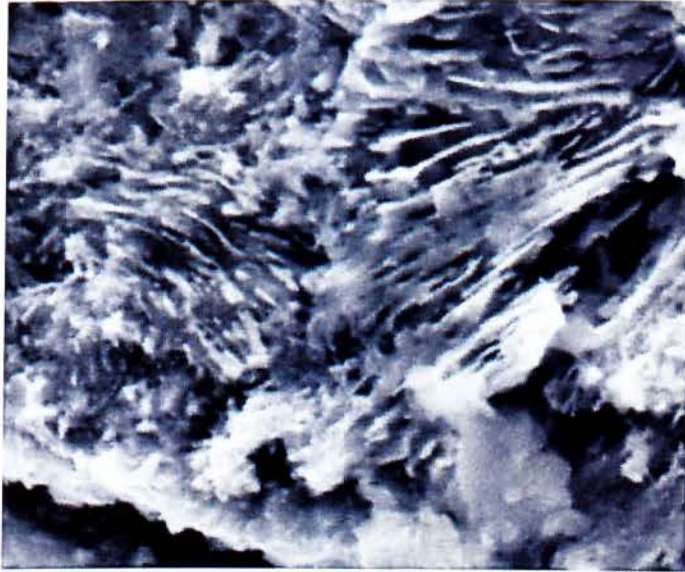
**Σχήμα 12.33** Δεξιά πλευρά του δοκιμίου από το δόντι που αφαιρέθηκε από το two-speed-crankshaft σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.

### 12.3 Χημική ανάλυση EDX

Τα σχήματα 12.34, 12.35 και 12.36 παρουσιάζουν την τοπική χημική ανάλυση του υλικού των δοκιμίων 2.2, 3.1.1 και 1.2 αντίστοιχα με την μέθοδο EDX (Energy Dispersive X-ray).

Στο σχήμα 12.34 αναλύεται το δοκίμιο 2.2 του κόμπλερ No2. Πρώτα παρουσιάζεται η φωτογραφία του σημείου που έγινε η χημική ανάλυση με την μέθοδο EDX και στην συνέχεια σε μικρότερες φωτογραφίες φαίνονται η κατανομή των υλικών στο συγκεκριμένο σημείο του δοκιμίου. Είναι εύκολο να γίνει αντιληπτό πως το κύριο συστατικό του υλικού είναι ατσάλι (iron Ka1) και τα υπόλοιπα συστατικά υπάρχουν σε μικρότερα ποσοστά (Carbon Ka1\_2, Chromium Ka1, Molybdenum La1, Manganese Ka1, Silicon Ka1). Επίσης φαίνεται πως εκτός από το ατσάλι που παρουσιάζεται ομοιόμορφα κατανεμημένος, τα υπόλοιπα στοιχεία είναι ανομοιόμορφα κατανεμημένα και αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό από τα κενά που αφήνουν στις φωτογραφίες ενδιάμεσα από τον ένα κόκκο στον

άλλο. Η απόσταση τους δεν είναι ίδια και σταθερή. Αυτό το γεγονός ασφαλώς δίνει κακές μηχανικές ιδιότητες στο υλικό και στο αντίστοιχο εξάρτημα.



6μm

Electron Image 1



Iron Ka1



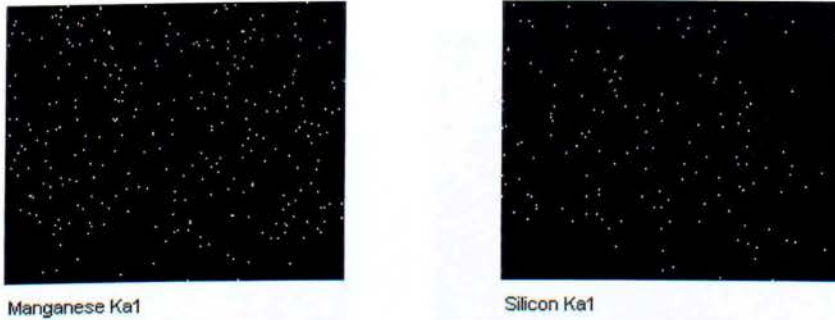
Carbon Ka1\_2



Chromium Ka1

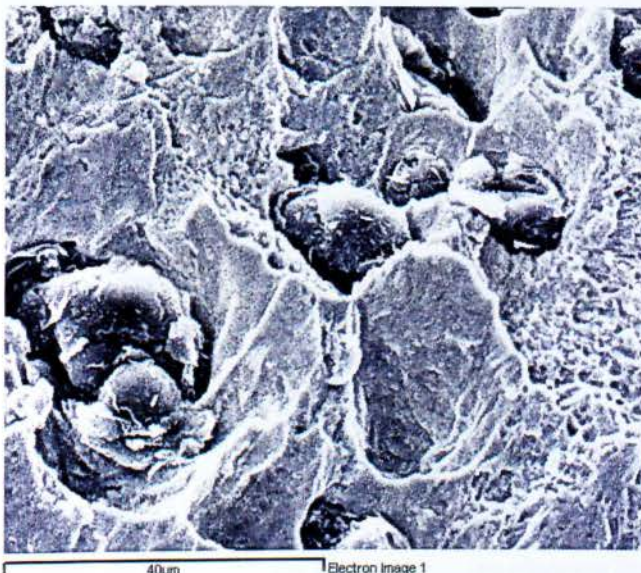


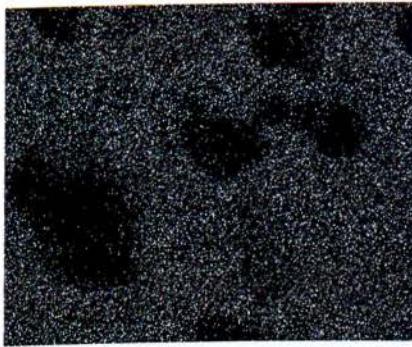
Molybdenum La1



**Σχήμα 12.34** Ανάλυση EDX στο δοκίμιο 2.2 του κόμπλερ Νο2.

Στο σχήμα 12.35 αναλύεται το δοκίμιο 3.1.1 του κόμπλερ Νο3. Πρώτα παρουσιάζεται η φωτογραφία του σημείου που έγινε η χημική ανάλυση με την μέθοδο EDX και στην συνέχεια σε μικρότερες φωτογραφίες φαίνονται η κατανομή των υλικών στο συγκεκριμένο σημείο του δοκιμίου. Είναι εύκολο να γίνει αντιληπτό πως το κύριο συστατικό του υλικού είναι ατσάλι (iron Ka1) και τα υπόλοιπα συστατικά υπάρχουν σε μικρότερα ποσοστά (Carbon Ka1\_2, Chromium Ka1, Molybdenum La1, Nickel Ka1, Manganese Ka1, Silicon Ka1). Στην φωτογραφία του ατσαλιού γενικά το υλικό είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο αλλά σε κάποια σημεία υπάρχει κενό. Σε αυτά τα σημεία υπάρχει αντίστοιχα αυξημένο ποσοστό άνθρακα όπως φαίνεται στην φωτογραφία του carbon Ka1\_2. Αυτό δεν προξενεί κανένα προβληματισμό γιατί σε αυτά τα σημεία είναι οι κόκκοι καρβιδίων όπως είχε προαναφερθεί στην προηγούμενη παράγραφο που αναλυόταν αυτή η φωτογραφία. Τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία που παρουσιάζονται σε αυτό το δοκίμιο δεν φαίνεται να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα αλλά όχι στον ίδιο κακό βαθμό που είναι στο δοκίμιο 2.2.





Iron Kα1



Carbon Kα1\_2



Silicon Kα1



Chromium Kα1



Molybdenum Lα1



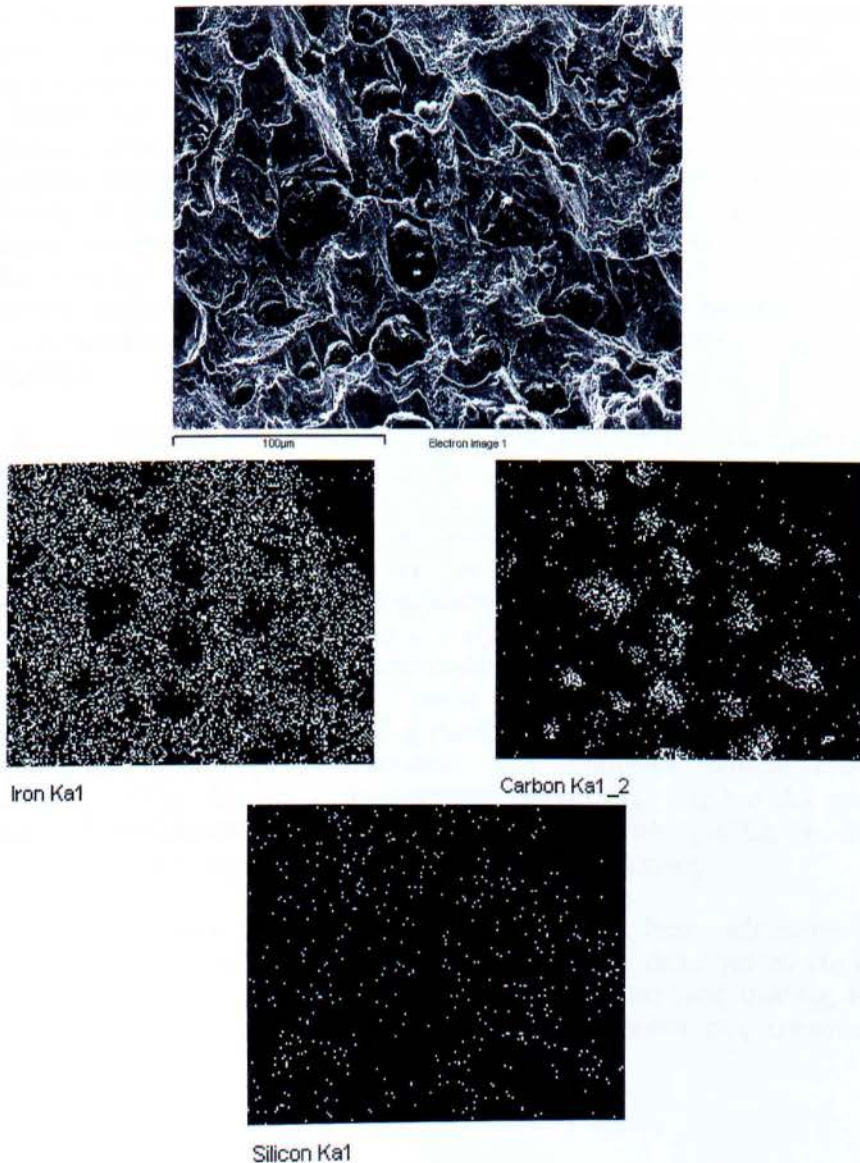
Nickel Kα1



Manganese Kα1

**Σχήμα 12.35** Ανάλυση EDX στο δοκίμιο 3.1.1 του κόμπλερ Νο3.

Στο σχήμα 12.36 αναλύεται το δοκίμιο 1.2 από το δόντι που αφαιρέθηκε από τον κύριο άξονα (two crank-shaft). Πρώτα παρουσιάζεται η φωτογραφία του σημείου που έγινε η χημική ανάλυση με την μέθοδο EDX και στην συνέχεια σε μικρότερες φωτογραφίες φαίνεται η κατανομή των υλικών στο συγκεκριμένο σημείο του δοκιμίου. Και εδώ το κύριο συστατικό είναι το ασάλι (iron Ka1) και τα υπόλοιπα συστατικά υπάρχουν σε μικρότερα ποσοστά (Carbon Ka1\_2, Silicon Ka1). Τα συστατικά στο δοκίμιο αυτό είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και τα κενά που φαίνονται στην φωτογραφία του Iron Ka1 οφείλονται στο γεγονός ότι εκεί υπάρχουν καρδίσβια που φαίνονται στην επομένη φωτογραφία του άνθρακα (Carbon Ka1\_2).



**Σχήμα 12.36** Ανάλυση EDX στο δοκίμιο 1.2 από το δόντι που αφαιρέθηκε από τον κύριο άξονα (two crank-shaft).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 13.1 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση αστοχίας που προηγήθηκε προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα που αφορούν τρεις βασικές κατηγορίες:

i. **Σχεδιασμό:** κατόπιν όλων των παρατηρήσεων, μετρήσεων και πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην ανάλυση αστοχίας παρουσιάζεται σοβαρό πρόβλημα στο σχεδιασμό των εξαρτημάτων, (κόμπλερ). Υπάρχει ιδιαίτερα μικρή επιφάνεια εμπλοκής μεταξύ των κόμπλερ και του κυρίου άξονα, εκεί δηλαδή που παρουσιάζεται η αστοχία. Πράγμα που δεν συμβαίνει στην άλλη επιφάνεια εμπλοκής, δηλαδή μεταξύ των κόμπλερ και του valve spool. Έπειτα είναι εξίσου σημαντικό το γεγονός ότι σε όλες τις ακμές της περιοχής που γίνεται η σύμπλεξη, το ράδιο είναι ανεπαρκέστατο. Επίσης η επιφάνεια δεν παρουσίαζε την ποιότητα που θα άρμοζε σε ανάλογα εξαρτήματα όπως τα κόμπλερ και ούτε στα σχέδια τους δεν παρουσιάζοταν καμιά αναφορά σε αυτήν. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί αν η επιφάνεια που γίνεται η σύμπλεξη δεν εφάπτεται ολόκληρη, τότε παρουσιάζονται πολλές σημειακές φορτίσεις που καταπονούν ανομοιόμορφα τα κόμπλερ.

ii. **Επιλογή υλικού:** στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μελετήθηκαν τρία δοκίμια και τα τρία είναι στην κατηγορία των κατασκευών, (Ck60, 41CrMo4 και χυτοσίδηρος). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την μη ύπαρξη συγκεκριμένης προδιαγραφής που να προσδιορίζει με ακρίβεια την επιλογή του υλικού των κόμπλερ, το οποίο να έχει ένα ποσοστό ανοχής στις ιδιότητες του ώστε να αντέχει τυχών σφάλματα σχεδιαστικά ή ποιότητας επιφανείας που τελικά παρουσιάστηκαν. Σε αυτού του είδους τα εξαρτήματα είναι προτιμότερη η επιλογή χαλύβων εργαλείων και όχι κατασκευών ή χυτοσίδηρου έστω κι αν είναι σφαιροειδούς γραφίτη διότι με μικρό έλεγχο παραγωγής δεν υπάρχει επαναληψιμότητα στις τιμές τους. Ο χυτοσίδηρος απορρίπτεται λόγω της μεγάλης ψαθυρότητας του, γιατί χρειαζόμαστε ένα ποσοστό ελαστικότητας (min επιμήκυνσης 10%). Το Ck60 απορρίπτεται επειδή έχει παρά πολύ μικρό όριο διαρροής. Το 41CrMo4 θεωρείται η καλύτερη επιλογή από τις άλλες δυο άλλα από το αποτέλεσμα της χρήσης του θεωρείται και αυτό ανεπαρκές.

iii. **Θερμική κατεργασία:** τα δοκίμια που εξεταστήκαν δεν υποβλήθηκαν σε κάποια ιδιαίτερη θερμική κατεργασία, αλλά για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι απαραίτητη η εύρεση μιας σωστής θερμικής κατεργασίας ώστε τελικά τα κόμπλερ να αντεπεξέρχονται στις απαιτήσεις του υδραυλοκινητήρα.

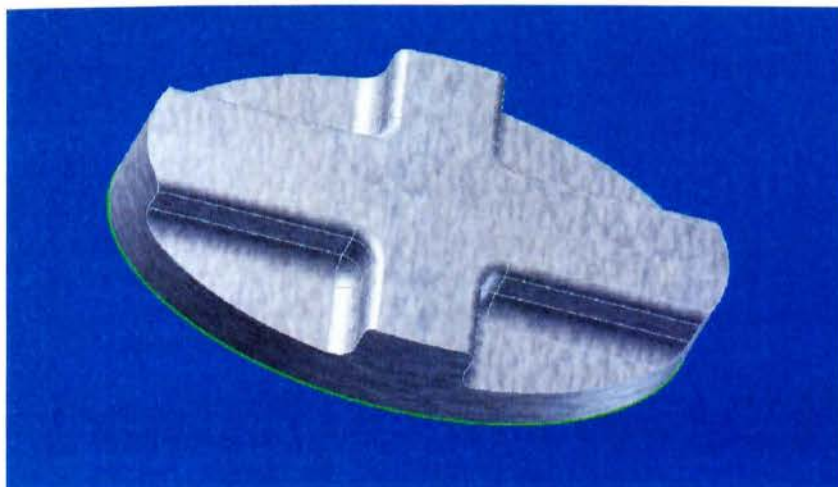


## 13.2 Προτάσεις

Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν από την διαδικασία της ανάλυσης αστοχίας των τριών δειγμάτων που μελετήθηκαν, προτείνονται οι ακόλουθες διορθωτικές ενέργειες:

i. **Σχεδιασμό:** προτείνεται η κατασκευή του δοντιού του κόμπλερ πέρα ως πέρα του δοκιμίου όπως γίνεται στην πλευρά σύζευξης των κόμπλερ με το valve-spool. Αυτό το χαρακτηριστικό το δείχνουν τα manual της εταιρίας και θα έπρεπε να κατασκευάζονται με αυτή την γεωμετρία (σχήμα 5.9). Με αυτό το χαρακτηριστικό το δόντι των κόμπλερ έχει μεγαλύτερη επιφάνεια σύμπλεξης κατά περίπου  $600\text{mm}^2$  περισσότερο. Έχοντας υπόψη ότι η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή το κόμπλερ κατά την διάρκεια σύμπλεξης του είναι  $600\text{mm}^2$  τότε μπορούμε να αντιληφτούμε πολύ εύκολα πως αυξάνεται η επιφάνεια σύμπλεξη κατά 100% και έτσι κατανέμονται ακόμα καλύτερα οι ροπές που δημιουργούνται λόγω της στρέψης. Μια ακόμα λύση για την αύξηση της επιφάνειας σύμπλεξη των κόμπλερ είναι η κατασκευή 2 δοντιών σε σχήμα σταυρού (+) όπως φαίνεται στο σχήμα 13.1. Τέλος το ράδιο στις ακμές του θα πρέπει να είναι της τάξης του 1,5-2mm.

ii. **Επιλογή υλικού:** προτεινόμενα υλικά για την κατασκευή κόμπλερ αυτών των τύπων υδραυλοκινητήρων είναι οι χάλυβες 1.2344, 1.2358, 1.2721 κατά DIN τα οποία μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες θα πρέπει να αποκτήσουν σκληρότητα 42-46 HRC, όριο διαρροής μεγαλύτερο του  $1100\text{ N/mm}^2$  και ταυτόχρονα επιμήκυνση σε θραύση μεγαλύτερη του 10%.



**Σχήμα 13.1** Κόμπλερ με δυο δόντια για την σύμπλεξη.

iii. **Θερμική κατεργασία:** η θερμική κατεργασία που προτείνεται να ακολουθησουν οι προαναφερθείσες τύποι χάλυβων είναι:

#### Χάλυβας 1.2344

- Προθέρμανση 1: 650 °C για 45 λεπτά
- Προθέρμανση 2: 850 °C για 45 λεπτά
- Ωστενιτοποίηση: 1030 °C για 30 λεπτά
- Απόψυξη: κλιμακωτή μπενιτομαρτενσιτική βαφή σε λουτρό αλάτων 550 °C για 10 λεπτά και απόψυξη σε ήρεμο αέρα.
- Επαναφορά 1: 550 °C για 2 ώρες
- Επαναφορά 2: 615 °C για 2 ώρες
- Επαναφορά 3: 570 °C για 2 ώρες

#### **Αποτέλεσμα:**

- Σκληρότητα: 45 HRC
- Αντοχή εφελκυσμού: 1420 N/mm<sup>2</sup>
- Όριο διαρροής: 1280 N/mm<sup>2</sup>
- Επιμήκυνση: 12%

#### Χάλυβας 1.2358

- Προθέρμανση : 700 °C για 45 λεπτά
- Ωστενιτοποίηση: 960 °C για 30 λεπτά
- Απόψυξη: κλιμακωτή μαρτενσιτική σε λουτρό αλάτων 180 °C για 40-50 λεπτά
- Επαναφορά 1: 580 °C για 2 ώρες
- Επαναφορά 2: 580 °C για 2 ώρες

#### **Αποτέλεσμα:**

- Σκληρότητα: 44-45 HRC
- Αντοχή εφελκυσμού: 1480 N/mm<sup>2</sup>
- Όριο διαρροής: 1184 N/mm<sup>2</sup>
- Επιμήκυνση: 11%

#### Χάλυβας 1.2721

- Προθέρμανση : 550 °C για 45 λεπτά
- Ωστενιτοποίηση: 850 °C για 30 λεπτά
- Απόψυξη: συνεχής μαρτενσιτική βαφή στο λαδί
- Επαναφορά 1: 350 °C για 2 ώρες
- Επαναφορά 2: 350 °C για 2 ώρες

#### **Αποτέλεσμα:**

- Σκληρότητα: 44-45 HRC
- Αντοχή εφελκυσμού: 1480 N/mm<sup>2</sup>
- Όριο διαρροής: 1280 N/mm<sup>2</sup>
- Επιμήκυνση: 13%

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] : Becker T. William, Shipley J. Roch, *“ASM Handbook Volume 1, Failure Analysis and Prevention”*, σελ. 683-767, ASM International, Materials Park, OH, (2002).
- [2] : A. K. DAS: *“Metallurgy of Failure Analysis - Types and Characteristics”*, edited by Mc Grow-Hill Companies, New York, pp.67-75, 1997.
- [3] : Μαραγιάννη Αριστοτέλη, Πτυχιακή εργασία, *“Ανάλυση αστοχίας βάσης κοπτικού εργαλείου από χάλυβα D2 κατά ASTM μηχανής ανακύκλωσης ελαστικών αυτοκινήτων”*, σελ. 88, κεφάλαιο 3.8, Αθήνα, (2011).
- [4] : Κυριακού Νικόλαος, Πτυχιακή εργασία, *“Ανάλυση πρόωρης αστοχίας του υλικού ενός εξαρτήματος καλουπιού διαμόρφωσης πλαστικού με έγχυση”*, σελ. 21, κεφάλαιο 1.10.3, Πειραιάς, (2010).
- [5] : <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AC%CE%BB%CF%85%CE%B2%CE%B1%CF%82> : (10-06-2011).
- [6] : Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, *“Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών”*, σελ. 511-522, Αθήνα, Παπασωτηρίου, (2003).
- [7] : Πετρος Γ. Πετρόπουλος, *“Μεταλλουργία”*, σελ.52, 148-152, Αθήνα, Ίδρυμα Ευγενίδου (1992).
- [8] : [http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/Thermikes%20ka%20tergasies%20\(Genika\).pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/Thermikes%20ka%20tergasies%20(Genika).pdf) (11-06-2011).
- [9] : <http://en.wikipedia.org/wiki/Machining> (14-06-2011).
- [10] : <http://el.wikipedia.org/wiki/> : (14-11-2010).
- [11] : <http://el.wikipedia.org/wiki/> : (11-06-2011).
- [12] : <http://www.kpm-uk.co.uk/kpm-in-action.aspx>. (17-03-2011).
- [13] : Aker Maritime, Maritime Pusnes *“AS INSTRUCTION MANUAL FOR SAMHO SHIPYARD S 134”*, σελ.8-30.
- [14] : <http://www.flickr.com/photos/kpmgallery/3716182579/in/photostream> (17-03-2011).
- [15] : Myron L.Begeman, B. H. Amstead: *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, Metals-Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests: Metallography*, E18 – 2003, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshocken, PA, USA. (January 2004).
- [16] : C.W.Wegst, *Stahlschlüssel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH*, σελ. 99, Marbach, Germany, (1995)
- [17] : <http://www.metalravne.com/selector/steels/CK60.html> (18/09/2011).
- [18] : <http://buau.com.au/english/files/4140.pdf> (18/09/2011).
- [19] : ASTM, *“E384-05a Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 03.01, (2006).