



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**“Ανάλυση αστοχίας σε άξονα αντλίας ψύξης νερού”**

**Σπουδαστής: Κοβσένογλου Κυριάκος (Α.Μ. 45041)**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΡΙΑ: KARMEN MENTREA**

**ΑΙΓΑΛΕΩ  
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2019**

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, μελετά την πρόωρη και επανειλημμένη αστοχία που εμφανίζει ο άξονας της αντλίας ψύξης του κινητήρα ενός εμπορικού πλοίου. Έξι άξονες έχουν καταστραφεί σε διάστημα τριών μηνών και οι δύο τελευταίοι έχουν παραδοθεί για την μελέτη.

Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας μηχανολογικών εξαρτημάτων σύμφωνα με τον οργανισμό ASM. Προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, εφαρμόστηκαν μόνο τα απαραίτητα στάδια. Πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικές δοκιμές, όπως οπτική επισκόπηση με γυμνό μάτι και με στερεοσκόπιο, μέτρηση σκληρότητας, καθώς και καταστροφικές δοκιμές, όπως χημική ανάλυση υλικού και μεταλλογραφική ανάλυση δομής. Επιπλέον αναζητήθηκε το σημείο μέγιστης τάσης με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Και οι δυο άξονες έχουν αστοχήσει με κόπωση από ροπή και από υπερβολικές στρεπτικές τάσεις. Η θραύση τους ξεκίνησε από τον σφηνόδρομο στην πλευρά που ασφαλίζει η πτερωτή, όπου είναι το σημείο συγκέντρωσης μέγιστων τάσεων. Η αστοχία οφείλεται κυρίως σε λανθασμένη επιλογή υλικού και επισπεύστηκε εξαιτίας πλημμελούς μηχανουργικής κατεργασίας.

Λέξεις κλειδιά: ανάλυση αστοχίας, άξονας αντλίας, στρέψη, χάλυβας AISI 304

## **ABSTRACT**

This thesis examines the premature and repeated failure of the commercial engine's cooling pump shaft. Six shafts were fractured in-service, over three months. The last two pieces were examined.

The study was based on engineering failure analysis methodology according to the ASM organization. In order to extract safe conclusions, only the necessary steps were applied. The inspection includes historical data recording and visual inspection. Hardness measurements were carried out. Microstructure was examined by means of light microscopy. A finite element simulation was conducted in order to determine the stress concentration points. Chemical analysis was carried out. The shafts were manufactured from AISI 304 stainless steel. Low hardness of both pieces indicates insufficient mechanical properties. The findings strongly suggest that the shafts failed due to fatigue occurred by alternating torsional stresses. Fracture initiated at the keyway on the impeller, area also predicted as prone to crack by the finite elements analysis. Material selection and poor machining were found to be the main causes of failure.

Key words: fracture analysis, pump shaft, torsion, steel, AISI 304

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον κανονισμό σπουδών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, με εισήγηση και επίβλεψη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η δομή, η τεκμηρίωση και η παρουσίασή της έγινε κατά το δυνατόν σύμφωνα με τους κανόνες και τις οδηγίες του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης.

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση αστοχίας σε έναν άξονα αντλίας ψύξης κινητήρα εμπορικού πλοίου. Το συγκεκριμένο εξάρτημα έχει αστοχήσει επανειλημμένα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Η ανάλυση αστοχίας αναζητά τα κύρια αίτια που προκάλεσαν την καταστροφή του εξαρτήματος, μέσα από την επεξεργασία των δεδομένων και των συνθηκών που επικρατούσαν εκείνη την χρονική στιγμή. Τα δεδομένα και οι πληροφορίες αφορούν το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση του εξαρτήματος.

Τελικός στόχος της ανάλυσης είναι η εύρεση των αιτιών που οδήγησαν στη συγκεκριμένη αστοχία και στην κατανόηση των μηχανισμών που την προκάλεσαν. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι τυποποιημένη και ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα. Στο τέλος τα αποτελέσματα αξιολογούνται, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και δίνονται προτεινόμενες διορθωτικές κινήσεις. Οι διορθώσεις αυτές έχουν στόχο στην αποφυγή παρόμοιων αστοχιών και στην αύξηση του χρόνου ζωής του εξαρτήματος.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τρία κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στη μεθοδολογία και τα στάδια που ακολουθούνται σε μια μελέτη ανάλυσης αστοχίας. Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει περιεκτικά τα ήδη των χαλύβων και την ονομασία τους. Το τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο του πρώτου μέρους επικεντρώνεται στις αντλίες των πλοίων και αναλύει τις σημαντικότερες κατηγορίες.

Για την εκπόνηση του θεωρητικού μέρους χρησιμοποιήθηκε ελληνική και ξένη βιβλιογραφία (βιβλία, διαδικτυακές πηγές, πρότυπα, προδιαγραφές) η οποία παρατίθεται στο τέλος της πτυχιακής εργασίας.

Το δεύτερο μέρος της πτυχιακής εργασίας αποτελείται από τρία κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο, αρχικά παραθέτει τα ιστορικά δεδομένα και εν συνεχεία ξεκινά η προκαταρκτική εξέταση, πραγματοποιώντας οπτική επιθεώρηση, στερεοσκοπικό έλεγχο, σκληρομέτρηση, χημική ανάλυση και η χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την εύρεση του σημείου μέγιστης τάσης.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει τις καταστρεπτικές δοκιμές που εφαρμόστηκαν στους δύο άξονες, όπως κοπή, λείανση, στίλβωση, χημική προσβολή και ανάλυση μικροδομής με τη βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου. Το τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο του πειραματικού μέρους παρουσιάζει τα συμπεράσματα και προτείνει διορθωτικές κινήσεις για την αποφυγή παρόμοιων αστοχιών στο μέλλον.

Η τεχνογνωσία που ακολουθήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές, προέκυψε από μελέτη και εφαρμογή των προτύπων του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης ISO (International Organization for Organization) και του οργανισμού ASTM (American Society for Testing and Materials) αλλά και από την εμπειρία προηγούμενων πτυχιακών εργασιών του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών αντικειμένων του Τ.Ε.Ι. Πειραιά. Οι πειραματικές διαδικασίες και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας έγιναν από εξακριβωμένα όργανα διαφόρων εταιριών καθώς και βαθμονομημένα όργανα εντός του εργαστηρίου του Πανεπιστημίου Δυτικής

Αττικής, ώστε τα αποτελέσματα να οδηγήσουν σε ορθά συμπεράσματα. Η αξιοπιστία των μετρήσεων κρίνεται πολύ σημαντική τόσο για εκπαιδευτικούς λόγους όσο και για την αξιοπιστία των συμπερασμάτων και προτάσεων αντιμετώπισης.

Για την ολοκλήρωση του πειραματικού μέρους της πτυχιακής εργασίας, αξιοποιήθηκε η βοήθεια από εταιρίες και ιδιώτες εκτός Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Χωρίς τη βοήθεια αυτή κάποια σημαντικά μέρη πειραματικών διαδικασιών θα ήταν πρακτικά αδύνατον να πραγματοποιηθούν.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Οφείλονται θερμές ευχαριστίες σε όλες τις παρακάτω εταιρίες και εργαστήρια που συνεργάστηκαν για την πραγματοποίηση και ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας, καθώς και στους αναφερόμενους επιστήμονες, μηχανικούς και φοιτητές, όχι μόνο για τη συμβολή τους στο όλο κόστος των εργασιών αλλά και για την προσφορά τους στον γενικότερο σχεδιασμό και υλοποίηση της εργασίας.

- Στον Κ<sup>ο</sup>ν Πέτρο Μπουρνέλη, Μηχανολόγο Μηχανικό ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ και Αξιοματικό Εμπορικού Ναυτικού, για τη συμβολή του στη δημιουργία της συγκεκριμένης πτυχιακής, παραχωρώντας στο εργαστήριο, τους δύο άξονες που βασίστηκε η μελέτη από το εργασιακό του περιβάλλον. Επίσης θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για την για την προθυμία του, την άμεση βοήθεια και επικοινωνία, καθ' όλη τη διάρκεια της συγκεκριμένης πτυχιακής.
- Στο Κ<sup>ο</sup>ν Δημήτριο Παπαγεωργίου, Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π., υπεύθυνο ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε., εργαστηριακό συνεργάτη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την πολύτιμη βοήθειά του τόσο στη διενέργεια πειραματικών δοκιμών όσο και στην καθοδήγηση και το χρόνο που αφιέρωσε για τη σωστή εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας αλλά και τις προσωπικές συμβουλές και τα πράγματα που με δίδαξε.
- Στην Κ<sup>α</sup> Μέντρεα Κάρμεν, Δρ. Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό UTC-N (Technical University of Cluj-Napoca) και καθηγήτρια του μαθήματος Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την υποστήριξή της σε όλη τη διάρκεια της πτυχιακής εργασίας και όχι μόνο, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και την πολύτιμη βοήθειά της στην παρούσα εργασία αλλά και σε διαφορετικά μαθήματα στο παρελθόν.
- Στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, το οποίο πρόσφερε τον εξοπλισμό του στις υπηρεσίες της πτυχιακής εργασίας, όπου πραγματοποιήθηκαν σκληρομέτρηση, κοπή, χημική προσβολή, στερεοσκοπικός και μικροσκοπικός έλεγχος.
- Στην Κ<sup>α</sup> Κουκούλη Μαριάννα, Μηχανολόγο Μηχανικό ΤΕΙ Πειραιά και την εταιρία SPECTRUMLABS, κατά την επίσκεψη μου στα εργαστήριά τους, για την πολύτιμη βοήθεια που παρείχαν κατά τη διάρκεια της χημικής ανάλυσης, τόσο σε επίπεδο εξοπλισμού όσο και σε επίπεδο πληροφοριών που μου παρείχαν, βοηθώντας με στην ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας.
- Στον Κ<sup>ο</sup>ν Κουκλάκη Φίλιππο, τελειόφοιτο προπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την συνεργασία και την πολύτιμη βοήθειά του, κατά τον σχεδιασμό και την ανάλυση πεπερασμένων

---

στοιχείων με τη χρήση του προγράμματος SOLIDWORKS της εταιρίας DASAULT SYSTEMS

- Στον Κ<sup>ο</sup>ν Ραχούτη Ιωάννη, τελειόφοιτο προπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την υποστήριξή του στην προετοιμασία των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για μεταλλογραφικό έλεγχο.

## Περιεχόμενα

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	9
1. Η διαδικασία της Ανάλυσης Αστοχίας.....	9
1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Αστοχία.....	9
1.3 Ανάλυση Αστοχίας .....	11
1.4 Μη καταστροφικοί έλεγχοι.....	11
1.4.1 Συλλογή ιστορικών δεδομένων.....	11
1.4.2 Προκαταρκτική εξέταση του εξαρτήματος.....	12
1.4.3 Μακροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης .....	13
1.4.4 Μη καταστροφικές τεχνικές και μέθοδοι.....	14
1.5 Καταστροφικοί έλεγχοι .....	16
1.5.1 Επιλογή, συντήρηση και καθαρισμός των επιφανειών.....	16
1.5.2 Επιλογή και προετοιμασία των μεταλλογραφικών τμημάτων.....	17
1.5.3 Μικροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης .....	17
1.5.4 Μηχανικές δοκιμές.....	19
1.5.5 Προσομοίωση σε συνθήκες λειτουργίας.....	19
1.6 Χημική ανάλυση.....	20
1.7 Θραυστομηχανική .....	20
1.7.1 Ενδοκρυσταλλική θραύση .....	22
1.7.2 Περικρυσταλλική θραύση.....	24
1.8 Επίδραση αξιοπιστίας.....	24
2. Χάλυβες.....	25
2.1 Εισαγωγή .....	25
2.2 Ταξινόμηση των χαλύβων .....	25
2.2.1 Ταξινόμηση ανάλογα με τη χημική σύσταση .....	26
2.2.2 Ταξινόμηση ανάλογα με την κλάση ποιότητας .....	26
2.3 Ονοματολογία και τυποποίηση των χαλύβων .....	27
2.3.1 Γερμανικό σύστημα τυποποίησης.....	27
2.3.2 Αμερικανικό σύστημα τυποποίησης.....	28
2.4 Ανοξείδωτοι χάλυβες.....	28
2.4.1 Ορισμός.....	28
2.4.2 Ταξινόμηση ανοξείδωτων χαλύβων.....	29
2.5 Ανοξείδωτος χάλυβας AISI 304 .....	30
3. ΑΝΤΛΙΕΣ ΠΛΟΙΩΝ.....	30
3.1 Εισαγωγή .....	30

3.2 Είδη αντλιών.....	31
3.2.1 Αντλίες εκτοπίσεως.....	31
3.2.2 Αντλίες κεντρόφυγες.....	31
3.3 Εμβολοφόρες αντλίες .....	31
3.3.1 Αναρροφητικές ή καταθλιπτικές.....	31
3.3.2 Απλής ή διπλής ενέργειας. ....	31
3.3.3 Μονοκύλινδρες ή πολυκύλινδρες. ....	31
3.3.4 Οριζόντιες, κάθετες ή κεκλιμένες. ....	31
3.3.5 Χειροκίνητες, ατμοκίνητες, πετρελαιοκίνητες κλπ. ....	31
3.3.6 Απευθείας ή άμεσης μετάδοσης.....	31
3.3.7 Απλής ή συζευγμένης διάταξης. ....	31
3.4 Περιστροφικές αντλίες εκτοπίσεως.....	32
3.4.1 Οι πτερυγιοφόρες αντλίες .....	33
3.4.2 Αντλίες υγρών εμβόλων.....	33
3.4.3 Αντλίες έκκεντρου ελικοειδούς στροφείου.....	33
3.4.4 Γραναζωτές ή οδοντωτές αντλίες .....	33
3.4.5. Αντλίες με λοβούς.....	34
3.4.6. Αντλίες με κοχλίες .....	34
3.4.7. Περιστροφικές αντλίες.....	34
3.4.8. Περισταλτικές αντλίες .....	34
3.4.9. Αντλίες περιφερειακών εμβόλων.....	34
3.5 Φυγοκεντρικές αντλίες .....	34
3.5.1. Μονοβάθμιες αντλίες απλής αναρρόφησης.....	34
3.5.2 Πολυβάθμιες φυγοκεντρικές αντλίες με ηλεκτροκινητήρα .....	34
3.5.3 Φυγοκεντρικές αντλίες με ατμοστρόβιλο που τροφοδοτεί την κίνηση της αντλίας .....	35
3.5.4 Φυγοκεντρικές αντλίες κάθετης διάταξης δύο ή και περισσότερων βαθμίδων. ....	35
3.5.5 Φυγοκεντρικές αντλίες αυτόματης πλήρωσης.....	35
3.6 Αντλίες για την ψύξη εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης.....	35
3.6.1. Αντλίες γλυκού νερού ψύξης των χιτωνίων της μηχανής.....	35
3.6.2. Αντλίες ψύξης των εμβόλων της κύριας μηχανής .....	35
3.7 Φθορά και βλάβες αντλιών.....	35
3.8 Συντήρηση αντλιών .....	36
<b>B ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>38</b>
4. Προκαταρκτική εξέταση .....	38
4.1 Βασικά στοιχεία κινητήρα DK-20.....	38

---

4.2 Συλλογή ιστορικών δεδομένων .....	38
4.3 Οπτικός έλεγχος των εξαρτημάτων .....	40
4.4 Φωτογράφιση εξαρτήματος .....	41
4.4.1 Στρέψη .....	42
4.4.2 Αποσάθρωση .....	42
4.4.3 Μηχανουργική κατεργασία .....	44
4.5 Έλεγχος με στερεοσκόπιο .....	52
4.5.1 Άξονας N1 .....	52
4.5.2 Άξονας N2 .....	55
4.6 Μέτρηση σκληρότητας .....	58
4.7 Χημική ανάλυση .....	59
4.8 Εύρεση σημείου μέγιστης τάσης με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων .....	67
5. Καταστροφικός έλεγχος των αξόνων .....	71
5.1 Κοπή των δειγμάτων .....	71
5.2 Χημική προσβολή .....	72
5.2.1 Άξονας N1 .....	72
5.2.2 Άξονας N2 .....	72
5.3 Ανάλυση Μικροδομής .....	73
5.3.1 Άξονας N1 .....	73
5.3.2 Άξονας N2 .....	75
6. Συμπεράσματα .....	76



## A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 1. Η διαδικασία της Ανάλυσης Αστοχίας

#### 1.1 Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή, η ζωή και η καθημερινότητα του ανθρώπου, αλλάζει ριζικά σε σχέση με το παρελθόν, αφού πραγματοποιούνται τεράστιες επιστημονικές και τεχνολογικές αλλαγές. Αυτές όμως οι αλλαγές έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλών απαιτήσεων στις μηχανολογικές εφαρμογές. Η επιστήμη που αναλαμβάνει την ευθύνη να εξισορροπήσει και να βελτιώσει το χάσμα των επιστημονικών επιτευγμάτων και των μηχανολογικών εφαρμογών, είναι η επιστήμη της τεχνολογίας των υλικών. Από την επιστήμη αυτή εξαρτάται η αξιοπιστία, η ασφάλεια, η αισθητική και η επιτυχημένη απόδοση μιας παραγωγικής μονάδας. Κάθε παραγωγική μονάδα έχει κάποιους στόχους που πρέπει να επιτύχει. Για να εκπληρωθούν όμως αυτοί, πρέπει ο εκάστοτε μηχανικός να έχει υπόψιν του την πιθανότητα αστοχίας κάποιου εξαρτήματος ή ενός συνόλου εξαρτημάτων. Έτσι πρέπει να είναι σε θέση να μηδενίσει ή και να ελαχιστοποιήσει τις πιθανότητες αυτές. Όταν κάποιο εξάρτημα τίθεται σε λειτουργία, τότε όλες οι μελέτες, ο σχεδιασμός, οι προσομοιώσεις, οι προβλέψεις και οι υπολογισμοί που μέχρι εκείνη τη στιγμή ήταν σε θεωρητικό επίπεδο, δοκιμάζονται στον πραγματικό χρόνο και στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Εάν παρατηρηθεί αστοχία ενός εξαρτήματος κατά την λειτουργία του, τότε αυτό αφήνει αποδεικτικά στοιχεία και ενδείξεις. Όλα αυτά κατά την ανάλυσή τους, υποδεικνύουν τις όποιες βλάβες και δυσλειτουργίες του συστήματος που προκάλεσαν αυτό το αποτέλεσμα. Αυτές οι δυσλειτουργίες είναι πιθανό να έχουν προκληθεί κατά την διαδικασία κατασκευής του, κατά την επιλογή του υλικού από τα κριτήρια του σχεδιασμού, όπου περιλαμβάνουν τις οριακές συνθήκες του συστήματος, ή από την μακροχρόνια χρήση του.

Σε αυτό το σημείο, έρχεται και ο σημαντικός ρόλος της ανάλυσης αστοχίας, που με την ετυμηγορία της, βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος, προτείνοντας διάφορες τροποποιήσεις και βελτιώσεις. Τέτοιες τροποποιήσεις είναι για παράδειγμα στο σχεδιασμό, την διαδικασία παραγωγής, τον τρόπο χρήσης, τα χρησιμοποιούμενα υλικά, με αποτέλεσμα να συμβάλλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής των προϊόντων.

#### 1.2 Αστοχία

Αστοχία γενικά μπορούμε να πούμε ότι είναι το χάσμα μεταξύ προσδοκιών και της πραγματικής απόδοσης. Αντιπροσωπεύει μια δυσμενή κατάσταση κατά την οποία ένα εξάρτημα, υλικό, ή ένα ολόκληρο σύστημα δεν επιτυγχάνει να ικανοποιήσει την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του.

Δομικά στοιχεία, εξαρτήματα και στοιχεία μηχανών μεταλλικής κατασκευής, είναι πολύ πιθανόν να αστοχήσουν να προσφέρουν το έργο για το οποίο δημιουργήθηκαν, κυρίως για τους εξής τρεις τρόπους:

- Εξαιτίας της μεγάλης ελαστικής παραμόρφωσης. Αυτή η παραμόρφωση γίνεται αντιληπτή λόγω της μεγάλης παρέκκλισης από το αρχικό σχήμα ή από την απότομη παρέκκλιση από το αρχικό σχήμα (buckling), υπό συνθήκες σταθερής και ασταθούς ισορροπίας αντίστοιχα.
- Λόγω διαρροής ή εξαιρετικά μεγάλης πλαστικής παραμόρφωσης.

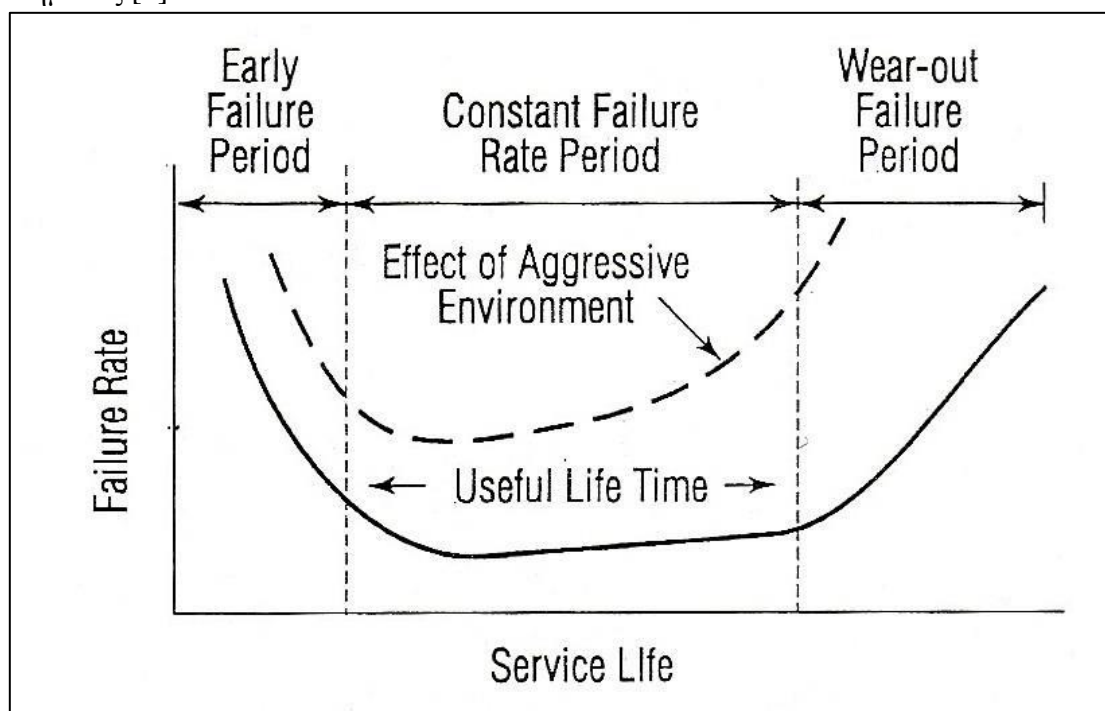
Κατά την υπέρβαση του ορίου ελαστικότητας παρουσιάζεται η διαρροή, που ουσιαστικά δημιουργεί πλαστική παραμόρφωση στο υλικό του εξαρτήματος με αποτέλεσμα αυτό να παρεκκλίνει από τη χρήση του. Για όλκιμα υλικά και υπό συνθήκες στατικής φόρτισης σε

θερμοκρασία δωματίου, η διαρροή σπάνια οδηγεί σε θραύση διότι το υλικό εργοσκληρύνεται και χρειάζεται όλο και μεγαλύτερο φορτίο. Από την άλλη μεριά, σε θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες της θερμοκρασίας δωματίου, τα μέταλλα δεν παρουσιάζουν εργοσκληρυνση αλλά παραμορφώνονται πλαστικά.

- Εξαιτίας της θραύσης.

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες θραύσεων που κατατάσσονται τα μέταλλα που αστοχούν. Η πρώτη κατηγορία είναι η απότομη ψαθυρή θραύση, όπου τα ψαθυρά υλικά σπάζουν, υπό στατικά φορτία με ελάχιστη έως καμία ένδειξη πλαστικής παραμόρφωσης. Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή της κόπωσης ή της προοδευτικά εξελισσόμενης θραύσης, όπου είναι και η πιο κοινή στα στοιχεία μηχανών και οφείλεται σε κρίσιμες τιμές εφελκυστικών τάσεων. Τέλος η τρίτη κατηγορία είναι αυτή της επιβραδυνόμενης θραύσης όπου πραγματοποιείται όταν ένα μέταλλο που εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες και καταπονείται σε στατική φόρτιση για μεγάλη χρονική περίοδο.

Οι αποτυχίες είναι αναπόφευκτες κατά τη διάρκεια ζωής κάθε συστήματος και αυτές οι αποτυχίες μπορούν να ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό. Τα διαδοχικά χρονικά χαρακτηριστικά της αστοχίας μπορούν να συγκριθούν με αυτά της ανθρώπινης ζωής (Εικόνα 1.1). Η καμπύλη της αστοχίας μπορεί να χαρακτηριστεί και ως “μπανιέρα” λόγω της μορφής της και χωρίζεται σε τρεις ζώνες. Η πρώτη ζώνη είναι η πρόωρη περίοδος αστοχίας όπου μπορεί να οφείλεται σε ελλιπή και μη έγκυρο σχεδιασμό, κατασκευαστικά ελαττώματα, σφάλματα εγκατάστασης και συναρμολόγησης ακόμη και σφάλματα κατά την περίοδο συντήρησης. Στην δεύτερη ζώνη, ακολουθούν οι ονομαζόμενες βλάβες λειτουργίας ή αστοχίες σταθερού ρυθμού. Αυτού του είδους οι αποτυχίες είναι τυχαίες και κατανέμονται με ομοιόμορφο τρόπο. Η τρίτη ζώνη οφείλεται στη φυσιολογική φθορά των εξαρτημάτων. Η συχνότητα εμφάνισης αστοχίας στη ζώνη αυτή είναι υψηλή δεδομένου ότι τα περισσότερα από τα εξαρτήματα θα έχουν αποδώσει τη διάρκεια ζωής τους. Ο στόχος όλων των μηχανολόγων – σχεδιαστών είναι να ελαχιστοποιήσουν την αποτυχία στην πρώτη ζώνη όπου προαναφέρθηκε παραπάνω και να επεκτείνουν όσο είναι δυνατόν την ωφέλιμη ζωή του συστήματος [1].



Εικόνα 1.1 Γράφημα ποσοστού αποτυχίας συναρτήσει της συνολικής ζωής του έργου [1].

### 1.3 Ανάλυση Αστοχίας

Μια μελέτη ανάλυσης αστοχίας έχει ποικίλα αντικείμενα. Μια έρευνα μπορεί να γίνει με σκοπό να εντοπιστεί η βλάβη και το γεγονός που οδήγησε σε αστοχία αλλά το σημαντικότερο είναι να εντοπιστεί ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την αξιοπιστία του προϊόντος έτσι ώστε να αποφευχθούν πρόωρες αστοχίες. Περιστασιακά γίνονται έρευνες ανάλυσης αστοχίας για ακαδημαϊκούς σκοπούς αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη η σημασία της διεξαγωγής των ερευνών αυτών καθώς μια αστοχία μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα σε ένα ατύχημα επιβατικού αεροσκάφους, μπορεί να προκληθεί η απώλεια ανθρώπινης ζωής, οικονομικές και περιβαλλοντικές καταστροφές και υλικές ζημιές. Οι περισσότερες περιπτώσεις αστοχίας σε μεταλλικά υλικά μπορούν να αναλυθούν επαρκώς από μεταλλουργούς αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις οι οποίες είναι σύνθετες και μπορούν να μελετηθούν μόνο από ειδικούς μηχανολόγους διαφόρων εξειδικευμένων κλάδων. Παρακάτω ακολουθούν τα βήματα της ανάλυσης τα οποία βοηθούν τον αναλυτή να φτάσει στο τελικό αίτιο το οποίο προκάλεσε την αστοχία. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε περίπτωσης, τα στάδια αυτά χρησιμοποιούνται αναλόγως. Τα στάδια αυτά είναι:

- Συλλογή ιστορικών δεδομένων και συλλογή δειγμάτων.
- Προκαταρκτική εξέταση του εξαρτήματος – τμήματος που έχει αστοχήσει (οπτικός έλεγχος και καταγραφή των συνθηκών και δεδομένων κατά την αστοχία).
- Πραγματοποίηση μη καταστρεπτικών δοκιμών.
- Πραγματοποίηση μηχανικών δοκιμών.
- Επιλογή, ταυτοποίηση, καθάρισμα και συντήρηση όλων των δειγμάτων.
- Μακροσκοπική εξέταση και ανάλυση (επιφάνειες θραύσης, δευτερεύουσες ρωγμές, άλλα επιφανειακά φαινόμενα).
- Μικροσκοπική εξέταση και ανάλυση των επιφανειών θραύσης.
- Ανάλυση τάσεων για να καθοριστεί η πραγματική τάση που οδήγησε στην αστοχία.
- Ανάλυση θραύσης.
- Προσδιορισμός του μηχανισμού αστοχίας.
- Μεταλλογραφία και ανάλυση μικροδομής.
- Χημική ανάλυση (διάβρωση επιφανείας τοπική ή συνολική, αποθέματα ή επικαλύψεις και ηλεκτρονικό – μικροσκοπική ανάλυση).
- Έλεγχος υπό συνθήκες προσομοίωσης λειτουργίας.
- Συγκέντρωση όλων των αποδεικτικών στοιχείων, σύνοψη αυτών και εξαγωγή συμπερασμάτων υπό μορφή αναφοράς.

### 1.4 Μη καταστροφικοί έλεγχοι

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι ανήκουν στις πιο σημαντικές ομάδες μεθόδων ασφαλείας και πραγματοποιούνται προκειμένου να αποκτηθούν πληροφορίες σχετικά με τα ελαττώματα που μπορεί να έχει το εξάρτημα τόσο στην επιφάνεια του όσο και στον πυρήνα του. Αυτές οι πληροφορίες ανακτώνται, χωρίς να επηρεάζουν το εξεταζόμενο υλικό, ενώ παράλληλα γίνονται εκτιμήσεις μέσα από μετρήσεις, σχετικά με την αξιοπιστία των υλικών και για το αν αυτά είναι κατάλληλα ή όχι για χρήση. Οι διαδικασίες και οι μέθοδοι που ακολουθούνται στις μη καταστροφικές δοκιμές, περιγράφονται με τη μορφή αυστηρών οδηγιών που έχει ορίσει ο κατασκευαστής – ελεγκτής. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται από εξειδικευμένους τεχνικούς, οι οποίοι έχουν την αντίστοιχη εκπαίδευση και διαθέτουν την απαραίτητη πιστοποίηση που είναι αναγνωρισμένη παγκοσμίως [2].

#### 1.4.1 Συλλογή ιστορικών δεδομένων

Η έρευνα που αναλύει τις αιτίες και τους λόγους για τους οποίους αστόχησε ένα εξάρτημα, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη της, όλους τους παράγοντες τις λεπτομέρειες και

τις πληροφορίες που σχετίζονται με αυτήν. Όλες αυτές οι πληροφορίες σχετίζονται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και το ιστορικό συντήρησης του εξαρτήματος, οι συνθήκες λειτουργίας του, οι συνθήκες και το περιβάλλον που αστόχησε το εξάρτημα.

**Ιστορικό κατασκευής.** Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να καταγραφούν πληροφορίες σχετικά με τον σχεδιασμό και την κατασκευή του εξαρτήματος που αστόχησε. Αυτές αφορούν τις τεχνικές προδιαγραφές και τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν, τα σχέδια και οι λειτουργίες κατασκευής. Συγκεκριμένα αναφέρονται και οι μηχανουργικές κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν, όπως συγκολλήσεις, θερμικές κατεργασίες, πρότυπα και προδιαγραφές της αγοράς.

**Ιστορικό συντήρησης.** Η διαθεσιμότητα του πλήρους ιστορικού συντήρησης εξαρτάται από το βαθμό που αυτό ακολουθείται σωστά πριν από την αστοχία του εξαρτήματος που μελετάμε. Ένα πλήρες ιστορικό βοηθά τον μελετητή να διαπιστώσει ευκολότερα και γρηγορότερα τις αιτίες αστοχίας. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του είναι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες στους οποίους πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή, όπως για παράδειγμα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας, στο διαβρωτικό περιβάλλον. Δυστυχώς όμως στις περισσότερες περιπτώσεις, οι πληροφορίες του ιστορικού δεν είναι επαρκείς για διάφορους λόγους. Έτσι ο αναλυτής είναι υποχρεωμένος να συντάξει κατά προσέγγιση το ιστορικό, βασισμένος στα ελλιπή στοιχεία που έχει στη διάθεσή του αλλά κυρίως στις γνώσεις και στην εμπειρία του.

**Φωτογραφικό αρχείο.** Το φωτογραφικό υλικό ενός ελαττωματικού δοκιμίου που έχει αστοχήσει είναι πολύ σημαντικό, καθώς βοηθάει σε μια ακριβή ανάλυση. Κάποια λεπτομέρεια που σε πρώτη φάση μοιάζει αμελητέα σύμφωνα με μια προκαταρκτική έρευνα, σε μετέπειτα στάδιο μπορεί να έχει σημαντικό ρόλο. Έτσι χαρακτηρίζεται ως απαραίτητο και ζωτικής σημασίας, η καταγραφή του περιβάλλοντος αστοχίας του εξαρτήματος, αλλά και του ίδιου εκείνη χρονική στιγμή. Οι λήψεις πρέπει να είναι επαγγελματικής ποιότητας, όσο αυτό είναι δυνατόν. Ο αναλυτής θα πρέπει να ακολουθήσει κατάλληλες τεχνικές ώστε να αποτυπώσει τα φυσικά χρώματα υπό τον κατάλληλο φωτισμό, εστιάζοντας στα κατάλληλα σημεία και κάνοντας διακριτή την τάξη μεγέθους του αντικειμένου.

**Επιλογή δειγμάτων.** Τα δείγματα που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να επιλέγονται από τον ερευνητή και να λαμβάνονται από τον χώρο της αστοχίας, πριν την έναρξη της κύριας διαδικασίας. Αυτά, πρέπει να είναι κατάλληλα για το σκοπό της έρευνας, ώστε να αντικατοπτρίζουν ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά της αποτυχίας. Κατά την αναζήτηση των δειγμάτων, θα πρέπει να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των βασικών στοιχείων, που θα οδηγήσουν στην εξακρίβωση των παραγόντων της αστοχίας. Κάποια από τα πρότυπα που καθορίζουν τη διαδικασία συλλογής δειγμάτων είναι τα E620, E860, E1020, E678 κατά ASTM.

#### 1.4.2 Προκαταρκτική εξέταση του εξαρτήματος

Το τμήμα που έχει αστοχήσει, συμπεριλαμβανομένου όλων των τεμαχίων του, πριν ακολουθήσει τη διαδικασία του καθαρισμού, υποβάλλεται σε μακροσκοπική εξέταση. Αρκετές φορές, θραύσματα και ακαθαρσίες, μπορούν να αποτελέσουν σημαντικά στοιχεία για τον προσδιορισμό της αιτίας της αστοχίας. Η προκαταρκτική εξέταση ασχολείται κυρίως με την οπτική εξέταση και την φωτογράφιση των θραύσεων.

**Οπτική εξέταση.** Η προκαταρκτική εξέταση ξεκινά με την οπτική επιθεώρηση. Το γυμνό μάτι, έχει την ικανότητα να εστιάζει σε εξαιρετικό βάθος, να ανιχνεύσει μεταβολές σε χρώμα και υφή, αλλά και να εξετάζει μεγάλες περιοχές σε σύντομο χρονικό διάστημα. Μερικά από τα παραπάνω προτερήματα δεν αξιοποιούνται όταν χρησιμοποιείται κάποια οπτικό-ηλεκτρονική συσκευή. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στις επιφάνειες θραύσης

και τις διαδρομές που ακολουθούν οι ρωγμές στην περιοχή αυτή. Η παρατήρηση μίας δυσλειτουργίας ή μιας αντικανονικής κατάστασης, είναι μείζονος σημασίας ενώ ταυτόχρονα πρέπει να αξιολογείται ο βασικός σχεδιασμός και η κατασκευή του εξαρτήματος. Τέλος οποιαδήποτε σημαντικά στοιχεία ή χαρακτηριστικά καταγράφονται γραπτά, με σχέδια ή με φωτογραφίες.

**Φωτογράφιση θραύσεων.** Η ευρύτερη φωτογράφιση ολόκληρου του εξαρτήματος που έχει αστοχήσει καθώς και των θραυσμάτων του, αποτελεί το βασικό στοιχείο μελέτης της κατηγορίας αυτής. Έτσι το εξάρτημα, αφού εξεταστεί προσεκτικά από διάφορες γωνίες, καταγράφεται φωτογραφικά το μέγεθος και η κατάσταση των επιφανειών θραύσης, χρησιμοποιώντας άμεσο φωτισμό ή σκοτεινό πεδίο, στην κατάλληλη γωνία. Μία λεπτομερής φωτογράφιση της θραύσης από διάφορες οπτικές γωνίες, με τη χρήση του κατάλληλου φωτισμού, ώστε να φωτιστούν τα σωστά σημεία του εξαρτήματος αλλά ταυτόχρονα κάνοντας και τις αντίστοιχες μεγεθύνσεις, ολοκληρώνει την παραπάνω διαδικασία. Τέλος, είναι αναγκαίος ο συσχετισμός των φωτογραφικών στοιχείων, ώστε να οδηγηθούμε σε γρήγορα συμπεράσματα.

#### 1.4.3 Μακροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης

Σε κάθε ανάλυσης αστοχίας, η μακροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης είναι πολύ σημαντική. Υπάρχει δυνατότητα να διεξαχθεί σε διάφορες μεγεθύνσεις και πραγματοποιείται αξιοποιώντας όλα τα φυσικά και τεχνικά μέσα όπως με γυμνό μάτι, με μεγεθυντικό φακό ή φακό χειρός, με ένα χαμηλής ισχύος στεροσκοπικό μικροσκόπιο ή ένα SEM (στα τελικά στάδια). Προκειμένου να φωτογραφηθούν δείγματα (έως  $M \times 20$ ) απαιτείται επαγγελματική φωτογραφική μηχανή και ειδικοί φακοί (τύπου Macro) για υψηλότερες μεγεθύνσεις, ενώ είναι αναγκαία και τα παρελκόμενα που επηρεάζουν το φωτισμό του τεμαχίου που φωτογραφίζεται όπως και το περιβάλλον γύρω από αυτό.

Σε κάποιες περιπτώσεις το εξεταζόμενο δοκίμιο έχει μεγάλες διαστάσεις και βάρος για τη μεταλλογραφική ανάλυση και τον τεμαχισμό του με αποτέλεσμα να κωλύεται η διαδικασία. Έτσι η μακροσκοπική ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με την φωτογράφιση και εξέταση των αντιγράφων που δημιουργούνται σύμφωνα με τη μέθοδο καθαρισμού των θραύσεων.

Σημαντικές πληροφορίες μπορούν να αντληθούν κατά την εξέταση της επιφάνειας θραύσης σε χαμηλής ισχύος μεγέθυνση. Προκειμένου να καθοριστεί ο τρόπος και το σύστημα που προκάλεσε την αστοχία, είναι απαραίτητη η σάρωση της εξωτερικής επιφάνειας δίπλα από τη ρωγμή. Η αστοχία μπορεί να δημιουργήσει μία σχετικά επίπεδη θραύση στην οποία εμφανίζεται μέγιστη εφελκυστική τάση, κάτω από συνθήκες που αφορούν τη μηδενική παραμόρφωση στον άξονα z. Επίσης πραγματοποιείται μια διατμητική θραύση με κλίση περίπου 45 μοίρες, εάν υπερισχύσουν οι συνθήκες που αφορούν τη μηδενική τάση στον άξονα z. Όμως επειδή οι συνθήκες αυτές αφορούν κυρίως τη μηδενική παραμόρφωση και μηδενική τάση στον άξονα z, θεωρούνται ιδανικές καταστάσεις που σπάνια εμφανίζονται κατά τη λειτουργία. Πολλές θραύσεις που είναι επίπεδες στο κέντρο, περιτριγυρίζονται από ένα πλαίσιο διατμητικής θραύσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι που κατά την δοκιμή εφελκυσμού η μία επιφάνεια σχηματίζει κρατήρα ενώ η άλλη κώνο.

Συχνά, για να περιγραφεί ένας τομέας της διατμητικής θραύσης χρησιμοποιείται ο όρος “χείλος διατμήσεως”. Ο συγκεκριμένος όρος όμως δεν θεωρείται σωστός μιας και σε ελάχιστες περιπτώσεις οι διατμητικές θραύσεις είναι αποτέλεσμα καθαρής διάτμησης. Ο όρος θραύση 45 μοιρών είναι κάπως προσεγγιστικός μιας και η γωνία μεταξύ του κύριου άξονα και της επιφάνειας θραύσης απέχει κάποιες μοίρες από αυτή την τιμή, ενώ η

επιφάνεια θραύσης, υπάρχει περίπτωση να βρίσκεται σε ένα κυρτό επίπεδο. Επιπλέον, σπειροειδής επιφάνειες θραύσεων μπορεί να παράγονται εξαιτίας των στρεπτικών τάσεων ή λόγω κόπωσης.

Η μακροσκοπική εξέταση μπορεί να καθορίσει την κατεύθυνση και το πλήθος των ρωγμών και σε κάποιες περιπτώσεις ακόμη και τον λόγο της αστοχίας. Τα σημάδια τύπου V είναι ορατά και χαρακτηριστικά σε περιπτώσεις ψαθυρών θραύσεων. Η κατεύθυνση στην οποία αναπτύσσονται οι ρωγμές, είναι συνήθως σε μακρινή απόσταση από αυτά τα σημάδια. Αυτά εμφανίζονται επειδή οι ρωγμές επεκτείνονται από το αρχικό τους στάδιο και εξελίσσονται. Τα ίχνη αυτής της επέκτασης είναι τα σημάδια τύπου V, ενώ είναι πολύ σημαντικά καθώς καθορίζουν την κατεύθυνση ανάπτυξης των ρωγμών.

Στις περιπτώσεις που οι επιφάνειες θραύσης παρουσιάζουν επίπεδες και διατημητικές θραύσεις, το πιθανότερο σενάριο είναι να πραγματοποιήθηκαν οι επίπεδες θραύσεις.

Η χαμηλής ισχύος εξέταση των επιφανειών που έχουν υποστεί θραύση, μπορεί να αποκαλύψει αρκετές φορές, μια διαφορετική οπτική της περιοχής αυτής. Έτσι μπορεί να γίνουν ορατά σημάδια κόπωσης, σημάδια διάβρωσης υπό τάση και θραύσεις λόγω ευθραυστότητας του υδρογόνου.

#### 1.4.4 Μη καταστροφικές τεχνικές και μέθοδοι

Κάποιες από τις δημοφιλέστερες μη καταστροφικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι εξής:

**Έλεγχος μαγνητικών σωματιδίων.** Αυτός ο έλεγχος επικεντρώνεται στον εντοπισμό, επιφανειακών ή μη, ασυνεχειών και σφαλμάτων που δεν είναι διακριτές με γυμνό μάτι, σε σιδηρομαγνητικά υλικά. Η μέθοδος απλή είναι αρκετά απλή και βασίζεται στον μαγνητισμό σωματιδίων που έχουν απλωθεί στην επιφάνεια της θραύσης. Αρχικά μαγνητίζεται το δοκίμιο σε όσο το δυνατόν περισσότερες από τις διαστάσεις του. Στο σημείο της ρωγμής δημιουργείται έντονο μαγνητικό πεδίο που έλκει τα σωματίδια αυτά, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται κατά μήκος της. Τα σωματίδια αυτά είναι φθορίζοντα και γίνονται διακριτά με χρήση λάμπας UV ή έχουν έντονη χρωματική αντίθεση ώστε να είναι διακριτά στο φως της ημέρας. Σε περίπτωση που εξετάζονται μεγάλες επιφάνειες με απλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιούνται φορητοί μαγνήτες, ενώ σε περίπτωση που είναι μικρές και με πολύπλοκο εμβαδόν, γίνεται χρήση σταθερών σταθμών με ειδικά στηρίγματα. Κάποια από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η ταχύτητα των αποτελεσμάτων, η φορητότητα του εξοπλισμού, το σχετικά χαμηλό της κόστος αλλά και η αξιοπιστία της, δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος της επιφάνειας που εξετάζεται, ενώ είναι η πιο διαδεδομένη και κατάλληλη στον εντοπισμό επιφανειακών ασυνεχειών. Τέλος τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται αυστηρά σε σιδηρομαγνητικά υλικά, απαιτείται καθαρισμός πριν και μετά την εφαρμογή της, ενώ δεν είναι δυνατόν να διαπιστωθούν πιθανές ασυνέχειες στο βαθύ εσωτερικό του υλικού.

**Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά.** Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται προκειμένου να εντοπιστούν ασυνέχειες – ρωγμές στο εσωτερικό των υλικών. Βασίζεται στην ικανότητα των υγρών να εισέρχονται στις λεπτές ρωγμές και να παραμένουν εκεί. Τα υγρά αυτά μπορούν να διαδοθούν σε ρωγμές και ελαττώματα πάχους έως και ενός μικρόμετρου (1μm), με το τριχοειδές φαινόμενο. Είναι φωτεινού χρώματος ή περιέχει φωσφορούχα σωματίδια που υπο την υπεριώδη ακτινοβολία φωσφορίζουν και γίνονται διακριτά. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι με αυτή τη μέθοδο μπορούν να εκλεχθούν μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά εκτός από τα πορώδη υλικά που έχουν διαβρωθεί επιφανειακά. Τα βήματα της του ελέγχου με διεισδυτικά υγρά είναι:

- Καθαρισμός της υπό εξέταση επιφάνειας, ώστε οι ασυνέχειες να είναι προσιτές.
- Εφαρμογή του διεισδυτικού υγρού και αναμονή σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ώστε αυτό να δράσει.
- Παρατήρηση των χρωματικών διαφοροποιήσεων ή εφαρμογή του κατάλληλου φωτισμού προκειμένου να γίνουν διακριτά τα σημεία της ασυνέχειας.
- Εξέταση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.
- Καθαρισμός της επιφάνειας από τα διεισδυτικά προς αποφυγή του κινδύνου της διάβρωσης.

**Έλεγχος με δινορρεύματα.** Ο συγκεκριμένος έλεγχος είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε υλικά που άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου που ασκείται κάθετα σε μία επιφάνεια, δημιουργώντας έτσι δινορρεύματα παράλληλα προς την επιφάνεια αυτή. Τα δινορρεύματα με τη σειρά τους δημιουργούν δεύτερο μαγνητικό πεδίο το οποίο αντιτίθενται στο πρώτο και εξασθενεί. Τα σημεία όπου έχουν ρωγμές, παρακάμπτονται από τα δινορρεύματα με αποτέλεσμα στο σημείο αυτό το δεύτερο μαγνητικό πεδίο να είναι εξασθενημένο κι έτσι να γίνεται εντοπισμός της ατέλειας.

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα αυτού του ελέγχου είναι η αξιοπιστία και το χαμηλό του κόστος, υπάρχει δυνατότητα αυτοματοποίησής του σε περίπτωση που τα εξεταζόμενα κομμάτια έχουν συμμετρία και τέλος ο εξοπλισμός δεν χρειάζεται να βρίσκεται σε άμεση επαφή με το τεμάχιο.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι περιορίζεται σε αγωγιμα υλικά, έχει μικρό βάθος σάρωσης, ορισμένες ενδείξεις υπάρχει περίπτωση να μην καταγραφούν λόγω γεωμετρίας και τέλος απαιτείται αναγνωρισμένος κώδικας αναφοράς για τη χρήση του συγκεκριμένου ελέγχου.

**Έλεγχος με υπερήχους.** Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό, τον έλεγχο και την αξιολόγηση εσωτερικών ασυνεχειών σε μέταλλα και άλλα υλικά. Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι η παραγωγή μιας δέσμης ήχου υψηλής συχνότητας με κατεύθυνση προς το εξεταζόμενο υλικό. Σε περίπτωση που υπάρχουν ασυνέχειες σε αυτό, η δέσμη υψηλής συχνότητας ανακλάται. Αυτή η ασυνέχεια εμφανίζεται σαν μια απότομη κατακόρυφη γραμμή σε μια CRT οθόνη. Η δέσμη που ανακλάται από διάφορες ασυνέχειες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαπιστωθεί η παρουσία και η θέση των σφαλμάτων, το πάχος ή το βάθος τους από την επιφάνεια. Στις περισσότερες αναλύσεις αστοχίας εφαρμόζεται η συγκεκριμένη μέθοδος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλων χυτών και σφυρήλατων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η φορητότητα της, η ικανότητα υψηλής διεισδυτικότητας, η υψηλή ευαισθησία της σε διαστάσιμα ελαττώματα και η άμεση κοινοποίηση των αποτελεσμάτων της. Τα κύρια μειονεκτήματά της είναι ότι ο εξοπλισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο από κάποιον εξειδικευμένο χειριστή και πως η προς εξέταση επιφάνεια πρέπει να είναι κατάλληλα προετοιμασμένη ενώ απαιτείται χρήση ειδικού υγρού.

**Ραδιογραφικός έλεγχος.** Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ακτίνες X ή ακτίνες Γ οι οποίες διοχετεύονται στο προς εξέταση δείγμα και αποτυπώνονται σε φιλμ. Αφού αποτυπωθούν όλα τα σημεία ενδιαφέροντος μας στο φιλμ, αυτό εξετάζεται με την τοποθέτησή του μπροστά από μια πηγή φωτός. Η ένταση του φωτός που διαπερνά το φιλμ πρέπει να είναι ανάλογη της πυκνότητας του δείγματος και του μήκους της διαδρομής της ακτινοβολίας. Έτσι οι ανοιχτόχρωμες περιοχές της πλάκας αντιστοιχούν σε περιοχές πυκνότερου δείγματος, ενώ οι σκουρόχρωμες αποτυπώνουν μία ρωγμή ή ένα ελάττωμα που εκτείνεται κατά τη διεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της ραδιογραφίας είναι η ικανότητά της να ανιχνεύει τις εσωτερικές ασυνέχειες του υλικού αλλά και να παρέχει σταθερό φωτογραφικό αρχείο. Όμως ορισμένα είδη ατελειών είναι δύσκολο να ανιχνευτούν με αυτή τη μέθοδο. Συγκεκριμένα δημιουργείται πρόβλημα σε περιπτώσεις που ο προσανατολισμός των υπό εξέταση τεμαχίων, δεν είναι παράλληλος προς τη δέσμη της ακτινοβολίας [3].

## 1.5 Καταστροφικοί έλεγχοι

### 1.5.1 Επιλογή, συντήρηση και καθαρισμός των επιφανειών

Η σωστή επιλογή των επιφανειών θραύσης, η συντήρηση και ο καθαρισμός τους, είναι ζωτικής σημασίας προκειμένου να προστατευθούν αυτά τα σημαντικά αποδεικτικά στοιχεία που θα μελετηθούν κατά την ανάλυση της αστοχίας. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να έχουμε απώλεια ή καταστροφή αυτών. Οι επιφάνειες των θραύσεων μπορούν να υποστούν μηχανική ή χημική φθορά. Η μηχανική φθορά μπορεί να προκύψει κατά την επαφή της επιφάνειας θραύσης με άλλα αντικείμενα στον αποθηκευτικό χώρο ή κατά τη διάρκεια της πραγματικής θραύσης, κατά τη λειτουργία, την αφαίρεση ή τη μεταφορά της για ανάλυση. Η χημική φθορά προκαλείται από την έκθεση της επιφάνειας θραύσης στο περιβάλλον και το συνηθέστερο φαινόμενο είναι να υποστεί διάβρωση.

**Καθαρισμός.** Οι επιφάνειες θραύσεις καθαρίζονται μόνον όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Ο καθαρισμός πραγματοποιείται συνήθως σε περιπτώσεις που χρειάζεται να αφαιρεθούν ακαθαρσίες ή συντρίμμια από την επιφάνεια αλλά και στην περίπτωση που θα γίνει εξέταση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Οι διαδικασίες καθαρισμού περιλαμβάνουν:

- Χρήση ξηρού αέρα ή βούρτσας με μαλακή τρίχα
- Χρήση οργανικών διαλυτών με τη διαδικασία της εμβάπτισης ή με πίδακα
- Μεταχείριση με ήπια οξέα ή αλκαλικά διαλύματα ανάλογα με το μέταλλο.

Μία από τις πιο χρήσιμες μεθόδους, σε περίπτωση που η επιφάνεια έχει υποστεί διάβρωση, είναι ο καθαρισμός με ένα αντίγραφο οξικού άλατος. Μία λωρίδα στρώματος οξικού άλατος με πάχος περίπου 1mm και κατάλληλου μεγέθους, μαλακώνεται από την εμβάπτιση στην ακετόνη και τοποθετείται στην επιφάνεια της θραύσης. Η αρχική λωρίδα υποστηρίζεται από ένα κομμάτι μη μαλακωμένου οξικού άλατος ενώ έπειτα το αντίγραφο πιέζεται πάνω στην επιφάνεια της θραύσης χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους σφικτήρες. Ο χρόνος ξήρασης, θα εξαρτηθεί από τον βαθμό στον οποίο μαλακώθηκε το υλικό αντιγραφής, ενώ αργότερα το ξηρό αντίγραφο θα απομακρυνθεί από την επιφάνεια θραύσης με ειδική τσιμπίδα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν ληφθεί ένα καθαρό και μη μολυσμένο αντίγραφο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι πως τα θραύσματα που απομακρύνονται από την επιφάνεια της θραύσης, μπορούν να διατηρηθούν άθικτα και να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές αναλύσεις

**Τεμαχισμός.** Τα εργαλεία εξέτασης όπως τα σκληρόμετρα, τα οπτικά και ηλεκτρονικά μικροσκόπια, περιορίζουν το μέγεθος του δείγματος που εισέρχεται σε αυτά. Έτσι πολλές φορές είναι αναγκαίο να διαχωριστεί το εξεταζόμενο αντικείμενο προκειμένου πραγματοποιηθεί η χρήση των μηχανημάτων. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγονται να αφαιρεθούν τμήματα που δεν έχουν κάποιο ενδιαφέρον σχετικά με την αστοχία και να διατηρηθούν τα σημεία εκείνα που δίνουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη θραύση και τη διάδοσή της. Είναι σημαντικό να καταγράφονται φωτογραφίες ή σκίτσα που να αποτυπώνουν την κατάσταση του τεμαχίου πριν και μετά τον τεμαχισμό.

Κατά την κοπή η περιοχή της θραύσης που μας ενδιαφέρει, πρέπει να προστατεύεται. Ο διαχωρισμός πρέπει να γίνει προσεκτικά ώστε οι επιφάνειες της θραύσης και οι διπλανές τους περιοχές να μην καταστραφούν ή αλλοιωθούν. Η ξηρότητα της επιφάνειας θραύσης



πρέπει να διατηρείται όσο αυτό είναι δυνατόν. Η κοπή πρέπει να γίνει σε μία ασφαλή απόσταση από την επιφάνεια θραύσης ώστε να αποφευχθεί η αλλαγή της μικροδομής του μετάλλου αλλά και να αποφευχθεί η εναπόθεση λιωμένου μετάλλου επάνω στην επιφάνεια της θραύσης.

Για μεγάλα τεμάχια, η κοινή μέθοδος κοπής είναι η φλογοκοπή, ενώ ειδικά πριόνια, σιδηροπριόνια και τροχοί μπορούν να κόψουν ένα ευρύ φάσμα διαφόρων μεγεθών. Πολλές φορές η ξηρά κοπή προτιμάται έναντι αυτής με χρήση ψυκτικών επειδή αυτά μπορεί να διαβρώσουν την περιοχή της θραύσης.

Όμως σε ορισμένες περιπτώσεις ξηράς κοπής υπάρχει περίπτωση να χρησιμοποιηθεί ψυκτικό για να αποφευχθεί θερμική ζημιά στην περιοχή της θραύσης.

### 1.5.2 Επιλογή και προετοιμασία των μεταλλογραφικών τμημάτων

Η μεταλλογραφική ανάλυση των επιφανειών που έχουν στιλβωθεί και προσβληθεί χημικά είναι αναγκαία διαδικασία και πραγματοποιείται με τη βοήθεια οπτικών μικροσκοπίων και άλλων ηλεκτρόνιο-οπτικών τεχνικών. Η μεταλλογραφική εξέταση παρέχει στον αναλυτή πληροφορίες για τη δομή του δοκιμίου κι έτσι μπορεί με τη σειρά του να τη συγκρίνει με τη θεωρητική-επιθυμητή ώστε να εξάγει τα συμπεράσματά του. Το μικροσκόπιο μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη μέθοδο κατασκευής του εξαρτήματος, τις θερμικές κατεργασίες που έχει υποστεί κατά τη δημιουργία ή κατά τη λειτουργία του, όπως και ανωμαλίες οι οποίες έχουν προκαλέσει την πρόωρη αστοχία του. Επίσης έχει τη δυνατότητα να μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη διάβρωση την οξειδωση, την εργοσκληρυνση των επιφανειών αλλά και την έκτασή τους. Όσον αφορά τις ρωγμές, γίνεται διακριτός ο τρόπος διάδοσής τους και αποκαλύπτονται παράγοντες που είναι υπεύθυνοι γι' αυτό.

Κάθε αστοχία αποτελεί μεμονωμένο γεγονός και γι' αυτό το λόγο η λήψη των δειγμάτων πρέπει να είναι γενικευμένη, ώστε να πραγματοποιηθεί σωστά η μικροσκοπική εξέταση. Είναι σημαντικό όμως να καθοριστεί από πού προέρχεται το δείγμα, δηλαδή αν βρίσκεται πλησίον μιας επιφάνειας θραύσης, μιας ρωγμής ή μιας ατέλειας, καθώς υπάρχουν διαφοροποιήσεις.

Οι περιοχές των ρωγμών, αποτελούν πηγή σημαντικών πληροφοριών. Η μελέτη γίνεται κυρίως στα ακραία σημεία αυτών, καθώς εκεί λόγω της καταστροφής του υλικού, αποκαλύπτονται πληροφορίες γι' αυτό. Συγκεκριμένα μπορεί να προσδιοριστεί η περικρυσταλλική ή διακρυσταλλική διαδρομή που έχει ακολουθήσει η ρωγμή.

Για τη μελέτη θραύσης που προήλθε από κόπωση, η δειγματοληψία επικεντρώνεται στην περιοχή της θραύσης.

### 1.5.3 Μικροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης

Η μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων οδηγεί τον μελετητή σε περαιτέρω ανάλυση των προβλημάτων που έχουν οδηγήσει στην αστοχία. Κατά την ανάλυση της μικροδομής παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τη θερμική κατεργασία των συστατικών, την πορεία των ρωγμών, τις παραμορφώσεις και άλλες πληροφορίες που σχετίζονται με τα συστατικά. Είναι πολύ σημαντικό, το δείγμα που επιλέγεται να εξεταστεί μικροσκοπικά, να είναι σε θέση να εξάγει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση του υλικού αλλά και να αποκαλύψει τα πραγματικά αίτια της αστοχίας. Σε οποιαδήποτε περίπτωση παρατήρησης, πρέπει η επιφάνεια μελέτης να έχει προετοιμαστεί κατάλληλα ώστε να αξιολογηθούν κάποια ειδικά γνωρίσματα όπως για παράδειγμα οι γραμμές ροής, η ύπαρξη πορώδους, το τελείωμα της επιφάνειας, στο οπτικό μικροσκόπιο. Η μικροσκοπική εξέταση και η αναλυτική παρατήρηση των επιφανειών θραύσης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα οπτικό

μικροσκόπιο, ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) ή ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM).

**Οπτική μικροσκοπία.** Χρησιμοποιείται κυρίως για θραυστογραφία χαμηλής μεγέθυνσης λόγω της περιορισμένης ανάλυσης της ( $\sim 10^{-6}$  m), ενώ δεν μπορεί να εστιάσει στις τραχιές επιφάνειες λόγω του μικρού βάθους του πεδίου της.

**Ηλεκτρονική μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης (TEM).** Τα δείγματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας πρέπει να είναι ιδιαίτερα λεπτά, ώστε η δέσμες των ηλεκτρονίων να μπορέσουν να διαδοθούν στο εσωτερικό της επιφάνειας θραύσης. Γι' αυτό το λόγο δημιουργούνται πιστά αντίγραφα πολύ λεπτού πάχους, της επιφάνειας θραύσης. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ χρήσιμη αφού λύνει πολλά προβλήματα που άλλες μέθοδοι δεν μπορούν να προσεγγίσουν. Τέτοια είναι ο προσδιορισμός της σύνθεσης των κρυστάλλων, της δομής του κρυστάλλου ή τον προσανατολισμό των μορίων δεύτερης φάσης. Τα συγκεκριμένα προβλήματα απλοποιούνται εάν τα μόρια εξάγονται από τη μήτρα τους και αργότερα υποστηρίζονται στο μικροσκόπιο χρησιμοποιώντας ένα αντίγραφο.

**Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).** Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, είναι από τα πιο διαδεδομένα και αποτελεσματικά όργανα για την έρευνα της μικροδομής των μεταλλικών υλικών. Είναι πιο αποτελεσματικό σε σχέση με το οπτικό μικροσκόπιο και αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο εύρος ανάλυσης που διαθέτει. Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι η εστίαση της ηλεκτρονικής του δέσμης σε πολύ μικρές επιφάνειες του δείγματος, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα ανάδειξης μηχανισμών διαφοροποίησης της μέσης χημικής σύστασης του υλικού. Επίσης έχει τη δυνατότητα να απεικονίζει τη γεωμετρία της επιφάνειας των μεταλλικών δοκιμίων που έχουν αστοχήσει με θραύση.

Η ανάλυσή είναι του επιπέδου των μικρομέτρων ( $\mu\text{m}$ ) και η μεγέθυνσή του επεκτείνεται από  $M \times 10000$  μέχρι και  $M \times 60000$ , μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το χάσμα μεταξύ του οπτικού και του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διερχόμενης δέσμης. Σε αντίθεση με το οπτικό μικροσκόπιο, το βάθος εστίασης είναι μεγαλύτερο και αυτό οφείλεται στο άνοιγμα της δέσμης.

Στον τομέα της θραυστογραφίας είναι απαραίτητη η χρήση των SEM. Το μεγάλο βάθος εστίασης, η δυνατότητα μεταβαλλόμενης μεγέθυνσης πέρα από ένα μεγάλο εύρος, η μη καταστρεπτική προετοιμασία των δειγμάτων που πρόκειται να εξεταστούν, η υψηλής ευκρίνειας φωτογραφίες που αποτυπώνει και η τρισδιάστατη εμφάνιση των θραυστογραφιών, κάνουν το SEM απαραίτητο και μοναδικό εργαλείο για τη μελέτη αστοχίας και την έρευνα θραύσης.

Η ερμηνεία της θραυστογραφίας απαιτεί την κατανόηση των μηχανισμών θραύσης. Όμως υπάρχει μόνο ένας μικρός αριθμός βασικών χαρακτηριστικών που μπορούν να διαχωρίσουν και να κάνουν αναγνωρίσιμο έναν ιδιαίτερο τρόπο αστοχίας.

- Ψαθυρή ή περικρυσταλλική θραύση, παρατηρείται σε χάλυβες που έχουν υποστεί επαναφορά και είναι ιδιαίτερα εύθραυστοι. Η θραύση τους οφείλεται στον διαφορισμό ενός εύθραυστοι είδους στα όρια των κόκκων, στο περικρυσταλλικό ράγισμα από διάβρωση και τάση ή στην ευθραυστότητα υδρογόνου.
- Κυψελωτή θραύση, χαρακτηριστικό των αποτυχιών λόγω μεγάλων τάσεων που υπόκεινται μέταλλα και κράματα.
- Έδρες σχισίματος, είναι χαρακτηριστικές των ψαθυρών διακρυσταλλικών θραύσεων, μετάλλων και κραμάτων του κυβικού χωροκεντρωμένου (BCC) και της μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικού (HCP) συστήματος.

#### 1.5.4 Μηχανικές δοκιμές

**Σκληρότητα.** Η μέτρηση της σκληρότητας είναι η πιο απλή μηχανική δοκιμή και χαρακτηρίζεται ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στη διαδικασία της ανάλυσης αστοχίας. Στο πλήθος των μηχανολογικών εφαρμογών, η σκληρότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να αξιολογήσει τις θερμικές κατεργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί, να προσδιορίσει τα όρια εφελκυσμού των χαλύβων, την αύξηση ή τη μείωση της σκληρότητας που προήλθε από την υπερθέρμανση του υλικού, την απανθράκωση και άλλα. Ουσιαστικά είναι η ιδιότητα του μετάλλου που προσδιορίζει κατά πόσο αυτό θα παραμορφωθεί πλαστικά όταν ασκηθεί σε αυτό φορτίο. Όσο μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας έχει ένα μέταλλο, τόσο μεγαλύτερη αντοχή έχει στην παραμόρφωση.

Η μέτρηση της σκληρότητας μπορεί να αναλυθεί σε μάκρο-, μικρο- ή νάνο- κλίμακα, ανάλογα με τις δυνάμεις που ασκούνται στο υπό εξέταση μέταλλο και το αποτύπωμα που εμφανίζεται. Η μέτρηση της μάκρο-σκληρότητας των μετάλλων, είναι μια σύντομη και σχετικά απλή μέθοδος παρατήρησης και καταγραφής των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού χρησιμοποιώντας ένα μικρό μέρος του ως δείγμα. Επιπλέον χρησιμοποιείται ευρέως για τον ποιοτικό έλεγχο των επιφανειών που έχουν υποστεί κατεργασίες. Ο έλεγχος της σκληρότητας χαρακτηρίζεται ως μη καταστροφικός, εκτός από τις περιπτώσεις που εξετάζονται ειδικά δείγματα με τη μέθοδο της μικρο-σκληρομέτρησης.

Για τη λήψη μετρήσεων σκληρότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σταθερές εργαστηριακές συσκευές αλλά και φορητές που είναι εύκολο να μεταφερθούν στον χώρο εξέτασης. Υπάρχουν τρεις τύποι ελέγχου σκληρότητας και χρησιμοποιούνται με μεγάλη ακρίβεια από τις βιομηχανίες. Είναι οι έλεγχοι σκληρότητας τύπου BRINELL, τύπου ROCKWELL, και τύπου VICKERS.

**Δοκιμή εφελκυσμού.** Η συγκεκριμένη δοκιμή είναι από τις σημαντικότερες τεχνικές μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων. Κατά τη δοκιμή αυτή, ένα φορτίο του οποίου η τιμή αυξάνει αργά και βαθμιαία με την πάροδο του χρόνου, τείνει να επιμηκύνει το προς εξέταση δοκίμιο. Το φορτίο αυτό εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια και κατά μήκος του μεγαλύτερου άξονα του εξεταζόμενου τεμαχίου. Η μηχανική ανταπόκριση του υλικού καταγράφεται στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού. Χαρακτηριστικό μέρος της δοκιμής είναι η δημιουργία "λαιμού" στο υλικό, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό. Η δοκιμασία λαμβάνει μέρος σε θερμοκρασία δωματίου.

Με τη δοκιμή αυτή εξακριβώνεται εάν το υλικό είναι καλής ποιότητας και ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις. Η παραμόρφωση του υλικού περιορίζεται στην στενή περιοχή του κέντρου (λαιμός) του δείγματος. Η ολκιμότητα του υλικού υπολογίζεται από το μέγεθος της επιμήκυνσής του και μετριέται με το επιμηκυσμόμετρο, που είναι προσαρμοσμένο επάνω στη συσκευή. Το μηχάνημα του εφελκυσμού είναι κατασκευασμένο ώστε να επιμηκύνει το εξεταζόμενο αντικείμενο με έναν σταθερό ρυθμό, καταγράφοντας τις μεταβολές του φορτίου καθώς και τις προκαλούμενες επιμηκύνσεις. Η διαδικασία διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα και χαρακτηρίζεται ως καταστρεπτική μιας και το δοκίμιο παραμορφώνεται μόνιμα και σπάει. Τέλος, όπως προαναφέραμε με τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί από τη συσκευή, κατασκευάζεται η καμπύλη τάσης εφελκυσμού-παραμόρφωσης.

#### 1.5.5 Προσομοίωση σε συνθήκες λειτουργίας

Κατά την προσπάθεια διεξαγωγής συμπερασμάτων σε μία έρευνα, είναι απαραίτητο να γίνει η προσπάθεια μίμησης των συνθηκών εκείνων που οδήγησαν σε αστοχία το εξεταζόμενο εξάρτημα. Πολλές φορές όμως η προσομοίωση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί από αρκετά δύσκολη έως μη εφικτή, μιας και χρειάζεται συγκεκριμένος εξοπλισμός σε κάθε

περίπτωση, αλλά ακόμη κι αν αυτό είναι εφικτό υπάρχει περίπτωση να μην έχουν καταγραφεί αναλυτικά ή να είναι αδύνατο να επαναληφθούν οι συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον υπάρχει περίπτωση κατά την προσομοίωση να πραγματοποιηθούν σοβαρά λάθη που μπορεί να προκύψουν από την προσπάθεια να μειωθεί ο χρόνος της δοκιμής ή να αυξηθεί η θερμοκρασία ή η διάβρωση με τεχνητούς και όχι φυσικούς τρόπους. Έτσι ακόμη κι αν πραγματοποιηθεί η προσομοίωση, υπάρχει περίπτωση τα αποτελέσματα να είναι εσφαλμένα.

Όταν γίνονται κατανοητοί όλοι οι περιορισμοί της προσομοίωσης αλλά και οι μεταβλητές που αντιμετωπίζονται σε συνθήκες λειτουργίας, τότε όλη αυτή η διαδικασία μπορεί να έχει αποτέλεσμα. Τα οφέλη της προσομοίωσης είναι ότι μελλοντικά μπορεί να αποφευχθεί παρόμοιου τύπου αστοχία ή έστω να επεκταθεί με κάποιο τρόπο η διάρκεια ζωής του εξαρτήματος, ακόμη κι αν κάποια στιγμή αστοχήσει.

## 1.6 Χημική ανάλυση

Κατά την έρευνα της ανάλυσης αστοχίας, είναι απαραίτητο, το εξεταζόμενο υλικό να υποστεί τη διαδικασία της χημικής ανάλυσης ώστε να εξακριβωθούν οι ιδιότητές του. Πολλές φορές είναι λογικό να υπάρξουν μικρές αποκλίσεις από τις τυπικές και καθορισμένες περιεκτικότητες, όμως αυτό δεν έχει πρωτεύοντα ρόλο στη συγκεκριμένη μελέτη. Η χημική ανάλυση, σπάνια αποκαλύπτει την πραγματική αιτία της αστοχίας, μιας και ελάχιστες είναι οι περιπτώσεις όπου το υλικό όσον αφορά την περιεκτικότητα και τη χημική σύσταση καθίσταται ελλαττωματικό ή ακατάλληλο.

Όμως κάποιες φορές, όπου στο υλικό παρατηρείται διάβρωση ή διάβρωση υπό τάση, τότε είναι αναγκαία η χημική ανάλυση σε οποιοδήποτε μέσον ή προϊόν διάβρωσης με το οποίο το εξεταζόμενο υλικό έρχεται σε επαφή. Αυτή η αναγκαιότητα μπορεί τελικά να καθορίζει στη συγκεκριμένη περίπτωση, την αιτία της αρχικής αστοχίας. Επίσης, ορισμένα αέρια, παρόλο που δεν φαίνονται ούτε υπάρχει η δυνατότητα να ανιχνευθούν κατά τη χημική ανάλυση, υπάρχει πιθανότητα να επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες κάποιων υλικών και κυρίως των μετάλλων. Για παράδειγμα, το οξυγόνο και το άζωτο ευθύνονται για πρόωρη γήρανση, ενώ το υδρογόνο αυξάνει την ευθραυστότητα των υλικών, ιδιαίτερα κατά την απορρόφηση του στις συγκολλήσεις.

Κάποιες από τις κυριότερες και πιο διαδεδομένες μεθόδους χημικής ανάλυσης είναι οι εξής:

- Φασματοσκοπία εκπομπής
- Υπέρυθρες και υπεριώδης φασματοσκοπίες
- Φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης
- Φασματοσκοπία Auger, Mossbauer, LEISS, SIMS
- Περίθλαση ακτινών – X (XRD)

Οι δοκιμές με τις οποίες πραγματοποιείται η διαδικασία της χημικής ανάλυσης, χαρακτηρίζονται ως σημειακές και ποιοτικές. Πραγματοποιούνται σε πολλά και διαφορετικά σημεία του εξεταζόμενου υλικού ενώ δίνεται μεγάλη έμφαση στα σημεία περιμετρικά του σημείου ή των σημείων που έχουν αστοχήσει. Οι δοκιμές αυτές συνήθως απαιτούν μικρό εξοπλισμό, εκτελούνται γρήγορα ενώ δεν απαιτούν εκτεταμένες γνώσεις χημείας, ενώ η μόνη απαίτηση είναι ότι η ουσία που εξετάζεται πρέπει να είναι αναμίξιμη.

## 1.7 Θραυστομηχανική

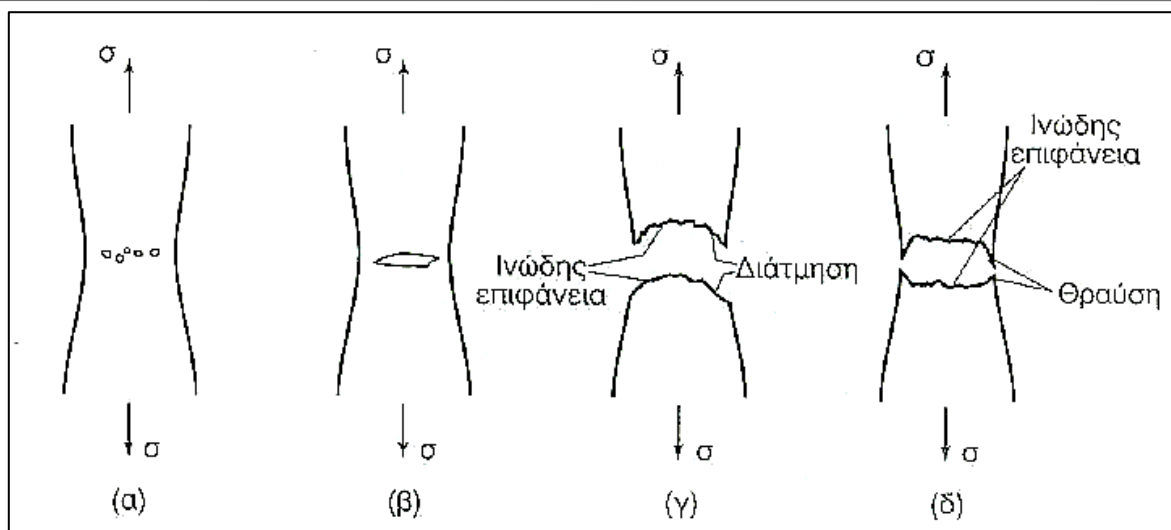
Παλαιότερα, οι μηχανικοί σχεδίαζαν ένα έργο, μια κατασκευή, ένα μεμονωμένο εξάρτημα με την υπόθεση ότι όλα τα στοιχεία και τα υλικά που απαρτίζουν την κατασκευή είναι τα ιδανικά και στην πραγματικότητα, σύμφωνα με τις θεωρητικές ιδιότητές τους. Στην

σύγχρονη εποχή είναι φανερό ότι αυτή η φιλοσοφία δεν ισχύει καθώς έχει αποδειχτεί από επιστήμονες μεταλλουργούς, ότι ατέλειες πάντα θα υπάρχουν όσο καλή μπορεί να είναι η σχεδίαση του έργου, το υλικό και η τελική παραγωγή του για το στάδιο λειτουργίας. Η θραυστομηχανική έχει ζωτικό ρόλο στην εκτίμηση των ελαττωμάτων έχουν να κάνουν με το μέγεθος της παραμόρφωσης λόγω διαφόρων τάσεων, των αρχικών ελαττωμάτων και ατελειών, αλλά και αυτών που υποκύπτουν σε μη ορατά σημεία των υλικών. Οι περισσότερες τεχνικές που εφαρμόζονται, μεγάλο βαθμό εξαρτώνται από τις μη καταστρεπτικές μεθόδους προκειμένου να προσδιοριστεί η θέση και το μέγεθός των ατελειών.

Η επιστήμη της θραυστομηχανικής έχει ως σκοπό να αναλύσει με μαθηματικό τρόπο τη μηχανική διεργασία που οδηγεί στην αστοχία ενός εξαρτήματος με θραύση. Θραύση γενικά ονομάζεται ο διαχωρισμός ενός τεμαχίου σε δύο ή περισσότερα μέρη ο οποίος προκλήθηκε από την επίδραση μιας δυναμικής ή στατικής φόρτισης. Οι επιφάνειες που προκύπτουν μετά την θραύση καλούνται επιφάνειες θραύσης. Τα είδη των θραύσεων σε ομοαξονική φόρτιση είναι η ψαθυρή θραύση και η όλκιμη θραύση. Ψαθυρή είναι αυτή όπου κατά την θραύση δεν παρατηρείται επιμήκυνση ή σημαντική μείωση της διατομής στο σημείο αυτό. Με κριτήριο την παραμόρφωση αυτό το είδος θραύσης διακρίνεται σε τρεις τύπους. Αρχικά έχουμε την ψαθυρή θραύση τύπου 1 όπου δεν υπάρχει καθόλου παραμόρφωση και το μέγεθος των ρωγμών είναι μεγαλύτερο από αυτό του μεγέθους των κόκκων του υλικού. Η ψαθυρή θραύση τύπου 2 όπου η τελική θραύση προέρχεται από την ύπαρξη μικρής κλίμακας παραμόρφωση η οποία μπορεί να είναι εμφανής σε μικροσκόπιο. Τέλος η ψαθυρή θραύση τύπου 3 είναι αυτή στην οποία υπάρχει εμφανής παραμόρφωση της διατομής αλλά είναι μικρότερη από το 10% της αρχικής. Όσον αφορά την όλκιμη θραύση, είναι αυτή η οποία για να επέλθει η τελική θραύση του υλικού δημιουργείται σημαντική μείωση τη διατομής του υλικού και συνεπώς εμφανής πλαστική παραμόρφωση. Στην όλκιμη παραμόρφωση έχουμε αρχικά κοντά στην κρίσιμη περιοχή θραύσης δημιουργία μικροκενών (α) όπου σε δεύτερο στάδιο αυτά τα μικροκενά ενώνονται (β) και τελικά έχουμε την τελική θραύση η οποία είναι είτε με διάρρηξη των άκρων (δ) είτε με διάτμηση (γ) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.2 Παράδειγμα ψαθυρής θραύσης άξονα [4].



Εικόνα 1.3 Στάδια όλκιμης θραύσης [4].

Ένα εξάρτημα για να φτάσει στο κρίσιμο της αστοχίας και τελικά να διαχωριστεί σε δύο η περισσότερα κομμάτια σημαίνει ότι υπάρχει κάποιος παράγοντας ο οποίος προκάλεσε αυτό το γεγονός. Είναι γνωστό ότι τα μέταλλα και τα κράματα τα οποία κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι πολυκρυσταλλικά και η ρωγμή μπορεί να ακολουθήσει δύο πορείες εσωτερικά στο υλικό. Αυτές οι δύο πορείες είναι ενδοκρυσταλλικές ή περικρυσταλλικές. Στην ενδοκρυσταλλική πορεία η ρωγμή προέρχεται από το εσωτερικό των κόκκων και η πορεία της εξαρτάται από την ελαττωμένη αντοχή εντός των κόκκων. Στην περίπτωση της περικρυσταλλικής πορείας η ρωγμή αρχίζει πάνω από τα όρια των κόκκων δίχως να επηρεάζει το εσωτερικό τους. Αυτή η περίπτωση συνήθως υφίστανται όταν η αντοχή των κόκκων στα όριά τους είναι διαφορετική συγκριτικά με αυτήν στο εσωτερικό τους. Αναλόγως με την πορεία της ρωγμής υπάρχουν δύο κατηγορίες που χωρίζουν τη μορφή των μηχανισμών θραύσης. Η πρώτη κατηγορία αφορά την ενδοκρυσταλλική πορεία, που οδηγεί στη λεγόμενη ενδοκρυσταλλική θραύση και η δεύτερη κατηγορία αφορά την περικρυσταλλική πορεία που οδηγεί στη λεγόμενη περικρυσταλλική θραύση.

Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κατά τη διάρκεια της θραύσης, η ρωγμή να αλλάξει πορεία με αποτέλεσμα εάν έχει ενδοκρυσταλλική πορεία να μεταπηδήσει στον περικρυσταλλική και το αντίστροφο. Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση των υποκατηγοριών αυτών των δύο αυτών πορειών.

### 1.7.1 Ενδοκρυσταλλική θραύση

Οι μηχανισμοί θραύσης της ενδοκρυσταλλικής πορείας είναι τέσσερις και είναι οι εξής:

- Θραύση κατά θύλακες (dimple rupture).

Όταν η θραύση προέρχεται από την υπερφόρτιση, τα κράματα αστοχούν ακολουθώντας τον μηχανισμό συνένωσης μικροκενών. Η πορεία της ρωγμής αρχίζει από αυτά τα μικροκενά και εξελίσσεται κάνοντας συνένωση με τα υπόλοιπα κυρίως σε σημεία ασυνέχειας μειώνοντας έτσι σημαντικά την αντοχή του υλικού. Τέτοια σημεία ασυνέχειας μπορεί να είναι εγκλείσματα, όρια κόκκων, επίπεδα αποχωρισμού και θέσεις συσσώρευσης γραμμοαταξιών. Το αποτέλεσμα της συνένωσης των μικροκενών είναι οι κυπελόμορφες εσοχές, οι οποίες ονομάζονται θύλακες. Το μέγεθος αυτών εξαρτάται από την κατανομή και τον αριθμό των μικροκενών, ενώ το σχήμα τους εξαρτάται από την εντατική κατάσταση μέσα στο υλικό και διαφοροποιείται αναλόγως την καταπόνηση. Όσον αφορά το σχήμα των θυλάκων, σε περίπτωση αξονικού εφελκυσμού έχουν ισοαξονική εμφάνιση, σε περίπτωση διατμητικής καταπόνησης έχουν επιμηκυνόμενη εμφάνιση αλλά προς αντίθετες

κατευθύνσεις, ενώ σε θραύση εφελκυστικής σχισμής έχουν παραβολοειδείς θύλακες όμως στην ίδια κατεύθυνση με το σημείο έναρξης της θραύσης.

Μελετώντας το σχήμα των θυλάκων μπορούμε να προσδιορίσουμε με ασφάλεια τη διεύθυνση στην οποία διαδίδεται η ρωγμή.

- Θραύση αποχωρισμού (cleavage rupture).

Στην περίπτωση του αποχωρισμού, υφίστανται η προώθηση κατά μήκος των κρυσταλλογραφικών επιπέδων τα οποία είναι και τα επίπεδα διαχωρισμού. Η θραύση αυτού του τύπου είναι χαμηλής ενέργειας και οι ρωγμές αποχωρισμού μπορεί να παρατηρηθούν σε σημεία όπου παρεμποδίζεται η ολίσθηση του κρυστάλλου. Οι συνήθεις περιοχές εμφάνισης είναι στα όρια των κόκκων, στις τομές μεταξύ δίδυμων και επιπέδων ολίσθησης, στα εγκλείσματα και σωματίδια δευτερογενών φάσεων. Ο αποχωρισμός, ουσιαστικά είναι ένας μηχανισμός αστοχίας και δεν μας δείχνει την πλαστικότητα του υλικού, μιας και μπορεί να εμφανιστεί και σε ιδιαίτερα όλκιμα υλικά. Οι διάφορες ατέλειες στα πολυκρυσταλλικά υλικά διαμορφώνουν κάποια αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά στην επιφάνεια του αποχωρισμού. Κάποια από αυτά είναι: τα βήματα, τα ίχνη ποταμών, οι μορφές φτερών, οι γραμμές Wallner, τα ίχνη γλώσσας. Τα ίχνη ποταμών εμφανίζονται συνήθως στο εσωτερικό των κόκκων και ουσιαστικά ενώνει τις ρωγμές του αποχωρισμού. Όσο η ρωγμή αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κόκκου, αυξάνεται το πλάτος και το μήκος της ενώνοντας έτσι τα επίπεδα αποχωρισμού, παίρνοντας κατά κάποιο τρόπο τη μορφή ποταμού. Τα ίχνη αυτά ακολουθούν τον προσανατολισμό, της ρωγμής αποχωρισμού, και μπορούν να αλλάξουν ανά πάσα στιγμή.

Οι μορφές των φτερών, εμφανίζονται ως σημάδια στο επίπεδο της ρωγμής και στο σημείο που πυκνώνουν μας προϊδεάζουν το σημείο έναρξης της ρωγμής.

Τα ίχνη γλώσσας, δείχνουν την απόκλιση του επιπέδου ρωγμής αποχωρισμού καθώς προσπερνά ένα όριο μεταξύ διδυμίας παραμόρφωσης και του μητρικού πλέγματος.

Όσον αφορά τις γραμμές Wallner, αυτές εμφανίζονται όταν οι ρωγμές αποχωρισμού ενός προωθούμενου μετώπου, αντιδρούν με τα κύματα των ελαστικών πεδίων του υλικού, λόγω της παρουσίας δευτερογενών ψαθυρών φάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας κυματοειδούς επιφάνειας που διασταυρώνεται με τα παράλληλα βήματα του αποχωρισμού.

Η τελευταία υποκατηγορία αφορά την θραύση με μερικό αποχωρισμό. Ο μερικός αποχωρισμός είναι ουσιαστικά ένα μείγμα της συνένωσης μικροκενών και του αποχωρισμού. Οι πληροφορίες που μπορούμε να αντλήσουμε από αυτόν τον μηχανισμό, αφορούν το σημείο έναρξης της θραύσης και τα βήματα (βαθμίδες) αποχωρισμού που προοδευτικά αναμειγνύονται μέσω των γεφυρών σχισμών των γειτονικών περιοχών συνένωσης μικροκενών. Επιπλέον πρέπει να αναφέρουμε στο μερικό αποχωρισμό δεν παρατηρείται εμφανές όριο μεταξύ της επιφάνειας αποχωρισμού και της περιοχής συνένωσης μικροκενών.

- Θραύση με σχισμή (tearing rupture).

Ο μηχανισμός αυτός έχει τη μορφή τοπικής θραύσης και αυτό εμφανίζεται όταν αρχίζουν να δημιουργούνται μικρές περιοχές οι οποίες θραύονται με πλαστική ροή ή σχηματισμό λαιμού. Συνήθως σχηματίζονται γέφυρες σχισμών.

- Η θραύση από κόπωση.

Είναι από τους βασικότερους μηχανισμούς θραύσης καθώς είναι ο πιο απρόβλεπτος και μπορεί να εμφανιστεί κατά την διάρκεια λειτουργίας του εξαρτήματος, επιφέροντας σημαντικές ζημιές σε όλο το σύνολο λειτουργίας. Είναι γνωστό ότι η θραύση επέρχεται μετά από επαναλαμβανόμενη φόρτιση.

Το πρώτο στάδιο της κόπωσης είναι η ύπαρξη της τάσης που δημιουργεί επαναλαμβανόμενο συντονισμό κατά χιλιάδες φορές. Έτσι γίνεται συσσώρευση της τάσης αυτής στον κρύσταλλο με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μικρορωγμή σε αυτόν. Στο δεύτερο στάδιο έχουμε την εξέλιξη αυτής της ρωγμής η οποία συνήθως είναι κάθετη προς την

διεύθυνση του εφελκυσμού και παράλληλη της διατμητικής συνιστώσας. Στο τρίτο και τελικό στάδιο, μετά την εξέλιξη της ρωγμής έχουμε την ασυνέχεια στο υλικό, μείωση της ωφέλιμης διατομής, με αποτέλεσμα την τελική θραύση του τεμαχίου

### 1.7.2 Περικρυσταλλική θραύση

Οι μηχανισμοί θραύσης της περικρυσταλλικής πορείας είναι δύο και είναι οι εξής:

- Θραύση από την παρουσία δευτερογενών φάσεων.

Σε αυτή την περίπτωση ο αποχωρισμός προκαλείται από τις δευτερογενείς θραύσεις στα όρια των κόκκων οι οποίες είναι μικρής αντοχής.

- Θραύση από την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων.

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που ευνοούν τη θραύση ενός κράματος είναι οι εξής:

1. Η συνδυασμένη φόρτιση (ύπαρξη τάσης) και διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η διάβρωση είναι ένα σημαντικό φαινόμενο το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπό όψη και κατά τον σχεδιασμό αλλά και κατά το στάδιο της συντήρησης καθώς μια κατασκευή μπορεί να είναι ικανή να φέρει τις απαιτούμενες φορτίσεις αλλά να αστοχήσει αυτής.
2. Η παρουσία υδρογόνου αποτελεί παράγοντα πρόκλησης αστοχίας στις βιομηχανικές κατασκευές. Εξαιτίας του μικρού ατομικού μεγέθους και του υψηλού συντελεστή διάχυσης, έχει την ικανότητα να διατρέχει στα όρια των κόκκων, με αποτέλεσμα να δημιουργείται περιοχή με αυξημένη πίεση. Έτσι προκαλείται περικρυσταλλική θραύση του υλικού.
3. Η κόπωση υπό διαβρωτικό περιβάλλον.

Το υλικό καθώς εκτίθεται στο εξωτερικό περιβάλλον έχοντας την επίδραση του αέρα και της υγρασίας δημιουργείται επιτάχυνση της ρωγμής και μείωση των απαιτούμενων κύκλων φόρτισης.

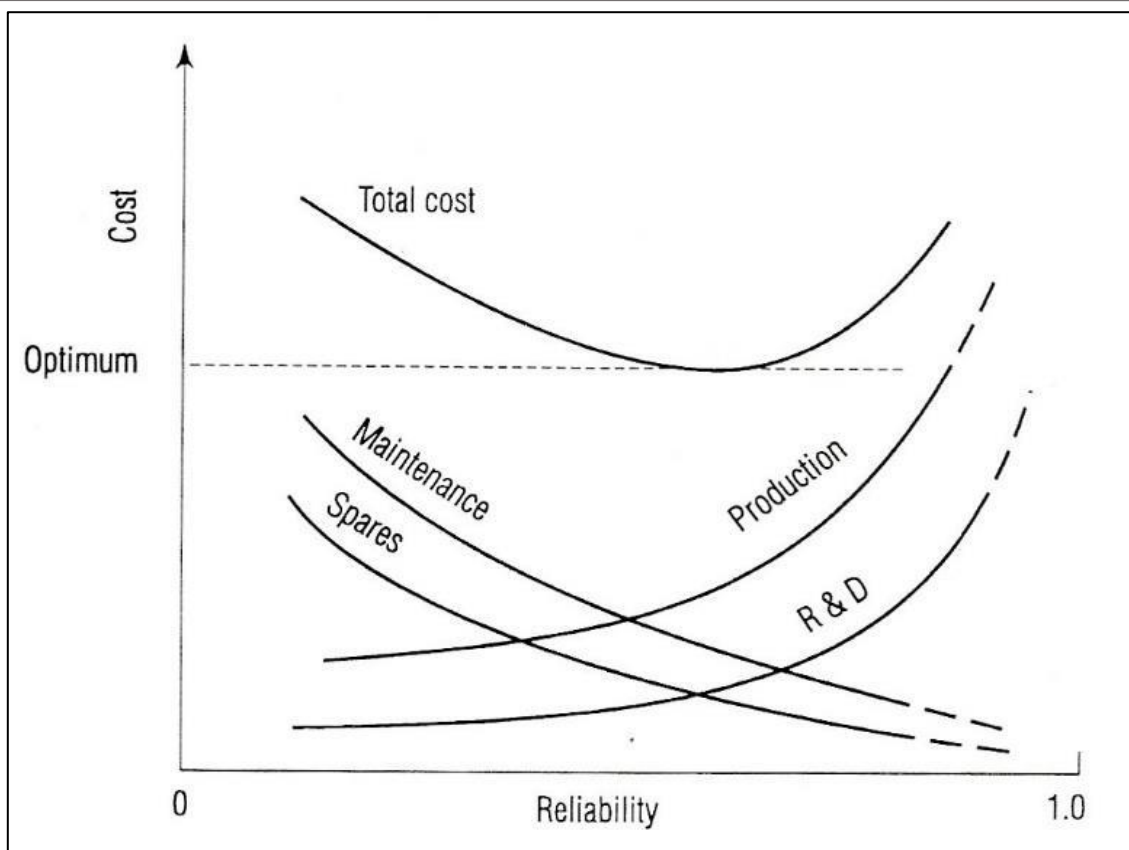
4. Ο αποχωρισμός υπό την παρουσία ρευστού μετάλλου.

Αυτή η περίπτωση μπορεί να παρατηρηθεί, όταν το υλικό εμπεριέχεται από διαφορετικές φάσεις όπου κάποιες, έχουν χαμηλό σημείο τήξης. Αυτές με την αύξηση μιας κρίσιμης θερμοκρασίας, τήκονται και συσσωρεύονται στα όρια των κόκκων με αποτέλεσμα να προκαλείται αστοχία [4].

### 1.8 Επίδραση αξιοπιστίας.

Ένας σχεδιαστής δεν μπορεί να σχεδιάσει ένα προϊόν βάσει μόνο των πληροφοριών οι οποίες παρελθοντικών καταστάσεων. Χρειάζεται μια τεχνική προκειμένου να προβλέπεται πόσο ασφαλές μπορεί να είναι το εκάστοτε σύστημα αφού από αυτήν εξαρτάται η ασφάλεια των ανθρώπων αλλά και των επενδυμένων κεφαλαίων. Η οικονομική εκτίμηση του έργου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αφού είναι ένας σημαντικός παράγοντας που συσχετίζεται με την αντίστοιχη προβλεπόμενη αξιοπιστία του συστήματος. Πρακτικά είναι δύσκολο να γίνει αντιληπτή και να τηρηθεί η συσχέτιση αυτή σε ένα βέλτιστο σημείο καθώς υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν και αναφέρθηκαν παραπάνω (σχεδιασμός, κατασκευαστικό μέρος, μεταβλητά κόστη). Το παρακάτω σχήμα περιγράφει τη σχέση του κόστους συναρτήσει της αξιοπιστίας και της συμπεριφοράς των βασικών παραγόντων όπως είναι τα ανταλλακτικά, τα προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης, η λειτουργία παραγωγής, η συντήρηση και το συνολικό κόστος. Μπορούμε να συμπεράνουμε λοιπόν πως όσο πιο αξιόπιστο γίνει ένα σύστημα ή ένα εξάρτημα, τότε αναλογικά μειώνεται η διαδικασία της συντήρησης και η ανανέωση των ανταλλακτικών, ενώ αυξάνεται η παραγωγή και τα προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης.





Εικόνα 1.4 Γράφημα κόστους συναρτήσει της αξιοπιστίας [1].

## 2. Χάλυβες

### 2.1 Εισαγωγή

Ο χάλυβας είναι από τα πιο διαδεδομένα και χρήσιμα κατασκευαστικά υλικά σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας. Χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη ή ως μέσον για να επεξεργαστούν και να διαμορφωθούν άλλα υλικά για διάφορες εφαρμογές.

Χάλυβας ορίζεται το κράμα σιδήρου – άνθρακα που έχει συγκεκριμένα όρια περιεκτικότητας άνθρακα και μαγγανίου, καθώς περιέχει και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Για να χαρακτηριστεί ένα υλικό ως χάλυβας, πρέπει η περιεκτικότητά του σε άνθρακα να είναι μικρότερη του 2%. Μόνο ένας περιορισμένος αριθμός χρωμιούχων χαλύβων μπορεί να περιέχει περισσότερο από 2% άνθρακα, ενώ ταυτόχρονα αυτό το όριο διαχωρίζει τους χάλυβες και τους χυτοσιδήρους.

Όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα του σιδήρου σε άνθρακα, τόσο μειώνεται η ανθεκτικότητα και η ελασιμότητά του. Το μέγιστο ποσοστό περιεκτικότητας του σιδήρου σε άνθρακα ώστε να μπορεί αυτός να χαρακτηριστεί ελάσιμος είναι 1,7%.

Επομένως ως χάλυβα ορίζουμε το ελατό κράμα σιδήρου – άνθρακα που δεν έχει υποστεί καμία προηγούμενη κατεργασία. Οι χάλυβες ταξινομούνται ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους, την μέθοδο αποχύσεώς τους και τις μηχανικές – χημικές τους ιδιότητες [5].

### 2.2 Ταξινόμηση των χαλύβων

Οι χάλυβες ταξινομούνται ανάλογα με την χημική τους σύσταση και την κλάση ποιότητας στην οποία βρίσκονται.

### 2.2.1 Ταξινόμηση ανάλογα με τη χημική σύσταση

Σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα, οι χάλυβες διακρίνονται ανάλογα με την προδιαγραφή του προϊόντος ή του εκάστοτε προτύπου, ανεξάρτητα από το ποιος χάλυβας παράγεται στη πραγματικότητα. Όμως είναι απαραίτητο να ακολουθούνται αυστηρά οι προϋποθέσεις της χημικής σύστασης που αντιστοιχεί στις απαιτήσεις του σχετικού προτύπου.

Η διάκριση αυτή πραγματοποιείται σύμφωνα με την ανάλυση τήγματος και ορίζεται από το πρότυπο ή την προδιαγραφή του προϊόντος. Ο προσδιορισμός γίνεται σύμφωνα με την ελάχιστη τιμή που καθορίζεται, ξεχωριστά για κάθε στοιχείο. Αν όμως η προδιαγραφή ενός προϊόντος γίνεται σύμφωνα με την ανάλυση τεμαχίου, τότε υπολογίζεται η ισοδύναμη ανάλυση τήγματος, χρησιμοποιώντας τις οριακές αποκλίσεις που καθορίζονται από την ανάλυση τήγματος και από τα αντίστοιχα ευρωπαϊκά πρότυπα και προδιαγραφές. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει πρότυπο, προδιαγραφή προϊόντος ή καθορισμένη χημική σύσταση, τότε η ταξινόμηση γίνεται σύμφωνα με την πραγματική ανάλυση τήγματος που πραγματοποιείται από τον κατασκευαστή. Υπάρχει το ενδεχόμενο τα αποτελέσματα της ανάλυσης τήγματος να διαφέρουν από αυτή της ανάλυσης τεμαχίου, γεγονός που είναι αποδεκτό και εξαρτάται από τα όρια του συγκεκριμένου προτύπου.

Όσον αφορά τα προϊόντα που περιέχουν πολλαπλά στρώματα και επικαλύψεις, αυτά διαχωρίζονται ανάλογα με το προϊόν που βρίσκεται στο εσωτερικό και έχει επικαλυφθεί ή επιμεταλλωθεί.

### 2.2.2 Ταξινόμηση ανάλογα με την κλάση ποιότητας

Οι χάλυβες ανάλογα με την ποιότητά τους διακρίνονται σε μη κραματωμένους, και κραματωμένους.

#### 2.2.2.1 Μη κραματωμένοι χάλυβες

Οι μη κραματωμένοι χάλυβες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους μη κραματωμένους χάλυβες ποιότητας και τους μη κραματωμένους ειδικούς χάλυβες.

**Μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας.** Το συγκεκριμένο είδος χαλύβων έχει καθορισμένες απαιτήσεις που αφορούν για παράδειγμα τη σκληρότητα, τη δυνατότητα διαμόρφωσης, το μέγεθος κόκκου. Ονομάζονται διαφορετικά και μη κραματωμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες οι οποίοι έχουν συγκεκριμένες μέγιστες τιμές για την ειδική ολική απώλεια μαγνήτισης, όπως και συγκεκριμένες τιμές για την μαγνητική επαγωγή, πόλωση ή διαπερατότητα.

**Μη κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες.** Αυτή η κατηγορία χαλύβων έχει υψηλότερο βαθμό καθαρότητας, όσον αφορά τις μη μεταλλικές προσμίξεις, σε σχέση με τους μη κραματωμένους χάλυβες ποιότητας. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η χρήση τους γίνεται για επιφανειακή σκλήρυνση ή για επιβελτίωση. Έχουν βελτιωμένες ιδιότητες, που στις περισσότερες περιπτώσεις συνδυάζονται μεταξύ τους, οι οποίες περιλαμβάνουν τις τιμές της αντοχής σε εφελκυσμό, τη δυνατότητα σκλήρυνσης, την καταλληλότητα για ψυχρή διαμόρφωση, συγκολλησιμότητα, καθώς και τιμές σκληρότητας. Έτσι με τη βοήθεια των προηγούμενων ιδιοτήτων, η χημική σύσταση ρυθμίζεται με ακρίβεια, με αποτέλεσμα να ικανοποιούνται οι αυξημένες απαιτήσεις.

Οι κύριες αυτές απαιτήσεις αφορούν, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τις χαμηλές περιεκτικότητες σε χαμηλές προσμίξεις αλλά και τις μέγιστες σε φώσφορο και θείο, την ελάχιστη τιμή έργου για την κρουστική δοκιμή στην επιβελτιωμένη κατάσταση, το βάθος διείδυσης της κατά της σκληρότητας, την ελάχιστη τιμή για το έργο κρουστικής δοκιμής.

#### 2.2.2.2 Κραματωμένοι χάλυβες

Ομοίως με τους μη κραματωμένους χάλυβες, οι κραματωμένοι χωρίζονται και αυτοί σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι οι κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας και οι κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες.

**Κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας.** Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι χάλυβες που δεν προορίζονται για επιφανειακή σκλήρυνση ή επιβελτίωση. Έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις που αφορούν την δυνατότητα διαμόρφωσης, τη σκληρότητα και το μέγεθος του κόκκου τους. Οι κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας ανάλογα με τη χρήση τους και την καταλληλότητα τους διαχωρίζονται σε υποκατηγορίες. Έτσι έχουμε τους λεπτόκοκκους κατασκευαστικούς χάλυβες που είναι κατάλληλοι για συγκολλήσεις, τους χάλυβες για σιδηροτροχιές και πλαίσια ορυχείων, αυτούς που έχουν καθορισμένο ελάχιστο όριο εφελκυσμού, συγκεκριμένες περιεκτικότητες κράματος, καθορισμένη ελάχιστη τιμή έργου κατά τη κρουστική δοκιμή, ηλεκτρικούς που περιέχουν κυρίως πυρίτιο και αργίλιο, χάλυβες που έχουν τον χαλκό ως το μοναδικό καθορισμένο στοιχείο κραμάτωσης.

**Κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες.** Αυτό το είδος χαλύβων, παρέχει βελτιωμένες ιδιότητες, που προκύπτουν από την ακριβή ρύθμιση της χημικής τους σύστασης αλλά και των ειδικών συνθηκών παραγωγής τους. Από την κατηγορία αυτή εξαιρούνται οι ανοξείδωτοι χάλυβες. Οι κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες περιλαμβάνουν χάλυβες μηχανολογικών κατασκευών, εργαλείων, εδράνων, υψηλής ταχύτητας και χάλυβες με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες.

#### 2.2.2.3 Ανοξείδωτοι χάλυβες

Ως ανοξείδωτοι χαρακτηρίζονται οι χάλυβες όπου η μικρότερη τιμή που παίρνει το κλάσμα χρωμίου-άνθρακα είναι 10,5% και η μέγιστη 1,2%. Επιπλέον διαχωρίζονται ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε νικέλιο (λιγότερο ή περισσότερο από 2,5%) αλλά και ανάλογα με τις κύριες ιδιότητες τους. Αυτές οι κύριες ιδιότητες αφορούν την αντοχή σε διάβρωση, την ανθεκτικότητα στη θερμότητα και την αντοχή σε ερπυσμό [6].

### 2.3 Ονοματολογία και τυποποίηση των χαλύβων

Η ανάγκη για κατανόηση των διαφορετικών χαλύβων σε διεθνές επίπεδο, οδήγησε στον διαχωρισμό τους σε υποκατηγορίες, ανάλογα με τα υλικά που περιέχουν αλλά και τις κύριες ιδιότητές τους. Έτσι προκειμένου να επιτευχθεί η σύντομη και ακριβής ονομασία τους, οι χάλυβες τυποποιούνται με συγκεκριμένα γράμματα, σύμβολα και αριθμούς. Στις μέρες μας, υπάρχουν πολλά συστήματα τυποποίησης χαλύβων που ισχύουν ανά τον κόσμο. Τα πιο διαδεδομένα και σημαντικότερα είναι το γερμανικό σύστημα (DIN) και το αμερικανικό σύστημα τυποποίησης (SAE – AISI) χαλύβων.

#### 2.3.1 Γερμανικό σύστημα τυποποίησης

Το γερμανικό σύστημα τυποποίησης DIN χρησιμοποιεί ως βάση του, γράμματα και αριθμούς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα τη χημική σύσταση ή τις ιδιότητες χρήσης τους αλλά και χωρίς κάποια σταθερό σύστημα κατά περίπτωση.

Οι ανθρακούχοι κατασκευαστικοί χάλυβες γενικής χρήσης συμβολίζονται με τα γράμματα St, από τη λέξη Stahl που σημαίνει χάλυβας, ενώ μετά ακολουθεί ο αριθμός που εκφράζει την ελάχιστη τιμή αντοχής σε εφελκυσμό σε N/mm<sup>2</sup> (πχ. ST-37). Παλαιότερα, τον διψήφιο αυτόν αριθμό, ακολουθούσε άλλος ένας αριθμός διαχωριζόμενος από τελεία, που χαρακτήριζε τις εξακριβωμένες ιδιότητες του συγκεκριμένου χάλυβα (πχ. St 27-2). Ομοίως οι χυτοχάλυβες γενικής χρήσης συμβολίζονται με τα γράμματα GS, από τις λέξεις Guss που σημαίνει χυτός και Stahl, ενώ ακολουθείται ο αριθμός που εκφράζει την ελάχιστη τιμή αντοχής σε εφελκυσμό σε N/mm<sup>2</sup> (πχ. GS-45). Επιπλέον, οι ανθρακούχοι χάλυβες που χαρακτηρίζονται ως "καλής ποιότητας" συμβολίζονται με το γράμμα C και αυτοί που

έχουν εξαιρετικά λίγες ακαθαρσίες θείου και φωσφόρου, συμβολίζονται με τα γράμματα CK. Αυτά τα γράμματα ακολουθούν οι αριθμοί που υποδηλώνουν την περιεκτικότητα σε χάλυβα πολλαπλασιασμένη με το 100 (πχ. CK 45).

Ομοίως με τους ανθρακούχους χάλυβες, τα χαλυβοκράματα συμβολίζονται με έναν διψήφιο αριθμό που δείχνει την περιεκτικότητα του κράματος σε άνθρακα, ο οποίος είναι πολλαπλασιασμένος με το 100. Έπειτα ακολουθούν τα χημικά σύμβολα των προσθηκών κατά σειρά ελαττούμενης περιεκτικότητας. Σε περίπτωση που οι περιεκτικότητες των προσθηκών είναι ίδιες τότε ακολουθείται η αλφαβητική σειρά της καθεμίας. Για παράδειγμα ένα κράμα χάλυβα με περιεκτικότητες  $\pi(C) = 0,5$ ,  $\rho(Cr) = 1,00\%$ ,  $\pi(Mo) = 0,6\%$ , συμβολίζεται ως 50CrMo46. Αυτός ο συμβολισμός ενδέχεται να εμπεριέχει και άλλα γράμματα που δηλώνουν τον τρόπο χρήσης ή τον τρόπο παρασκευής του συγκεκριμένου χάλυβα. Βέβαια, όλα τα παραπάνω αφορούσαν κράματα χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε προσθήκες. Όσον αφορά τα κράματα υψηλής περιεκτικότητας σε προσμίξεις, δηλαδή με σύνολο προσθηκών μεγαλύτερο του 5%, στον ίδιο συμβολισμό που προαναφέραμε, προσθέτουμε στην αρχή του το γράμμα X (πχ. X10CrNiTi1892).

### 2.3.2 Αμερικανικό σύστημα τυποποίησης

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής χρησιμοποιούνται κατά κόρον δύο συστήματα τυποποίησης των χαλύβων. Το ένα ονομάζεται σύστημα SAE και προέρχεται από τις λέξεις Society of Automobile Engineers και το άλλο είναι το σύστημα AISI που είναι τα αρχικά των λέξεων American Iron and Steel Institute. Αυτά τα δύο συστήματα τυποποίησης, καλύπτουν τις προδιαγραφές των λεγόμενων πρότυπων χαλύβων (standards), ενώ είναι αναγνωρισμένες σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδόν πανομοιότυπα και δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφοροποιήσεις.

Κατά το σύστημα AISI/SAE χρησιμοποιείται μια σειρά τεσσάρων ψηφίων. Τα δύο πρώτα ψηφία χαρακτηρίζουν την ποιότητα του χάλυβα και τα δύο τελευταία την περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100. Επίσης, υπάρχει περίπτωση πριν από τα τέσσερα αυτά ψηφία να προηγείται κάποιο γράμμα που να υποδεικνύει την μέθοδο παρασκευής του συγκεκριμένου χάλυβα (πχ. B για τη μέθοδο Bessemer ή E για την ηλεκτρική μέθοδο). Για παράδειγμα ένας κοινός ανθρακούχος χάλυβας με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,30% αναγράφεται ως 1030.

## 2.4 Ανοξειδωτοι χάλυβες

### 2.4.1 Ορισμός

Τα ειδικά κράματα χάλυβα δημιουργούνται προκειμένου να ανταποκρίνονται στις υψηλές απαιτήσεις της βιομηχανίας, που δεν μπορούν να καλύψουν οι κοινοί χάλυβες. Ορισμένοι εξειδικευμένοι τύποι ειδικών χαλύβων είναι οι ανοξειδωτοι, οι ειδικοί χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών, οι πυρίμαχοι χάλυβες και άλλοι. Εμείς θα επικεντρωθούμε στους ανοξειδωτους χάλυβες.

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τους, την αντοχή στη διάβρωση της ατμόσφαιρας. Στο παρελθόν είχε παρατηρηθεί ότι χάλυβας με περιεκτικότητα 13% σε χρώμιο, έχει τη συγκεκριμένη ιδιότητα. Επομένως η αντοχή στη διάβρωση οφείλεται στο χρώμιο, το οποίο σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του χρωμίου στην επιφάνεια του μετάλλου. Το στρώμα αυτό που είναι συμπαγές και ανθεκτικό, επεκτείνεται σε όλη την επιφάνεια του χάλυβα κι έτσι παρεμποδίζει την προσβολή του από εξωτερικούς παράγοντες. Έτσι, ανοξειδωτα, ονομάζονται τα κράματα χάλυβα που δημιουργούνται με βάση το χρώμιο που είναι ανθεκτικά σε διαβρωτικό περιβάλλον και στην ατμόσφαιρα. Τα μέταλλα

διαβρώνονται όταν βρίσκονται μέσα σε ένα επιβαρυσμένο περιβάλλον και υπόκεινται σε χημική προσβολή, σε φαινόμενα ηλεκτρολύσεως ή και στα δύο ταυτόχρονα.

Τα κράματα που αναμένουμε να έχουν τη συγκεκριμένη αντοχή πρέπει να σχηματίζουν στην επιφάνειά τους οξειδία ώστε να προστατεύεται το κράμα από πρόσθετη διάβρωση και η κρυσταλλική τους δομή να είναι μίας μόνο ομοιογενούς φάσης (πχ. ωστενίτη ή φερρίτη).

#### 2.4.2 Ταξινόμηση ανοξειδωτων χαλύβων

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι κατά βάση χρωμιούχοι χάλυβες. Διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, στους μαρτενσιτικούς, τους φερριτικούς και τους ωστενιτικούς.

##### 2.4.2.1 Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

Οι χάλυβες αυτοί, έχουν περιεκτικότητα σε χρώμιο από 12% έως 18% και σε άνθρακα από 0,07% έως 0,4%, ενώ χαρακτηρίζονται και μαγνητικοί. Οι θερμοκρασίες στις οποίες γίνεται η βαφή τους είναι από 950 °C έως 1000 °C. Αμέσως μετά τη αποκτούν μαρτενσιτικό ιστό, όντας σε σημαντικό βαθμό ανοξειδωτοι, ενώ αν υποστούν ανόπτηση αποκτούν περλιτικό ιστό. Η επαναφορά, γίνεται μεταξύ των θερμοκρασιών 500 °C έως 750 °C και είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως μετά τη διεργασία αυτή, αυξάνεται η δυσθραυστότητα του χάλυβα, εις βάρος όμως της αντοχής του σε διάβρωση.

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές όπως κατασκευή ρουλεμάν και ελατηρίων που λειτουργούν σε διαβρωτικό περιβάλλον, πτερύγια στροβίλων, αντλίες και άλλα.

##### 2.4.2.2 Φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

Η χημική σύσταση των χαλύβων αυτών κυμαίνεται από 16% έως 30% σε χρώμιο και από 0,10% έως 0,30% σε άνθρακα. Έχουν μόνο μία φάση, αυτή του φερρίτη, ενώ δεν υπόκεινται σε θερμικές κατεργασίες. Η αντοχή τους σε διάβρωση είναι μεγαλύτερη από αυτή των μαρτενσιτικών όμως έχουν πολύ κατώτερη μηχανική αντοχή. Επίσης χαρακτηρίζονται και αυτοί ως μαγνητικοί.

##### 2.4.2.3 Ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα κράματα χάλυβα που έχουν περιεκτικότητα σε χρώμιο 12% έως 25%, σε νικέλιο 8% έως 15% και σε άνθρακα μικρότερη από 0,1%. Ο πιο χαρακτηριστικός χάλυβας αυτής της κατηγορίας είναι ο νικελιούχος, με περιεκτικότητα σε χρώμιο 18% και σε νικέλιο 8%, ενώ συμβολίζεται ως 18-8. Βάφονται σε λάδι ή σε νερό σε θερμοκρασίες από 1050 °C έως 1100 °C, λαμβάνουν πλήρως την κρυσταλλική δομή του ωστενίτη, ενώ δεν σκληραίνουν μετά την κατεργασία της βαφής. Οι χάλυβες του τύπου 18-8 υπάρχει περίπτωση να περιέχουν και ποσοστά μολυβδαινίου, έως και 3%, αλλά και ποσοστά χαλκού, έως 2%, προκειμένου να έχουν ανθεκτικότητα σε ορισμένα διαβρωτικά διαλύματα. Κατά τη θέρμανσή του σε ορισμένο χρόνο, εμφανίζονται καρβίδια στα όρια των κόκκων του ωστενίτη. Όμως λόγω της ύπαρξης των καρβιδίων αυτών, που σχηματίζονται σε μικρό βάθος στους κόκκους, μειώνεται η περιεκτικότητα του χάλυβα σε χρώμιο και άνθρακα, με αποτέλεσμα να τον καθιστά εκτεθειμένο στη διάβρωση σε αυτά τα σημεία. Η διάβρωση αυτή που επεκτείνεται και με την ανομοιογένεια της φάσης, ονομάζεται περικρυσταλλική διάβρωση του χάλυβα.

Για να αποφευχθεί η περικρυσταλλική διάβρωση, πραγματοποιούμε μείωση της περιεκτικότητας του χάλυβα σε άνθρακα, μέχρι και 0,03% και προσθέτουμε τιτάνιο ή νιόβιο, χημικά στοιχεία που έχουν την τάση να σχηματίζουν ισχυρά καρβίδια στα όρια των κόκκων [7].

## 2.5 Ανοξειδωτος χάλυβας AISI 304

Ο συγκεκριμένος τύπος χάλυβα, είναι αυτός που θα μας απασχολήσει στη συγκεκριμένη εργασία και αυτός είναι ο λόγος που αναλύεται περαιτέρω.

Ο AISI 304 είναι ένας ωστενιτικός ανοξειδωτος χάλυβας που έχει ως βάση το χρώμιο και το νικέλιο. Η αντοχή του σε διάβρωση είναι υψηλότερη από άλλων παανομοιότυπων, όπως για παράδειγμα του AISI 302. Χαρακτηρίζεται από υψηλή ολκιμότητα, ενώ αντιδρά πολύ καλά στις θερμικές κατεργασίες όπως η βαφή και η μορφοποίηση. Γενικά χαρακτηρίζεται ως μη μαγνητικός, όμως σε περίπτωση που διαμορφωθεί εν ψυχρό, αποκτά κάποιες μαγνητικές ιδιότητες. Το γεγονός ότι έχει μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα, σημαίνει ότι πραγματοποιείται μικρότερη καθίζηση καρβιδίων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη σε περίπτωση συγκόλλησης, ενώ έχει και χαμηλότερη ευαισθησία σε περίπτωση διακρυσταλλικής διάβρωσης.

Ο συγκεκριμένος τύπος ανοξειδωτου χάλυβα είναι αρκετά διαδεδομένος και χρησιμοποιείται σε αντικείμενα και εργαλεία καθημερινής χρήσης αλλά και σε ελαφριού βιομηχανικού τύπου εξαρτήματα. Ορισμένα παραδείγματα είναι: δοχεία μεταφοράς, κουζινικά και μαγειρικά σκεύη, χημικός εξοπλισμός, σωληνάρια, εξαρτήματα υγιεινής, εύκαμπτοι μεταλλικοί σωλήνες και άλλα.

Οι σημαντικότερες φυσικές, μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του ανοξειδωτου χάλυβα AISI 304, καθώς και τυπική χημική του σύσταση παρουσιάζονται στους πίνακες 2.1 [8].

Πίνακας 2.1 Τυπική χημική σύσταση του ανοξειδωτου χάλυβα AISI 304 [8].

Χημικό στοιχείο	Περιεκτικότητα %	
	Ελάχιστο	Μέγιστο
C	-	0,08
Cr	18	20
Fe	66,345	74
Mn	-	2
Ni	8	10,5
P	-	0,045
S	-	0,03
Si	-	1

## 3. ΑΝΤΛΙΕΣ ΠΛΟΙΩΝ

### 3.1 Εισαγωγή

Οι αντλίες είναι μηχανήματα, που αναρροφούν υγρό από κάποιο χώρο και μέσω πίεσης το στέλνουν κάπου αλλού. Μερικά από τα συστήματα χρησιμοποιούν αντλία μέσα στο πλοίο, είναι η μεταφορά νερού στα δίκτυα άρδευσης από μια φυσική ή τεχνητή δεξαμενή, η παροχή καυσίμου στον κινητήρα αλλά και η κυκλοφορία νερού σε αυτόν ώστε να ψύχεται, η παροχή θαλασσινού νερού στο δίκτυο πυρόσβεσης [9].

Οι αντλίες, καταναλώνουν μηχανικό έργο δημιουργώντας δυναμική ή κινητική ενέργεια στο ρευστό. Για να δουλέψει η αντλία χρησιμοποιεί κινητήρια μηχανήματα όπως ατμομηχανές, ατμοστρόβιλοι, μηχανές Diesel ή βενζινομηχανές, αεριοστρόβιλοι και ηλεκτροκινητήρες. Όταν η αντλία κινείται μέσω ιμάντα, οδοντωτού τροχού ή κάποιας άλλης διάταξης που διοχετεύει ενέργεια από την κύρια μηχανή, ονομάζεται εξαρτημένη. Σε αντίθετη περίπτωση αν η ίδια κινείται μέσω ανεξάρτητου μηχανισμού τότε καλείται

ανεξάρτητη. Κατασκευάζονται από χάλυβα, χυτοσίδηρο, χυτοχάλυβα, μπρούτζο, κράματα χαλκού αλλά και από σύνθετα υλικά όπως κεραμικά, ειδικά πλαστικά, θερμοπλαστικά.

## 3.2 Είδη αντλιών

### 3.2.1 Αντλίες εκτοπίσεως

Σε αυτές το ρευστό (υγρό) διέρχεται από την αναρρόφηση και στη συνέχεια από την κατάθλιψη με μηχανική μεταβολή του όγκου ενός ή και περισσότερων θαλάμων. Υποδιαιρούνται σε εμβολοφόρες και περιστροφικές. Στις εμβολοφόρες (ή παλινδρομικές) υπάρχει ένα έμβολο μηχανικά κινούμενο το οποίο παλινδρομεί μέσα στον κύλινδρο με το υγρό. Στις περιστροφικές το υγρό συμπιέζεται μέσα στον κύλινδρο από κατάλληλα περιστρεφόμενους λοβούς ή έμβολα. Οι περιστροφικές αντλίες υποδιαιρούνται σε περιστροφικές ακτινικής ροής (φυγοκεντρικές) και σε αξονικής ροής (π.χ. αντλίες με έλικα).

### 3.2.2 Αντλίες κεντρόφυγες

Σε αυτές το υγρό μετακινείται με τη φυγόκεντρη δύναμη, η οποία μεταδίδεται σε αυτό με κατάλληλα διαμορφωμένο περιστρεφόμενο στροφέιο, με το οποίο το υγρό ρέει από την αναρρόφηση προς την κατάθλιψη.

## 3.3 Εμβολοφόρες αντλίες

Ονομάζονται οι αντλίες, στις οποίες παλινδρομεί ένα έμβολο μέσα σε έναν ή και περισσότερους κυλίνδρους και με αυτό τον τρόπο συμπιέζει το υγρό από την αναρρόφηση στην κατάθλιψη με αυξημένη θερμοκρασία και πίεση. Διακρίνονται σε:

### 3.3.1 Αναρροφητικές ή καταθλιπτικές

Μια αναρροφητική αντλία ανυψώνει το υγρό το οποίο στη συνέχεια ρέει προς την κατάθλιψη από μόνο του γι' αυτό ονομάζεται και ανυψωτική. Η καταθλιπτική αντλία ανυψώνει ή αναρροφά το υγρό και στη συνέχεια το καταθλίβει υπερνικώντας μια εξωτερική αντίσταση, δηλαδή μια κάποια πίεση.

### 3.3.2 Απλής ή διπλής ενέργειας.

Απλής ενέργειας ονομάζεται η αντλία, που πραγματοποιεί την αναρρόφηση και την κατάθλιψη από τη μία μόνο πλευρά του εμβόλου της. Διπλής ενέργειας καλείται όταν τον κύκλο αυτό τον πραγματοποιεί κι από τις δυο πλευρές της.

### 3.3.3 Μονοκύλινδρες ή πολυκύλινδρες.

### 3.3.4 Οριζόντιες, κάθετες ή κεκλιμένες.

### 3.3.5 Χειροκίνητες, ατμοκίνητες, πετρελαιοκίνητες κλπ.

Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο που αντλούν ενέργεια για την λειτουργία τους.

### 3.3.6 Απευθείας ή άμεσης μετάδοσης.

Όταν το έμβολό τους κινείται από κατευθείαν μετάδοση από το κινητήριο μηχανήμα και στροφαλοφόρες όταν η κίνησή τους προέρχεται από σύστημα στροφάλου-διωστήρα-ζυγώματος-εμβόλου.

### 3.3.7 Απλής ή συζευγμένης διάταξης.

Αφορά τη διάκριση μεταξύ της κίνησης του σύρτη διανομής του ατμού. Ακόμη, εξαρτάται από την προέλευση της κίνησης του σύρτη, ανάλογα αν αυτή προέρχεται από το βάκτρο των εμβόλων ή από άλλο σύστημα.

### 3.4 Περιστροφικές αντλίες εκτοπίσεως

Οι περιστροφικές αντλίες εκτοπίσεως ονομάζονται και αντλίες ογκομετρικού τύπου, γιατί εκτοπίζουν το υγρό και το αναγκάζουν να ρέει υπό πίεση. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με τις εμβολοφόρες αντλίες, με τη διαφορά ότι λειτουργούν με περιστροφικό τρόπο.

Βασίζουν την λειτουργία τους σε ένα ή δυο περιστρεφόμενα στροφέα, στον κλειστό θάλαμο που ορίζεται από το κέλυφος της αντλίας. Με αυτό τον τρόπο το ρευστό εγκλωβίζεται μέσα σε μικρότερους θαλάμους που υπάρχουν μεταξύ του κελύφους και των στροφείων, έτσι ώστε το ρευστό να μεταφέρεται από την αναρρόφηση στην κατάθλιψη. Οι περιστροφικές αντλίες αποτελούνται από:

- Το κέλυφος, πάνω στο οποίο υπάρχουν οι θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής του υγρού, όπου μαζί με τα καπάκια αποτελούν τους θαλάμους που περιέχουν το υγρό. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των περιστροφικών αντλιών είναι το εκτόπισμα της αντλίας, δηλαδή ο όγκος του υγρού που εκτοπίζουν τα στρεφόμενα μέρη της αντλίας, ανάλογα με τις περιστροφές.
- Την ολίσθηση που αντιπροσωπεύει την ποσότητα του υγρού που διαρρέει από την κατάθλιψη προς την αναρρόφηση μέσω των διάκενων των θαλάμων, που δημιουργούνται από το στροφέο της αντλίας.
- Την παροχή, η οποία είναι η διαφορά των προηγούμενων δύο και μέσω αυτής υπολογίζεται ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης, ως το πηλίκο της πραγματικής προς τη θεωρητική παροχή.

Αυτές, διακρίνονται σε

- Οδοντωτές με παράλληλα ή ελικοειδή δόντια.
- Κοχλιοειδείς.
- Περιστρεφόμενων εμβόλων ή λοβών.
- Πτερυγιοφόρες.
- Με υγρά έμβολα.
- Με έμβολα μεταβλητής διαδρομής, κινούμενα αξονικά ή ακτινικά.

Οι χρήσεις τους στα πλοία είναι σημαντική και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ως αντλίες πετρελαίου, μεταγίσεως, λαδιού λίπανσης, βενζίνης, φορτοεκφορτώσεως νερού καθώς και για την κίνηση των υδραυλικών πηδαλίων και βαρούλκων.

Κατά την επιλογή των υλικών κατασκευής τους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής ιδιότητες των υλικών:

- Το μέτρο ελαστικότητας, έτσι ώστε να προβλέπεται η αντοχή του σε παραμορφώσεις σύμφωνα με την πάροδο του χρόνου.
- Ο συντελεστής θερμικής διαστολής, ο οποίος επηρεάζει άμεσα τα διάκενα των στροφείων με το κέλυφος λόγω της διακυμάνσεως της θερμοκρασίας του υγρού, άρα και την ομαλή λειτουργία της αντλίας.
- Ο συντελεστής τριβής, που επηρεάζει την αντοχή στη φθορά μεταξύ επιφανειών που βρίσκονται υπό επαφή.

Ανάλογα με τη λειτουργία που θέλουμε να επιτύχουμε με τις αντλίες, τα υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στο εμπόριο στην κατασκευή των περιστροφικών αντλιών είναι:

- Για το κέλυφος: ο χυτοσίδηρος, ο χυτοχάλυβας ή ο ορείχαλκος.
- Για το στροφέο: το συνθετικό ελαστικό, ο χυτοχάλυβας ή ο σφυρήλατος χάλυβας ή ορείχαλκος.

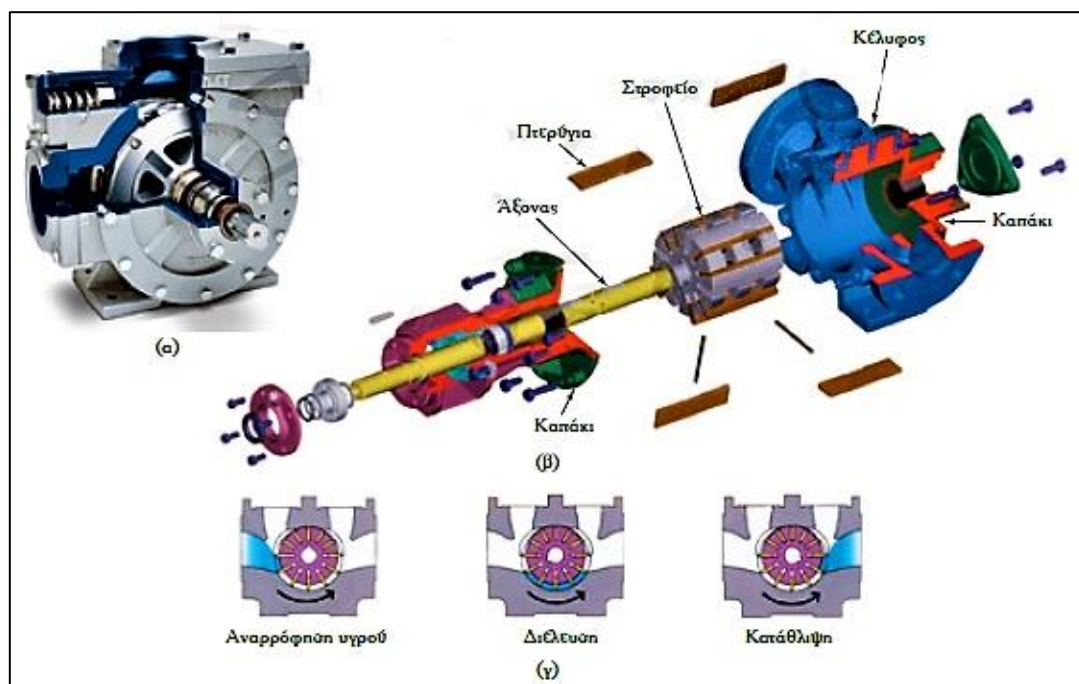


- Για τις βαλβίδες: ο χυτοχάλυβας, ο φωσφορούχος ορείχαλκος, το κράμα χαλκού-κασσίτερου, ο ανοξειδωτός χάλυβας ή το μέταλλο Monel.

Οι περιστροφικές αντλίες που συναντώνται συνήθως στα πλοία είναι:

### 3.4.1 Οι πτερυγιοφόρες αντλίες

Έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης, χαμηλή στάθμη θορύβου και μεγάλη διάρκεια ζωής. Χρησιμοποιούνται κυρίως στη μετάγγιση πετρελαίου από μια δεξαμενή σε άλλη.



Εικόνα 3.1 (α) Πτερυγιοφόρος αντλία (β) ανάπτυξη των μερών της (γ) ροή του υγρού.

### 3.4.2 Αντλίες υγρών εμβόλων.

Κατασκευάζονται σε δυο τύπους: με ελλειπτικό κέλυφος που έχουν θυρίδες αναρρόφησης και κατάθλιψης και ονομάζονται αντλίες τύπου ακροφυσίου. Το δεύτερο είδος αποτελούν οι αντλίες με εκκεντρικό κυκλικό κέλυφος, στις οποίες η αναρρόφηση και η κατάθλιψη πραγματοποιούνται από θυρίδες που υπάρχουν στην παράπλευρη επιφάνεια και καλούνται τύπου πλάκας.

Οι αντλίες υγρών εμβόλων χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του ατμοσφαιρικού αέρα και τη δημιουργία κενού αναρρόφησης σε αντλίες, όπου η αναρρόφηση βρίσκεται υψηλότερα από την επιφάνεια του αντλούμενου νερού. Η λειτουργία τους διαρκεί μέχρι να απομακρυνθεί όλος ο αέρας από τη σωλήνα αναρρόφησης και να αρχίσει η αναρρόφηση από την κύρια αντλία.

### 3.4.3 Αντλίες έκκεντρου ελικοειδούς στροφείου.

Εξασφαλίζουν την ομαλή μεταφορά του υγρού χωρίς στροβιλισμούς ή παλμούς. Ιδιαιτερότητα παρουσιάζουν καθώς μπορεί να επιτευχθεί η αντιστροφή της ροής με την αλλαγή της φοράς περιστροφής του στροφείου. Οι αντλίες αυτές χρησιμοποιούνται για μεταγγίσεις παχύρρευστων υγρών, όπως το πετρέλαιο.

### 3.4.4 Γρανάζωτές ή οδοντωτές αντλίες

Διακρίνονται με βάση τη λειτουργία των στροφείων τους σε αντλίες με εξωτερικά γρανάζια ή με εσωτερικό γρανάζι.

### 3.4.5. Αντλίες με λοβούς

Λειτουργούν όπως οι γραναζωτές με τη μόνη διαφορά ότι το κάθε στροφείο έχει δυο ή περισσότερους λοβούς.

### 3.4.6. Αντλίες με κοχλίες

Διακρίνονται σε αντλίες με χρονιζόμενους κοχλίες και με αχρόνιστους.

### 3.4.7. Περιστροφικές αντλίες

Λειτουργούν με έμβολα μεταβλητής διαδρομής και έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσουν πολλές στροφές περιστροφής.

### 3.4.8. Περισταλτικές αντλίες

Αποτελούν έναν ακόμα τύπο περιστροφικών αντλιών θετικής εκτόπισης. Η άντληση όπως και η πρόληψη διαρροής βασίζεται στην ελαστικότητα του εύκαμπτου μέλους τους.

### 3.4.9. Αντλίες περιφερειακών εμβόλων

Αποτελούνται από δυο μόνο κινούμενα στροφεία στο εσωτερικό του κελύφους διακίνησης του ρευστού. Χρησιμοποιούνται για την άντληση παχύρευστων υγρών καθώς περιστρέφονται σε χαμηλό εύρος στροφών.

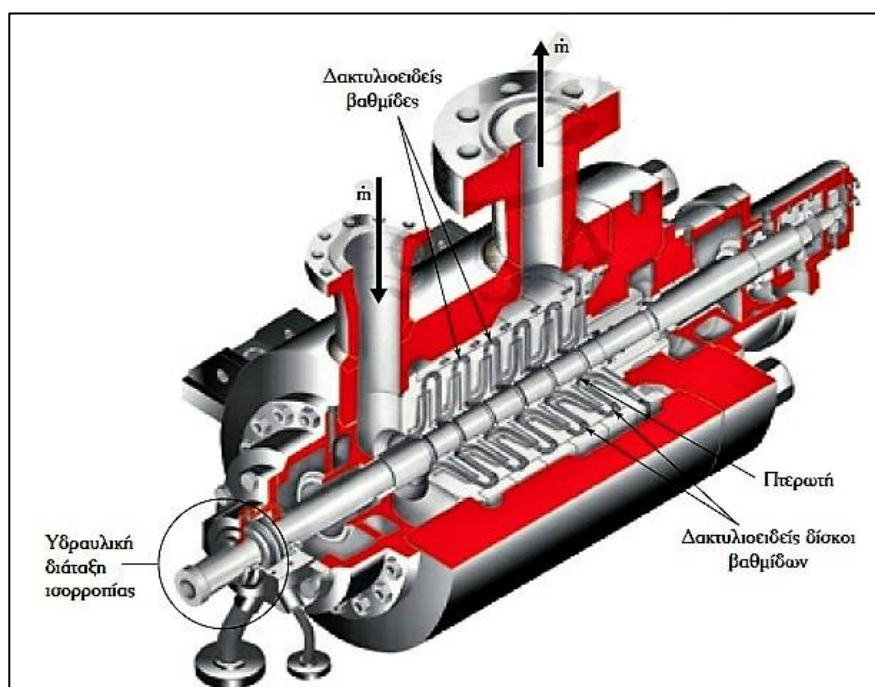
## 3.5 Φυγοκεντρικές αντλίες

### 3.5.1. Μονοβάθμιες αντλίες απλής αναρρόφησης

Κατασκευάζονται με οριζόντιο ή κάθετο άξονα σε εύρος παροχών από 100 m<sup>3</sup>/h έως 7000 m<sup>3</sup>/h. Σκοπός τους είναι η παροχή και η άντληση θαλασσινού ή γλυκού νερού, για την ψύξη των χιτωνίων, των εμβόλων της κύριας μηχανής. Χωρίζονται σε κάθετες ή οριζόντιες ανάλογα με τη διάταξή τους μεταξύ των τριβέων.

### 3.5.2 Πολυβάθμιες φυγοκεντρικές αντλίες με ηλεκτροκινητήρα

Τοποθετούνται κυρίως σε οριζόντια διάταξη και χρησιμοποιούνται ως τροφοδοτικές αντλίες λεβήτων. Αποτελούνται από πολλά στροφεία τοποθετημένα πάνω στον ίδιο άξονα.



Εικόνα 3.2 Πολυβάθμια αντλία με δακτυλίους.

### 3.5.3 Φυγοκεντρικές αντλίες με αμοστρόβιλο που τροφοδοτεί την κίνηση της αντλίας

Αυτές χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μεγάλη παροχή κατάθλιψης. Οι στροβιλαντλίες δύνανται να έχουν λίπανση ελαίου ή υδρολίπανση.

### 3.5.4 Φυγοκεντρικές αντλίες κάθετης διάταξης δύο ή και περισσότερων βαθμίδων.

### 3.5.5 Φυγοκεντρικές αντλίες αυτόματης πλήρωσης

Είναι απαραίτητο για την αρχική αναρρόφηση, η απαγωγή του αέρα να γίνει από την αντλία προπλήρωσης. Οι αντλίες αυτές λειτουργούν με χαμηλή ισχύ και χρησιμοποιούνται στην άντληση σεντινών.

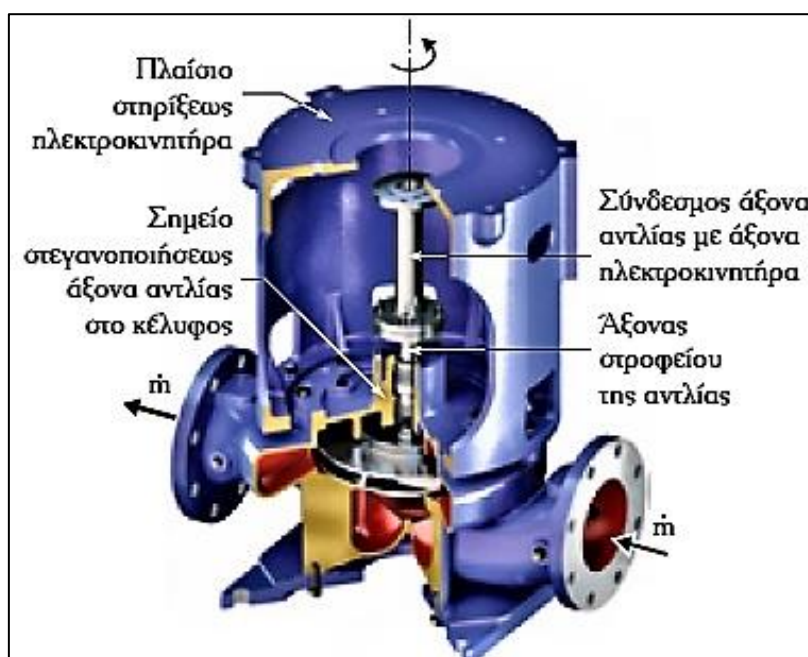
## 3.6 Αντλίες για την ψύξη εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης.

### 3.6.1. Αντλίες γλυκού νερού ψύξης των χιτωνίων της μηχανής.

Οι αντλίες χρησιμοποιούνται για την κυκλοφορία του νερού για την ψύξη των χιτωνίων, εμβόλων, κυλινδροκεφαλής της μηχανής. Προτιμάται η χρήση γλυκού νερού. Αυτές είναι φυγόκεντρες κάθετης ή οριζόντιας ροής, μιας βαθμίδας πίεσης και η μετάδοση της κίνησης παρέχεται από την κύρια μηχανή.

### 3.6.2. Αντλίες ψύξης των εμβόλων της κύριας μηχανής

Οι αντλίες αυτές χρησιμοποιούνται για την ψύξη των εμβόλων παρέχοντας το γλυκό νερό μέσω σωληνώσεων στην κεφαλή των εμβόλων. Αυτές λειτουργούν ανεξάρτητα από τις αντλίες ψύξης των χιτωνίων.



Εικόνα 3.3 Αντλία κυκλοφορίας γλυκού νερού για την ψύξη των χιτωνίων.

## 3.7 Φθορά και βλάβες αντλιών

Η φθορά που προκαλείται στις αντλίες των πλοίων είναι αποτέλεσμα κυρίως της μηχανικής καταπόνησης και της διάβρωσης, ενώ ταυτόχρονα επιβαρύνει το πλοίο οικονομικά. Γενικά, οι αντλίες κατασκευάζονται από πολύ ανθεκτικά υλικά ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στο ρόλο τους, δηλαδή να κινούν το ρευστό με το οποίο συνεργάζονται. Ανάλογα με τον τύπο της αντλίας και ανάλογα με τις ιδιότητες του ρευστού

που διακινείται, η αντλία φθείρεται σε διάφορα τμήματά της. Επίσης η συνεχής λειτουργία των αντλιών είναι παράγοντας που επηρεάζει τη φθορά και τη γήρανσή τους. Χωρίζοντας τις αντλίες σε τρεις μεγάλες κατηγορίες διακρίνονται οι φθορές ανάλογα με τον τύπο τους.

Αρχικά στις εμβολοφόρες αντλίες, η φθορά εμφανίζεται στις βαλβίδες, στους δακτυλίους στεγανοποίησης (ελατήρια) των εμβόλων και στους στυπιοθλίπτες στεγανοποίησης του βάκτρου. Στην περίπτωση των στυπιοθλιπτών στεγανοποίησης, η φθορά είναι αρκετά εμφανής, καθώς παρατηρείται εξωτερική διαρροή. Αντιθέτως, η φθορά στα ελατήρια των εμβόλων, προκαλεί εσωτερική διαρροή, η οποία γίνεται αντιληπτή μόνο εάν παρατηρηθεί η μείωση στη ροή της αλλά και η μείωση της πίεσης που αναπτύσσεται στους κυλίνδρους.

Στις περιστροφικές αντλίες θετικής εκτοπίσεως, η φθορά γίνεται διακριτή μεταξύ των περιστρεφόμενων μερών και του κελύφους. Δημιουργείται από τις πιέσεις που ασκούνται μεταξύ των επιφανειών των εξαρτημάτων, της τριβής μεταξύ αυτών ή και των δύο.

Επιπλέον η θερμότητα που αναπτύσσεται στις επιφάνειες εξαρτάται από την πίεση και την τριβή, ενώ και ο αριθμός των στροφών παίζει σημαντικό ρόλο. Επομένως η φθορά τους είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων που συνδυάζονται με πολλούς τρόπους. Γι' αυτό το λόγο οι αντλίες που διακινούν ρευστά που έχουν την ιδιότητα, λόγω της περιεκτικότητάς τους, να λειαινούν τις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή, λειτουργούν σε χαμηλές στροφές ή είναι κατασκευασμένες από ανθεκτικά υλικά, προκειμένου να αντέχουν.

Οι δυναμικές αντλίες, φθείρονται στην περιοχή μεταξύ στροφείου και κελύφους, όπου ουσιαστικά διαχωρίζεται ο χώρος της αναρρόφησης από τον χώρο της κατάθλιψης, και στους στυπιοθλίπτες από εκεί που διέρχεται ο άξονας περιστροφής του στροφείου. Το διάκενο μεταξύ στροφείου και κελύφους είναι πολύ μικρό ώστε να αποτρέπεται η διαρροή από την υψηλή στη χαμηλή πίεση. Προκειμένου να προστατευθεί το κέλυφος της αντλίας, εγκαθίστανται δακτύλιοι φθοράς, οι οποίοι είναι αναλώσιμοι και αντικαθίστανται περιοδικά.

Η φθορά στους στυπιοθλίπτες οφείλεται στην ποιότητα του υγρού που αναρροφάται ή στη φυσιολογική και προγραμματισμένη φθορά μετά από μεγάλο διάστημα λειτουργίας, που συνήθως προκαλεί εξωτερική διαρροή.

### 3.8 Συντήρηση αντλιών

Η συντήρηση σχετίζεται με διάφορους ελέγχους που πραγματοποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, την προγραμματισμένη συντήρηση ή αντικατάσταση εξαρτημάτων ανάλογα με το χρόνο λειτουργίας τους αλλά και την επιδιόρθωση μη προγραμματισμένων βλαβών ή φθορών. Ο προληπτικός έλεγχος ανά τακτά διαστήματα είναι πολύ σημαντικός καθώς έτσι μπορεί να προστατευθεί η αντλία από πιθανές επερχόμενες βλάβες, να παρατείνει τη διάρκεια ζωής της, να την καθιστά αξιόπιστη και να περιορίζει τα έξοδα.

Οι διαδικασίες που συμπεριλαμβάνονται στη συντήρηση των αντλιών, πέρα από τον εξωτερικό έλεγχο κατά τη λειτουργία τους, τη λίπανση των εξαρτημάτων και των κινούμενων μερών αλλά και τον τακτικό έλεγχο του συστήματος μετάδοσης κίνησης, περιλαμβάνουν την αποσυναρμολόγησή της προκειμένου να ελεγχθεί ξεχωριστά το κάθε μέρος της. Οι σημαντικότερες ενέργειες που γίνονται κατά την αποσυναρμολόγησή της αντλίας είναι:

- Ο έλεγχος των εδράνων του στροφείου
- Ο έλεγχος των εσωτερικών επιφανειών του κελύφους για φθορές από μηχανική διάβρωση ή ίχνη σπηλαίωσης
- Ο έλεγχος όλων των εδράνων
- Η ευθυγράμμιση του συνδέσμου αντλίας – κινητήρα και των ελαστικών στοιχείων που περιλαμβάνονται και ο έλεγχος για τυχόν φθορές αυτών
- Ο έλεγχος της σταθερότητας του στροφείου στον άξονα

- Ο έλεγχος στεγανότητας των βαλβίδων αλλά και των ελατηρίων των εμβόλων
- Ο έλεγχος των ακτινικών διακένων μεταξύ δακτυλίων φθοράς και στροφείου
- Ο έλεγχος των σαλαμαστρών του στυπιοθλίπτη
- Ο έλεγχος των επιφανειών του στροφείου για σπηλαιώση
- Αντικατάσταση όλων των εξαρτημάτων που έχουν υπερβεί χρονικά όρια της φθοράς, ακόμη και αν φαίνεται πως αντέχουν

Οι παραπάνω έλεγχοι είναι ζωτικής σημασίας για το πλοίο και καταγράφονται σε έναν πίνακα, ο οποίος περιλαμβάνει αναλυτικά όλες τις διαδικασίες συντήρησης, με ημερομηνίες αλλά και με πιθανές αιτίες αστοχίας. Έτσι το πλήρωμα, είναι σε θέση να ανατρέχει στο ιστορικό, να παίρνει τις κατάλληλες αποφάσεις και να οργανώνεται καλύτερα. [10]

## Β ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 4. Προκαταρκτική εξέταση

#### 4.1 Βασικά στοιχεία κινητήρα DK-20

Η κινητήρια μηχανή του πλοίου [11] είναι Daihatsu 6Dk – 20  
800kW (1170 PS) 900 RPM [12]

Ονομασία Αξόνων αντλίας ψύξης: **N1, N2**

Serial Numbers: **N1** AQ6K20559, **N2** AQ6k20560

Χρόνος λειτουργίας άξονα **N1** πριν την αστοχία του: περίπου 24 ώρες.

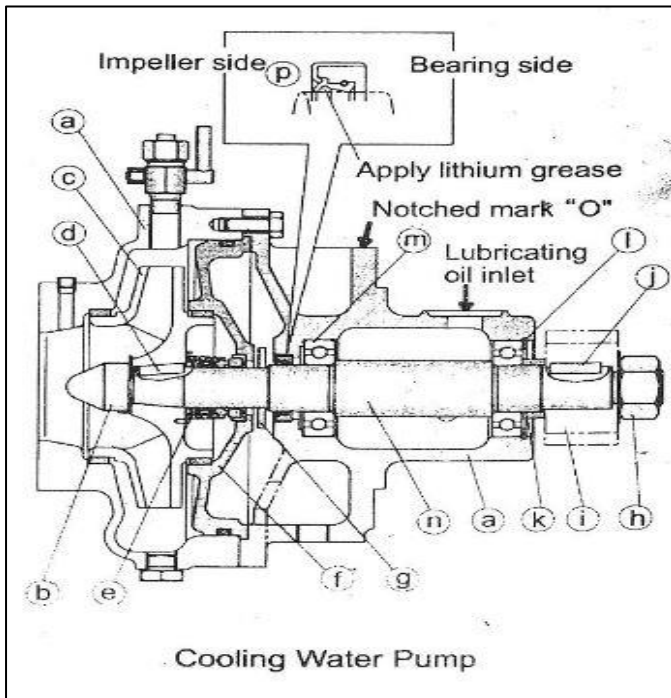
Χρόνος λειτουργίας άξονα **N2** πριν την αστοχία του: περίπου 72 ώρες.

#### 4.2 Συλλογή ιστορικών δεδομένων

Εμπορικό πλοίο χρησιμοποιεί αντλία νερού για την ψύξη του κινητήρα του (Εικόνα 4.1). Ο άξονας της αντλίας αστοχεί επανειλημμένα (Εικόνα 4.2). Πρόκειται για έναν άξονα φυγοκεντρικής αντλίας ψύξεως (Εικόνα 4.3 και Εικόνα 4.4). Στην εικόνα 4.4 απεικονίζονται τα μέρη του συναρμολογήματος της αντλίας: το μέρος όπου στηρίζεται ο άξονας της αντλίας, το γρανάτζι μετάδοσης κίνησης από τον στροφαλοφόρο άξονα προς την αντλία, η περωτή που κινεί τον νερό ψύξης της μηχανής, το τεμάχιο που απομονώνει την αντλία και στο οποίο εφαρμόζει ο δακτύλιος στεγανοποίησης



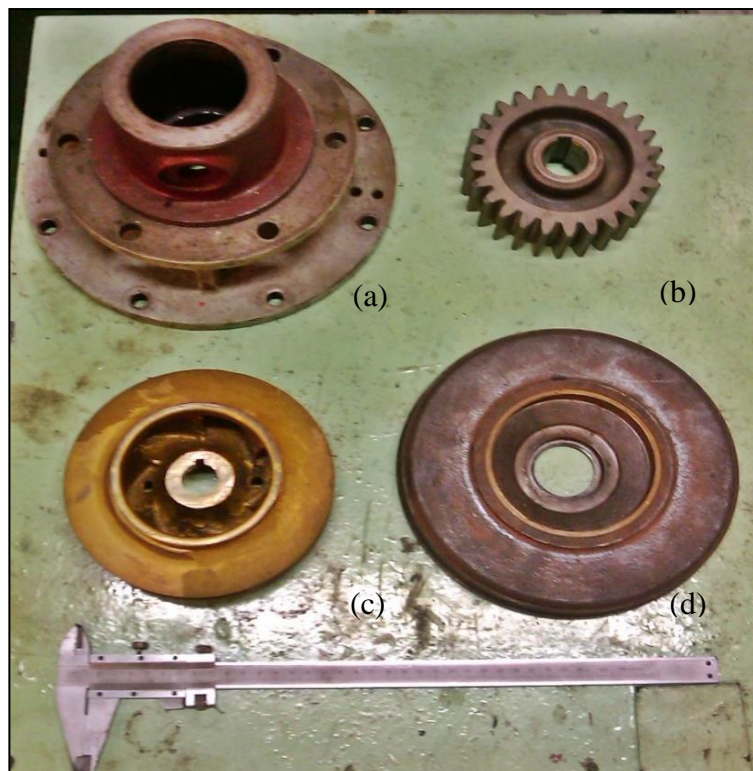
Εικόνα 4.1 Θέση αντλίας στον κινητήρα του πλοίου



Εικόνα 4.2: Συναρμολόγημα αντλίας ψύξης.



Εικόνα 4.3 Άξονας αντλίας μέσα στο κέλυφος (σώμα αντλίας).



Εικόνα 4.4 Βασικά εξαρτήματα τα οποία απαρτίζουν τον άξονα της μηχανής

Έξι άξονες έχουν καταστραφεί σε διάστημα τριών μηνών. Οι δύο πρώτοι άξονες ήταν γνήσιοι, ενώ οι επόμενα δυο κατασκευάστηκαν σε εξωτερικά μηχανουργεία. Δεν υπάρχουν στοιχεία για τα μηχανουργεία που έχουν κατασκευάσει. Οι δύο τελευταίοι άξονες κατασκευάστηκαν εν πλω, στο μηχανουργείο του πλοίου.

Κατά τη δήλωση των υπευθύνων, η συντήρησή τους γίνονταν τακτικά, με την αλλαγή των εδράνων κύλισης και των δακτυλίων στεγάνωσης. Επίσης πραγματοποιήθηκε τακτικός έλεγχος του ψυκτικού κυκλώματος με χρήση αντιδιαβρωτικών χημικών, για την αποφυγή

της διάβρωσης των μερών του κυκλώματος. Ακόμη εκλέχθηκε κατά τη λειτουργία ο θόρυβος της μηχανής και δεν διαπιστώθηκε κάποιος ασυνήθιστος ήχος που να παραπέμπει σε δυσλειτουργία του συστήματος. Για την ανάλυση έχουν παραδοθεί δύο άξονες που ονομάστηκαν N1 και N2. Ο πρώτος, άξονας N1, αστόχησε μετά από 24 ώρες λειτουργίας, ενώ ο δεύτερος, άξονας N2, μετά από 72 ώρες λειτουργίας.

### 4.3 Οπτικός έλεγχος των εξαρτημάτων

Το προσωπικό του πλοίου διατήρησε τους δύο άξονες ώστε να υποβληθούν σε ανάλυση αστοχίας. Λόγω της παρατεταμένης παραμονής σε θαλάσσιο περιβάλλον, οι άξονες έχουν διαβρωθεί και γι' αυτό το λόγο έχουν υποστεί αμμοβολή, πριν φτάσουν στον αναλυτή. Μόλις παρελήφθησαν τα εξαρτήματα, υποβλήθηκαν σε λεπτομερή οπτική επισκόπηση και φωτογραφήθηκαν για να δημιουργηθεί φωτογραφικό αρχείο.

Και οι δύο άξονες έχουν αστοχήσει στην πλευρά που ασφαλίζουν με την πτερωτή (Εικόνα 4.5). Ο πρώτος άξονας έσπασε σε δύο κομμάτια. Ο οπτικός έλεγχος αποκάλυψε ελλιπή μηχανουργική κατεργασία. Τα γενικά χαρακτηριστικά των αξόνων δείχνουν ότι έχουν κατασκευαστεί σε συμβατικό τόρνο.

Η μεγαλύτερη διάμετρος, παρατηρείται στο κέντρο των δύο αξόνων, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτό, η διατομή μειώνεται. Δεξιά και αριστερά από την μεγαλύτερη διάμετρο, υπάρχουν αρνητικές ακτίνες καμπυλότητας, όπου εκεί εφαρμόζουν τα έδρανα κύλισης. Από άποψη σχεδιασμού των αξόνων, αυτή δεν είναι η καλύτερη σχεδιαστική λύση μιας επειδή οι αρνητικές ακτίνες καμπυλότητας είναι σημείο συγκέντρωσης τάσεων.



Εικόνα 4.5 Γενική άποψη των δύο αστοχούντων αξόνων μαζί με τα θραύσματά τους.



Ο πρώτος άξονας ήταν σε εξαιρετικά κακή κατάσταση (Εικόνα 4.5a). Η θραύση προκλήθηκε στην τρίτη μικρότερη διατομή του άξονα όπου υπάρχει ο σφηνόδρομος που μεταφέρει ροπή στρέψης στην πτερωτή. Η πιο πιθανή μορφή τάσεων που υπερέβησαν το όριο και οδήγησαν στην θραύση ήταν στρεπτικές και αυτό προκύπτει από την φορά των γραμμών στην επιφάνεια θραύσης. Επίσης, η θραύση του άξονα ήταν κατά κύριο λόγο όλκιμη διότι παρατηρήθηκαν σημαντικές παραμορφώσεις στο σημείο θραύσης. Στα σημεία όπου εφαρμόζουν οι σφήνες προκειμένου να μεταφερθεί ροπή στον άξονα της αντλίας από το γρανάζι και εν συνεχεία στην πτερωτή μέσω αυτού, παρατηρήθηκαν παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις αυτές οφείλονται είτε σε μηχανουργική κατεργασία πριν τη λειτουργία του άξονα είτε κατά το στάδιο της λειτουργίας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί η ύπαρξη αρνητικών ακτινών καμπυλότητας στα σημεία των εδράσεων.

Στο σημείο θραύσης του άξονα, υπάρχει ένα αρκετά μεγάλο ξεθύμασμα του σπειρώματος που προκαλεί μείωση της ωφέλιμης διατομής του υλικού. Έτσι συγκεντρώνονται τάσεις στα σημεία αυτά με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί βίαιη θραύση με αποκόλληση κομματιού του άξονα. Δεν είναι γνωστό εάν ο άξονας ήταν σωστά λειασμένος και κατεργασμένος, γεγονός που θα βοηθούσε στον καθορισμό της αντοχής του, αφού γνωρίζουμε ότι όσο πιο λείος είναι ένα άξονας, τόσο μεγαλύτερη αντοχή έχει. Τέλος μικρές ατέλειες παρατηρήθηκαν και στα σπειρώματα με κάποιες από τις σπείρες να έχουν υποστεί θραύση.

Στην περίπτωση του δεύτερου άξονα, αποκολλήθηκαν κάποια μικρά μέρη του κυρίως σώματος (Εικόνα 4.5b). Σε γενικές γραμμές είναι σε καλύτερη κατάσταση από τον πρώτο άξονα. Η κατεργασία του σπειρώματος και στις δύο πλευρές χαρακτηρίζεται ως αρκετά καλή και λειτουργική μιας και δεν υπάρχουν εμφανή σημάδια καταπόνησης και παραμόρφωσης αυτού. Ένα κοινό στοιχείο που έχει με τον άξονα N1 είναι η ύπαρξη αρνητικών ακτινών καμπυλότητας στα σημεία των εδράσεων. Οι δύο σφηνάυλακες έχουν συμμετρικό βάθος, μήκος και πλάτος που δηλώνει καλύτερη μηχανουργική κατεργασία σε σύγκριση με τον άξονα N1 που φαίνεται να είναι πρόχειρα κατασκευασμένος μιας και οι διαστάσεις της κάθε σφήνας του είναι ανομοιόμορφες. Και οι δύο άξονες της αντλίας ψύξης είναι πανομοιότυποι μεταξύ τους και έχουν αστοχήσει στην ίδια πλευρά, δηλαδή σε αυτή που ασφαλίζει η πτερωτή της αντλίας. Και στις δύο περιπτώσεις η σφηνάυλακα, που είναι από την πλευρά του σπειρώματος που εφαρμόζει η πτερωτή, έχει καταστραφεί συντριπτικά. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη σφήνα έχει δεκτεί το μεγαλύτερο στρεπτικό φορτίο

#### 4.4 Φωτογράφιση εξαρτήματος

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των δύο αστοχούντων αξόνων. Οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό περιβάλλον με ημί-επαγγελματική φωτογραφική μηχανή τύπου Mirrorless, Sony a5000. Από τις λήψεις μπορούν να ληφθούν σημαντικές πληροφορίες.

Αρχικά φαίνεται ότι και οι άξονες έχουν υποστεί στρεπτική καταπόνηση, ενώ μπορεί να διακριθεί και η φορά της .

Στην περίπτωση του άξονα N1 και από το κομμάτι του που αποκολλήθηκε, φαίνεται έντονα η αποσάθρωση του υλικού. Το γεγονός ότι το σημείο θραύσης του άξονα είναι αποσαθρωμένο, κάνει ορατή την πολύ μεγάλη διαφορά της αντοχής του συγκεκριμένου υλικού κατασκευής, από αυτό που θα έπρεπε να έχει κατασκευαστεί για να φέρει τις απαιτούμενες φορτίσεις. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Επιπλέον η γυαλισμένη επιφάνεια στο σημείο της θραύσης μας παραπέμπει στο συμπέρασμα ότι ο άξονας της αντλίας συνέχισε να λειτουργεί για κάποιο χρονικό διάστημα μετά την αστοχία του.

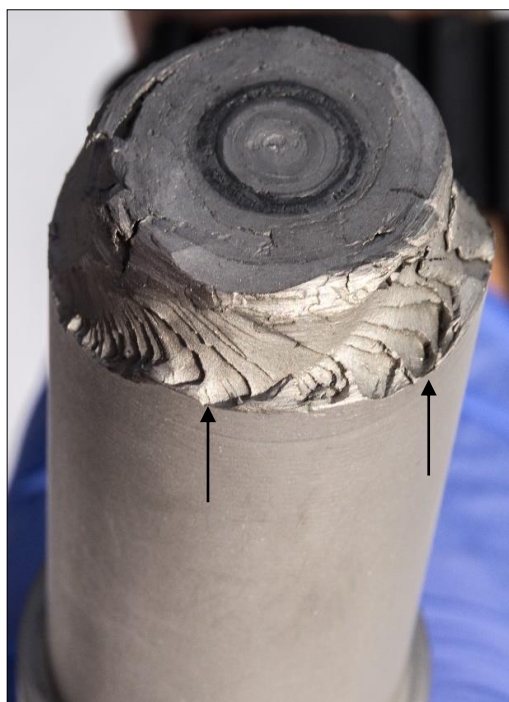
Στις παρακάτω σειρές φωτογραφιών γίνονται διακριτές κάποιες από τις μηχανουργικές κατεργασίες που έχουν υποστεί τα τεμάχια αλλά και τα σημεία των μέγιστων καταπονήσεων και φθορών.

Επίσης, οι άξονες παρελήφθησαν αμμοβολισμένοι με αποτέλεσμα μην είναι διακριτές πιθανές αλλοιώσεις πριν την αστοχία τους, όπως σκουριά ή κάποια χρωματική διαφοροποίηση στην επιφάνεια του άξονα που να υποδηλώνει για παράδειγμα αύξηση της θερμοκρασίας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι φωτογραφίες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την κατάσταση που έχει προκύψει η θραύση: στρέψη, μηχανουργική κατεργασία και αποσάθρωση.

#### 4.4.1 Στρέψη

Στις εικόνες 4.6 και 4.7 έχει εστιαστεί το σημείο θραύσης του άξονα όπου φαίνονται καθαρά τα αποτυπώματα της στρέψης, όπως δείχνουν και τα βέλη. Το κύριο χαρακτηριστικό που απεικονίζεται είναι η εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση λόγω στρεπτικών δυνάμεων η οποία φτάνει στο σημείο της αποσάθρωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγάλη διαφορά της τάσης την οποία αντέχει το υλικό σε σχέση με την επιβαλλόμενη στο συγκεκριμένο σημείο του άξονα.



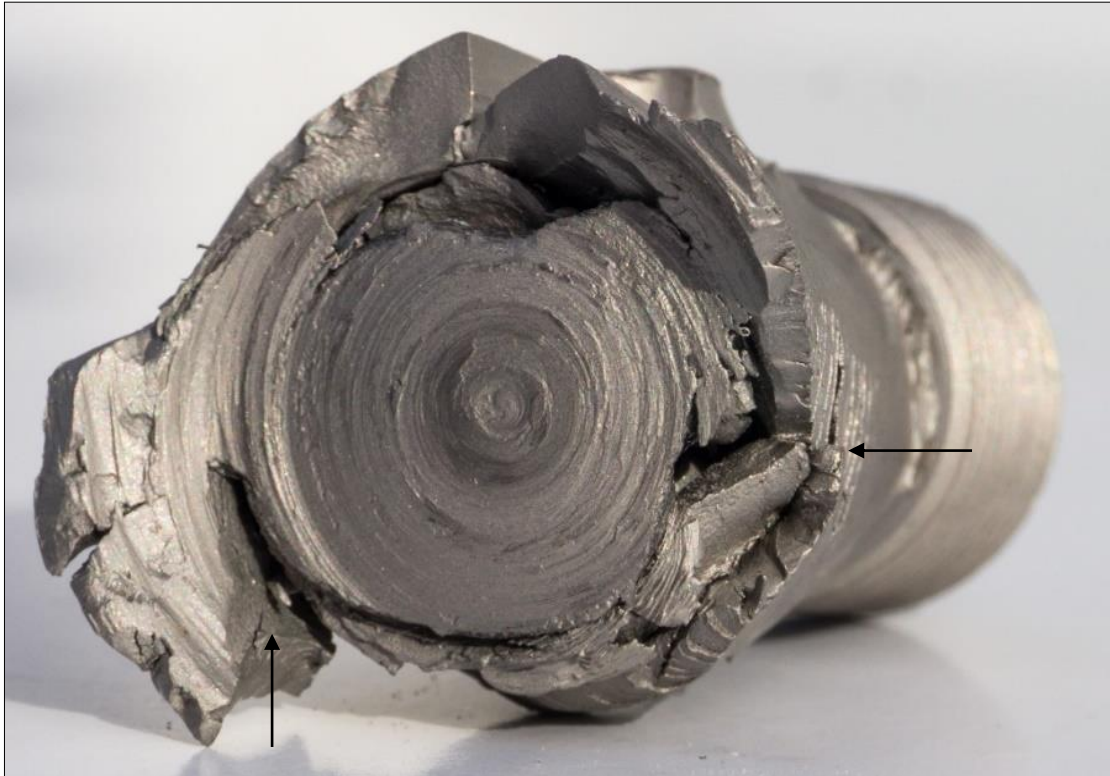
Εικόνα 4.6 Επιφάνειες θραύσης του άξονα N1 με την εμφάνιση γραμμών οι οποίες αντιστοιχούν σε στρεπτική καταπόνηση.



Εικόνα 4.7 Επιφάνειες θραύσης του άξονα N2 με την εμφάνιση γραμμών οι οποίες αντιστοιχούν σε στρεπτική καταπόνηση.

#### 4.4.2 Αποσάθρωση

Στις εικόνες 4.8, 4.9 και 4.10 έχουν εστιαστεί στα τεμάχια των αξόνων που έχουν αποκολληθεί δηλαδή στα θραύσματα. Είναι εύκολα διακριτή η αποσάθρωση που έχει υποστεί το υλικό με την ολοκληρωτική αποκοπή μεγάλων τμημάτων του θραύσματος. Επίσης η επιφάνεια του θραύσματος του άξονα N1 εμφανίζεται γυαλισμένη, ενδεικτικό ότι το εξάρτημα είχε δουλέψει όντας σπασμένο.



Εικόνα 4.8 Αποσαθρωμένη επιφάνεια θραύσματος – άξονας N1.



Εικόνα 4.9 Αποσαθρωμένη επιφάνεια θραύσματος από αντίθετη όψη – άξονας N1.



Εικόνα 4.10 Αποσαθρωμένη επιφάνεια θραύσματος και ίχνη από σημάδια παραλίας (βέλη) – άξονας N2.

#### 4.4.3 Μηχανουργική κατεργασία

Στις εικόνες 4.11 και 4.12 απεικονίζονται λεπτομέρειες σχετικά με τη μηχανουργική κατεργασία των δύο αξόνων.

Οι δύο άξονες προέρχονται κυρίως από κατεργασία τórνευσης. Το πιθανότερο σενάριο είναι να έχουν κατασκευαστεί σε συμβατικές εργαλειομηχανές και όχι σε κάποια εργαλειομηχανή CNC. Αυτό το σενάριο προκύπτει από το γεγονός ότι οι δύο αυτοί άξονες κατασκευάστηκαν στο μηχανουργείο του πλοίου, που διαθέτει συμβατικούς τórνους και φρέζες.

Οι επιφάνειες των εδράσεων διακρίνονται φινιρισμένες αλλά με σημάδια τα οποία έχουν απροσδιόριστη φορά. Σε αυτά τα σημεία είναι πιθανό να χρησιμοποιήθηκε υαλόχαρτο για επίτευξη καλύτερης επιφάνειας οπτικά ή για προσέγγιση της επιθυμητής ακρίβειας που απαιτείται για την τοποθέτηση του εδράνου κύλισης, που έχει μικρά όρια ανοχής.

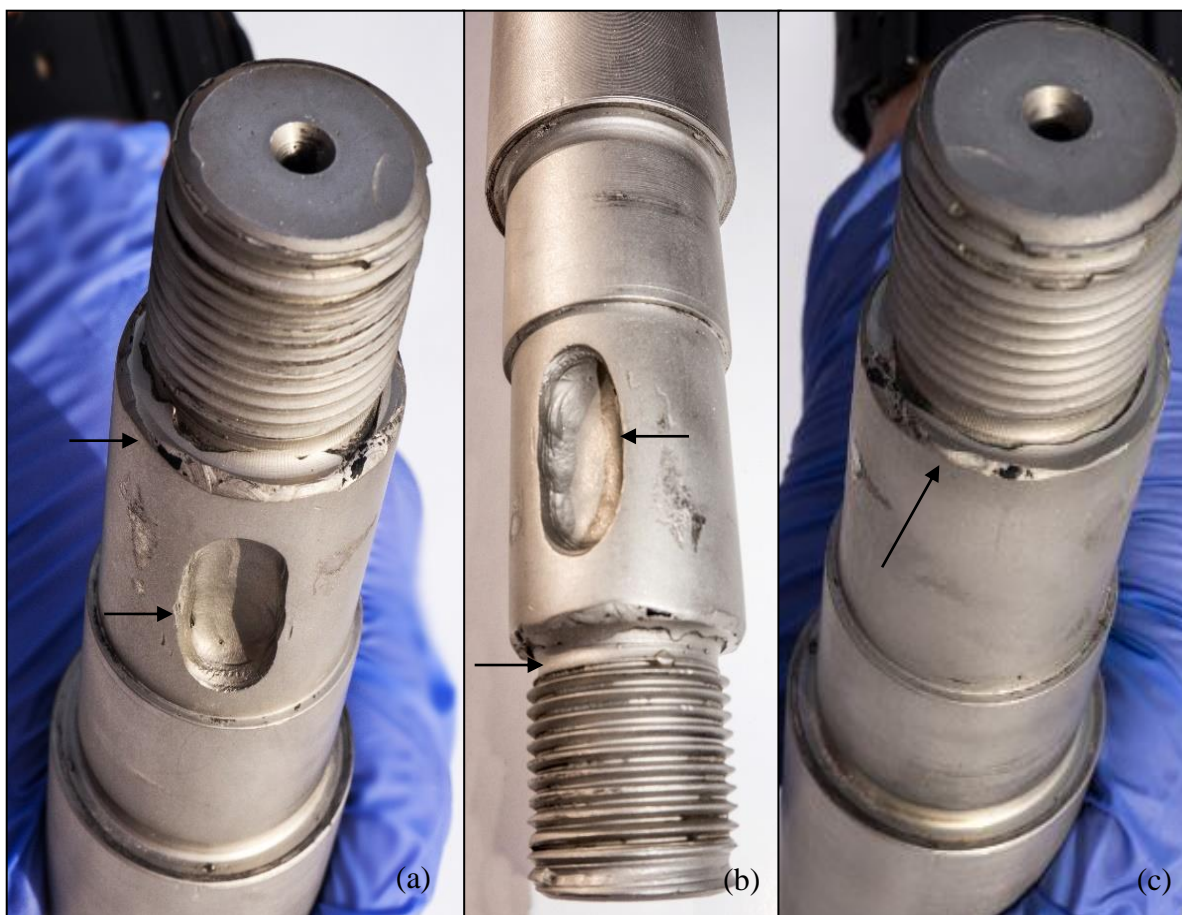
Η επιφάνεια των εξαρτημάτων με τη μεγαλύτερη διατομή στην οποία δεν εδράζεται κάτι, έχει επίσης φινιριστεί, πιθανότατα με μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης, λόγω των διακριτών γραμμών που αποτυπώνουν την πορεία του κοπτικού εργαλείου. Σχετικά με τον άξονα N1 μια σημαντική παρατήρηση όπως έχει προαναφερθεί και στον οπτικό έλεγχο του τεμαχίου, είναι η κακή μηχανουργική κατεργασία που έχει γίνει στα σημεία των σφηνόδρομων. Σε αυτά τα σημεία, παρατηρούνται διάφορες διαβαθμίσεις, διαστασιακή ανομοιογένεια καθώς και πολύ κακή ποιότητα τραχύτητας της επιφάνειας, που δεν αρμόζουν σε μια σωστή συναρμογή. Οι σφήνες έχουν τυποποιημένα μεγέθη και δεν είναι σωστό να υπάρχει διάκενο

κατά την τοποθέτησή τους. Σε διαφορετική περίπτωση πραγματοποιείται το φαινόμενο του συντονισμού και της ταχείας θραύσης της σφήνας ή του σφηνοδρόμου, αν το υλικό έχει χαμηλότερη αντοχή από αυτή της σφήνας.

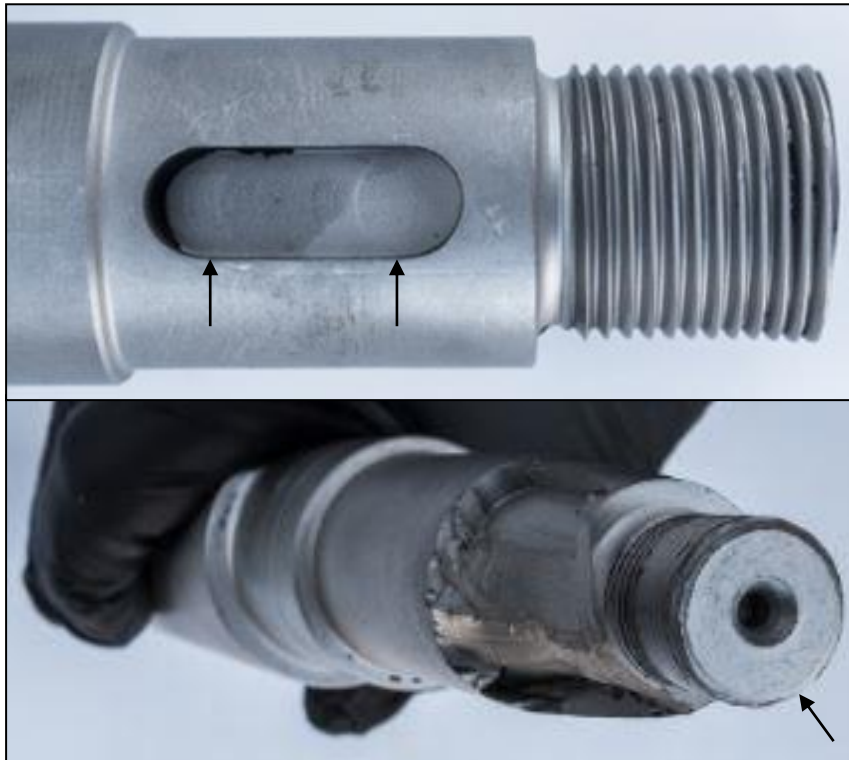
Άλλη μια παρατήρηση, που αφορά τον άξονα N1, είναι η ύπαρξη μιας περιέργης επιφάνειας, στο αντίθετο άκρο από αυτό του σημείου θραύσης, η οποία δεν έχει ομοιότητες το υπόλοιπο υλικό και μοιάζει με κάποιο είδος συγκόλλησης. Μικρά σημάδια τήγματος φαίνονται χαρακτηριστικά στην επιφάνεια του εξαρτήματος καθώς παρουσιάζεται αξιοσημείωτη παραμόρφωση σε όλη την περιφέρεια της διατομής. Η έκταση της πιθανής ύπαρξης συγκόλλησης μπορεί να εκτιμηθεί μετά από καταστροφική μέθοδο και συγκεκριμένα με την κοπή του άξονα στο σημείο αυτό και μελέτη της μικροδομής του.

Στον άξονα N2 και στο εσωτερικό του σφηνοδρόμου, είναι διακριτά τα κυκλικά σημάδια από την κατεργασία με φρέζα. Αυτά τα σημάδια θα αναλυθούν κατά τη διάρκεια του στεροσκοπικού ελέγχου, όπου θα είναι και πιο ευδιάκριτα. Επίσης στην πλευρά του άξονα που βρίσκεται και το σημείο θραύσης, είναι διακριτά κάποια βαθουλώματα στην πόντα. Αυτά υποδηλώνουν κάποιο λάθος χειρισμό του με αποτέλεσμα να αποκτήσει χτυπήματα ή κάποια κακή μηχανουργική κατεργασία.

Τέλος η ύπαρξη αρνητικών ακτινών καμπυλότητας στα σημεία των εδράσεων, που παρατηρείται και στους δύο άξονες N1 και N2, δεν ενδείκνυνται γενικότερα στις κατασκευές, καθώς είναι σημεία συσσώρευσης τάσεων.



Εικόνα 4.11 Λεπτομέρεια του άξονα N1: (α) Πιθανό σημείο συγκόλλησης (σημεία I και IV) , (β) Κακή κατεργασία σφηνοδρόμου (σημεία II και III) , (γ) Πιθανό σημείο συγκόλλησης

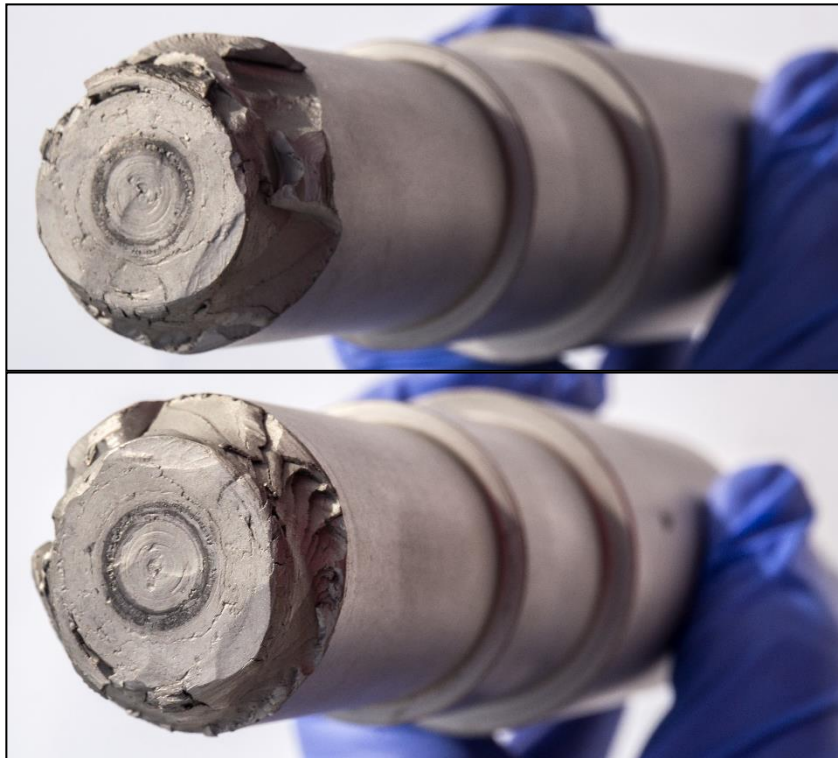


Εικόνα 4.12 Λεπτομέρεια το άξονα N2: (α) Σημάδια φρέζας κατά την κατεργασία του σφηνοδρόμου, (β) Πλημμελής κατεργασία πόντας.

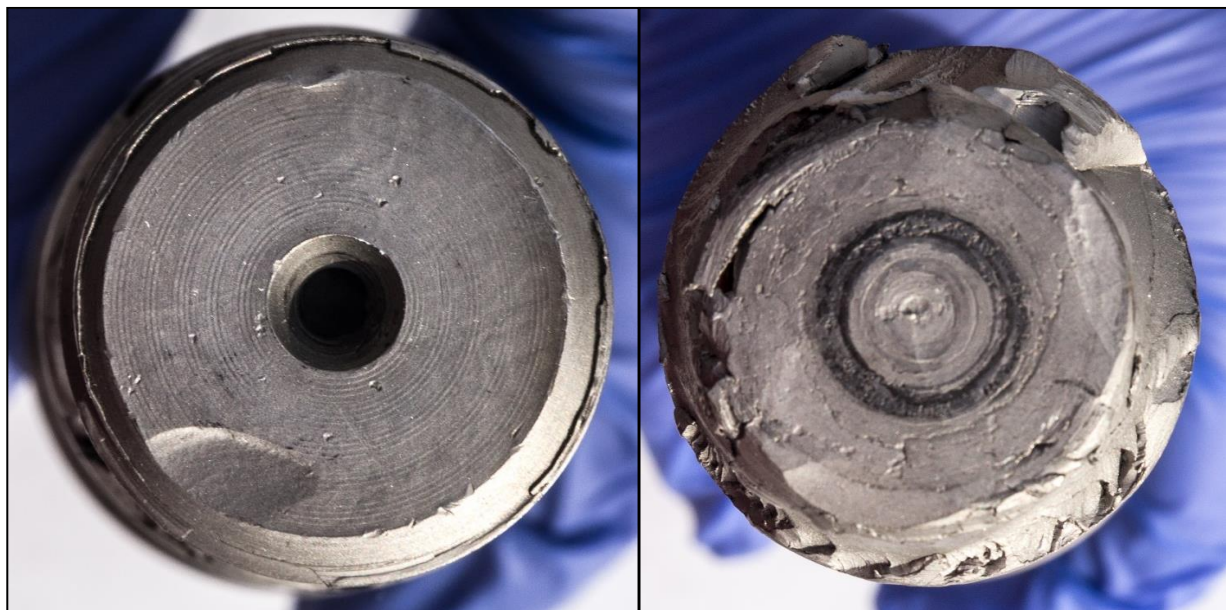
Οι εικόνες 4.13 έως 4.16 παρουσιάζουν τον άξονα N1 από όλες τις δυνατές οπτικές γωνίες.



Εικόνα 4.13 Ο άξονας N1 σε πλήρη έκταση και το σημείο θραύσης του.



Εικόνα 4.14 Εστίαση στο σημείο θραύσης του άξονα N1, περιστρέφοντάς τον.



Εικόνα 4.15 Το εμπρός και το οπίσθιο μέρος του άξονα N1.



Εικόνα 4.16 Το κομμάτι του άξονα N1 που αποκολλήθηκε λόγω αστοχίας-Αποτελέσματα της αποσάθρωσης.



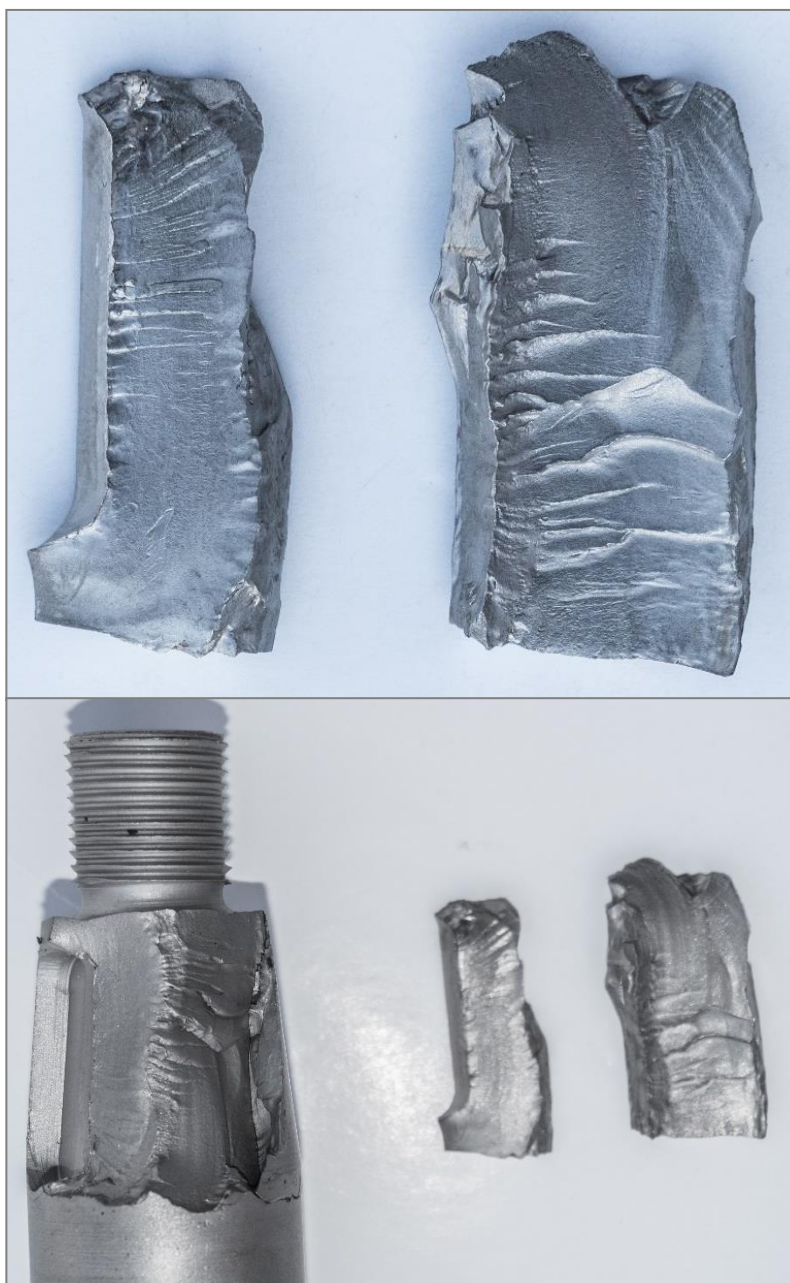
Οι εικόνες 4.17 έως 4.19 παρουσιάζουν τον άξονα N2 από όλες τις δυνατές οπτικές γωνίες.



Εικόνα 4.17 Ο άξονας σε πλήρη έκταση με τα θραύσματά του και εστιασμένο σημείο θραύσης



Εικόνα 4.18 Το σημείο θραύσης του άξονα και το σπείρωμα στο οποίο εφαρμόζει η περωτή, σε διαφορετικές οπτικές γωνίες.



Εικόνα 4.19 Το σημείο θραύσης και τα δύο θραύσματα του άξονα που αποκολλήθηκαν.

Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες είναι φανερό ότι οι δύο άξονες είναι πανομοιότυποι και σχεδόν ίδιοι. Κάποια από τα σημαντικότερα κοινά στοιχεία που παρατηρούνται είναι:

Οι δύο άξονες έχουν αστοχήσει στην ίδια πλευρά, δηλαδή σε εκείνη που ασφαλίζει η περωτή της αντλίας ψύξης, και έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης της θραύσης, δηλαδή στο σφηνόδρομο. Το σημείο που εφαρμόζει η σφήνα, είναι σημείο μεταφοράς ροπής - ισχύος και σε συνδυασμό με την μείωση της διατομής του υλικού λόγω της αύλακας αποτελεί σημείο συγκέντρωσης τάσεων.

Κατά τη μηχανουργική κατεργασία της τόννευσης για την διαμόρφωση των αξόνων, έχουν δημιουργηθεί και στους δύο άξονες, αρνητικές ακτίνες καμπυλότητας. Αυτή η κατεργασία γενικά δεν ενδείκνυται καθώς αποτελεί σημείο συγκέντρωσης τάσεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση στο σημείο αυτό εφαρμόζει έδρανο.

Ο άξονας N1 είναι σε δυσμενέστερη κατάσταση συγκριτικά με τον N2.

Ο Ν1, σε περιπτώσεις όπως του σπειρώματος και του σφηνοδρόμου, από την αντίθετη πλευρά που πραγματοποιήθηκε η θραύση, έχει αρκετά ελαττώματα. Συγκεκριμένα από το συγκεκριμένο σπείρωμα λείπουν κάποιες σπείρες και οι περισσότερες είναι πρόχειρα κατεργασμένες, με αρκετές ασυνέχειες και ανωμαλίες ενώ το αντίστοιχο σπείρωμα του άξονα Ν2 είναι σε πολλή καλύτερη κατάσταση. Όσον αφορά την αύλακα της σφήνας, είναι έντονα διακριτή η ανομοιογένεια των δύο αξόνων, μιας και στη περίπτωση του Ν1, έχει διαφορετικό μήκος, βάθος και πλάτος σε πάρα πολλά σημεία ενώ αντιθέτως του άξονα Ν2 είναι σε πάρα πολύ καλή κατάσταση. Επιπλέον στο συγκεκριμένο σημείο της σφήνας του άξονα Ν1 φαίνεται ότι υπάρχει υποψία συγκόλλησης πριν την έναρξη του σπειρώματος, γεγονός που έχει επηρεάσει και την ποιότητα της σφήνας.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ενώ ο άξονας Ν1 λειτούργησε 24 ώρες και ο Ν2 λειτούργησε 72 ώρες, ο πρώτος (Ν1) είναι αυτός που έχει υποστεί τις περισσότερες φθορές και την ολική αποκόλληση του ενός άκρου του.

#### 4.5 Έλεγχος με στερεοσκόπιο

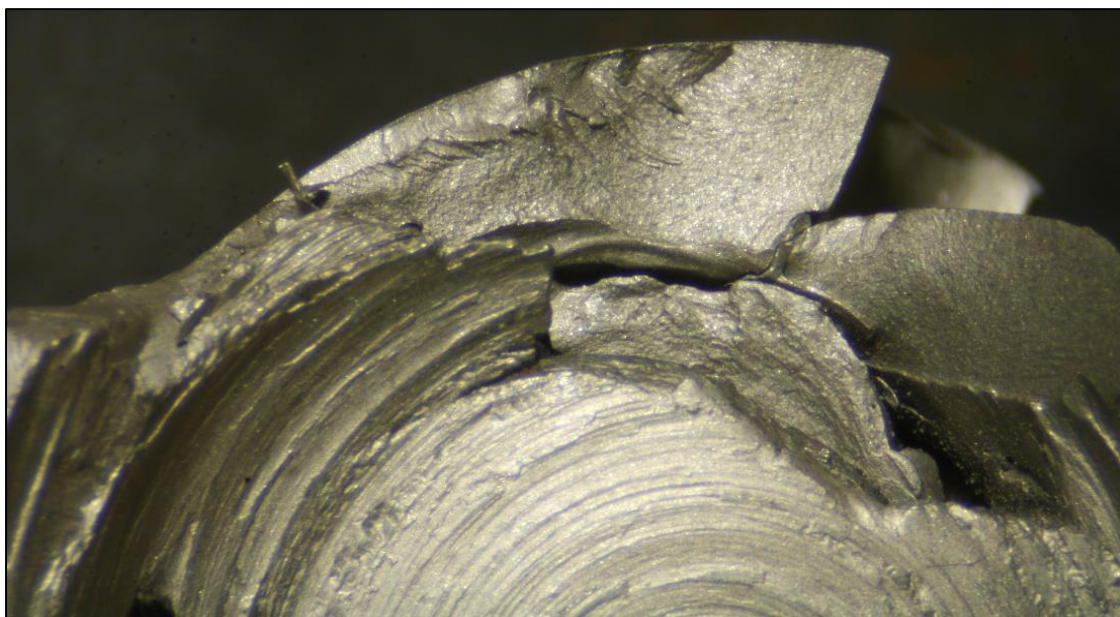
Για την καλύτερη παρατήρηση των επιφανειών των δύο αξόνων αλλά και των θραυσμάτων τους, πραγματοποιήθηκε στερεοσκοπικός έλεγχος. Ο έλεγχος αυτός όσον αφορά τον άξονα Ν1 πραγματοποιήθηκε με τον εξοπλισμό της εταιρίας SPECTRUMLABS S.A. Το στερεοσκόπιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο LEICA MZ6. Λόγο ότι το συγκεκριμένο στερεοσκόπιο δεν είχε μεγάλο εύρος μετατόπισης του ύψους δεν ήταν δυνατή η τοποθέτηση του άξονα για την φωτογράφιση της επιφάνειάς του.

Ο στερεοσκοπικός έλεγχος του άξονα Ν2 πραγματοποιήθηκε με στερεοσκόπιο του εργαστηρίου Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών του ΠΑΔΑ σε στερεοσκόπιο Digital Microscope Premier Dino-Lite.

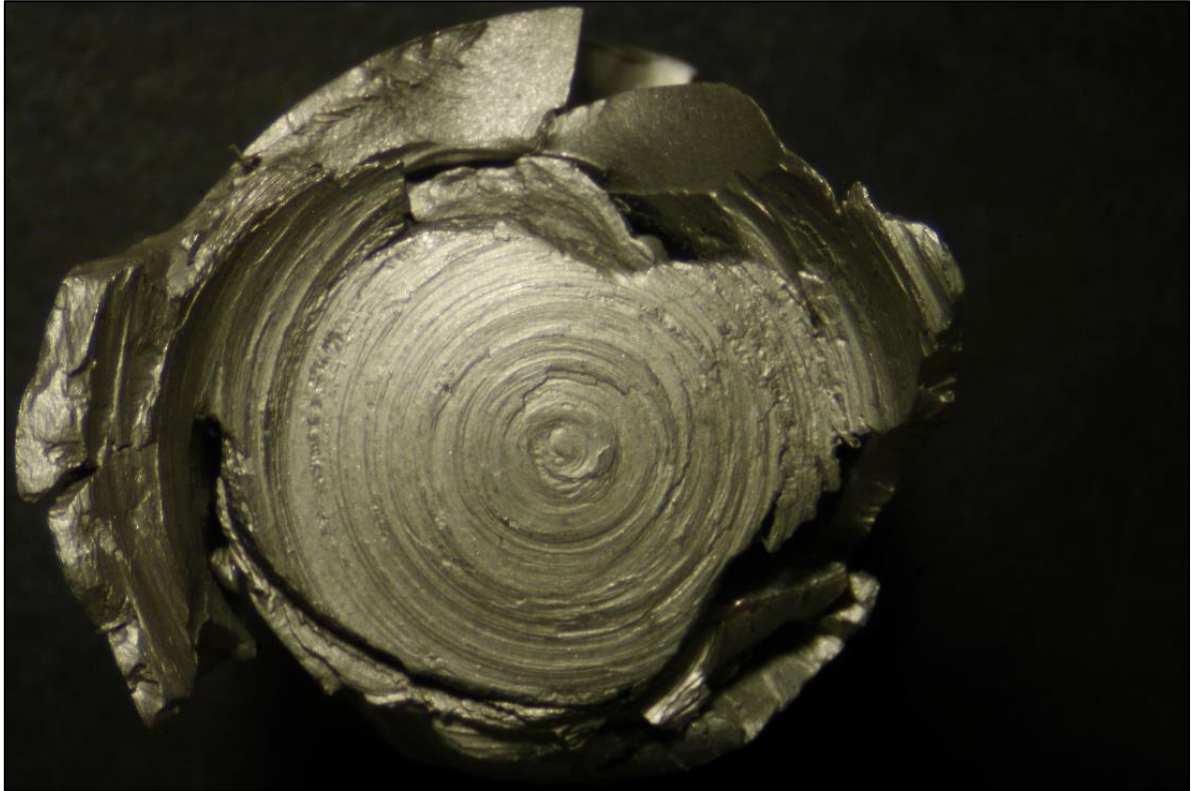
##### 4.5.1 Άξονας Ν1

Στις εικόνες 4.20 έως 4.25 παρουσιάζονται λεπτομέρειες που προέκυψαν από την στεροσκοπική ανάλυση του άξονα Ν1

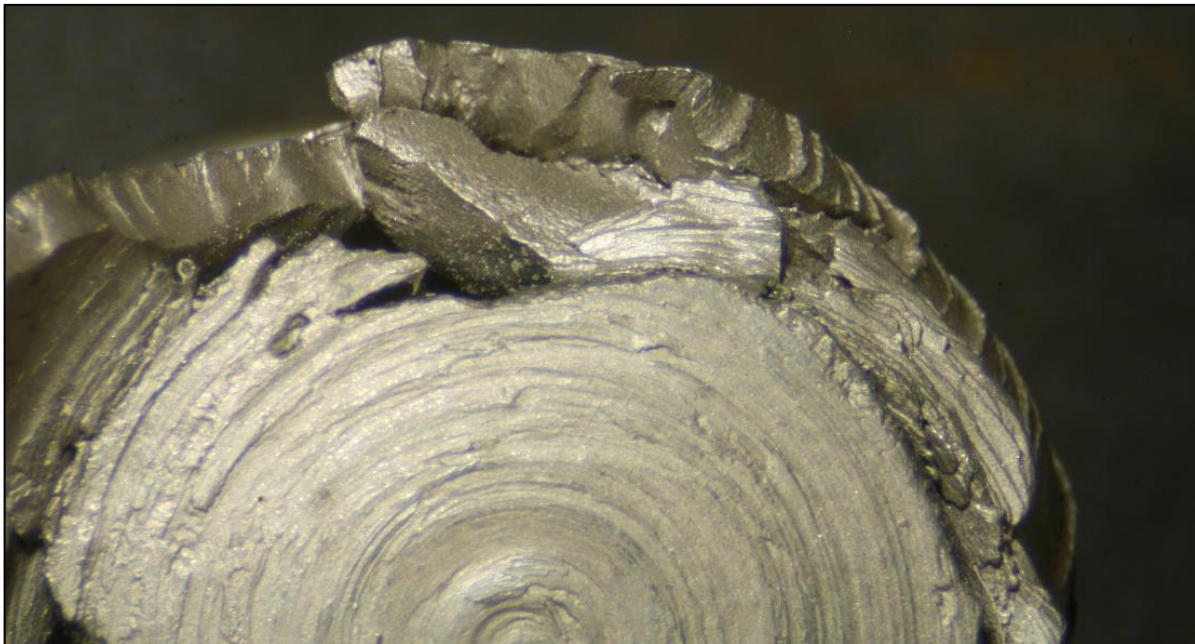
Παρατηρείται η ολοκληρωτική αποσάθρωση του θραύσματος το μέγεθος των ρωγμών κατά πολλές διευθύνσεις ακόμα και ένδειξη τηγμένου μετάλλου πάνω στην θραυσμένη επιφάνεια κάτι που δηλώνει την αύξηση θερμοκρασίας που υπέστη κατά την θραύση του (Εικόνα 4.24).



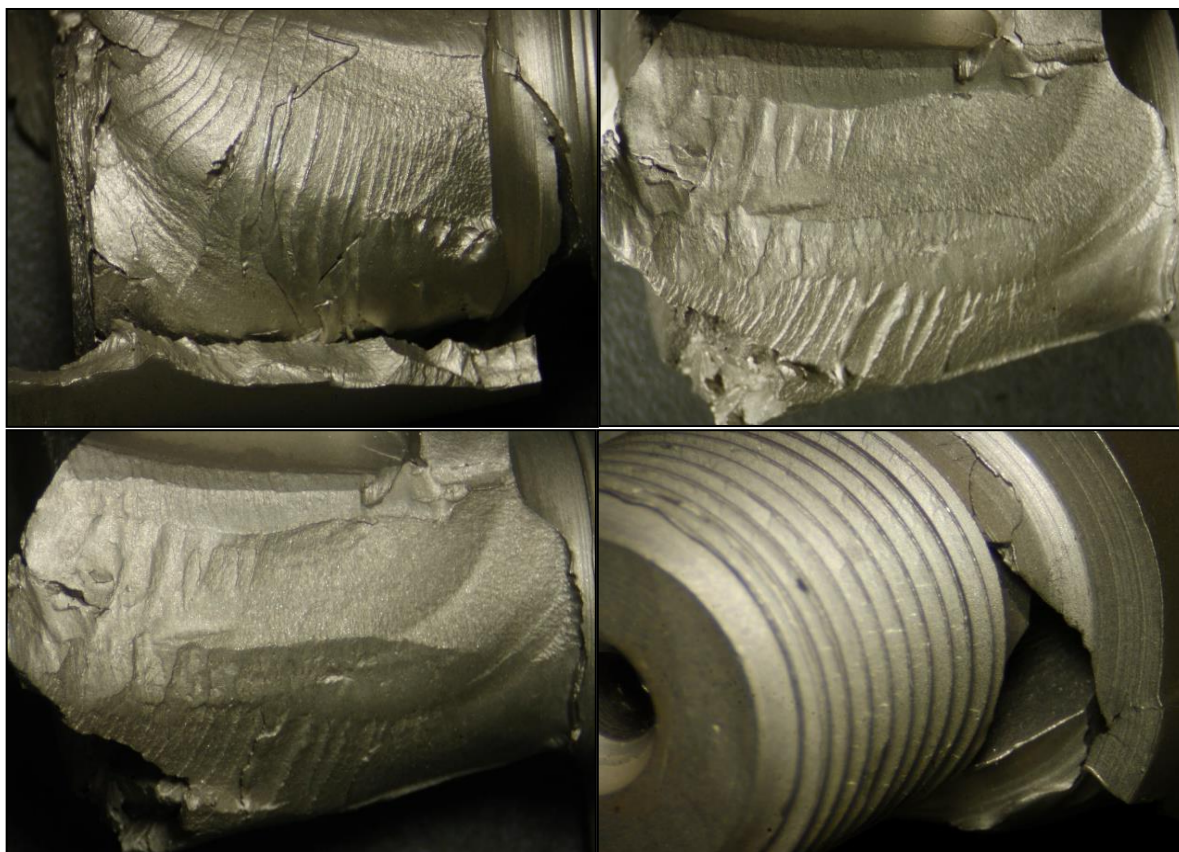
Εικόνα 4.20 Αποκολλημένο θραύσμα με εμφανή σημάδια αποσάθρωσης.



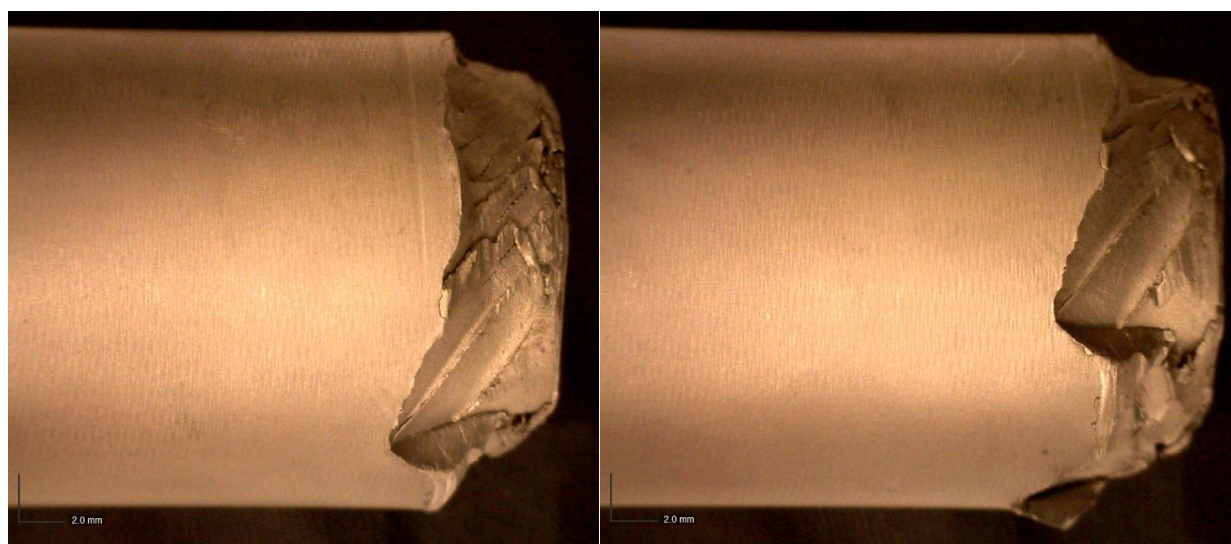
Εικόνα 4.21 Θραύσμα. Η λείανση δείχνει συνέχιση χρήσης μετά την αστοχία του.



Εικόνα 4.22 Αποσάθρωση.

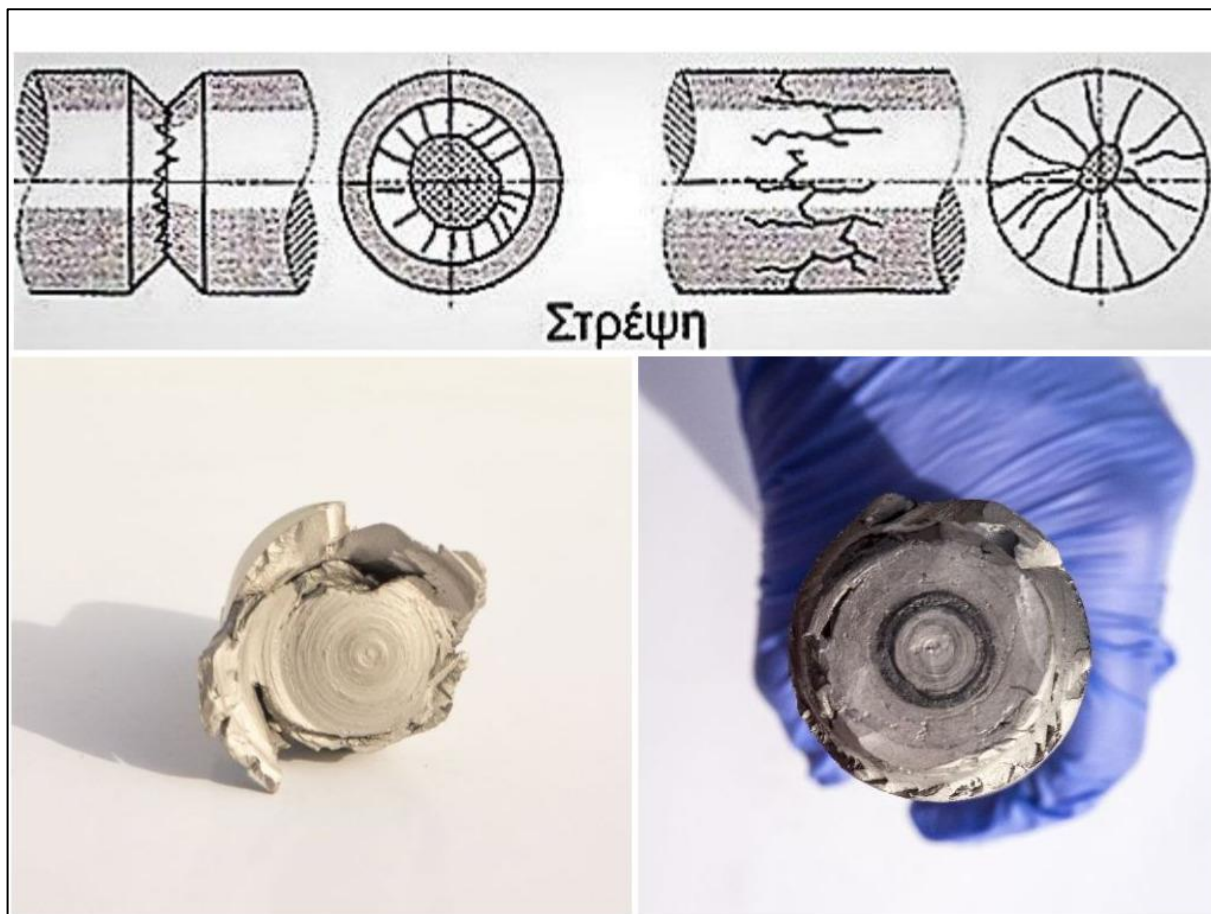


Εικόνα 4.23 Τηγμένο μέταλλο στην επιφάνεια θραύσης και μέγεθος ρωγμών.



Εικόνα 4.24. Περιστροφή του άξονα με εστίαση στο σημείο της θραύσης.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, αναπτύσσονται διάφορες μορφές επιφάνειας θραύσης σε εξαρτήματα από χάλυβα με χαρακτηριστικές προεγκοπές (ενισχυτές τάσεων), σε διάφορες συνθήκες καταπόνησης (εφελκυσμού, θλίψης, κάμψης με μια διεύθυνση, κάμψη με αναστροφή κάμψη με περιστροφή και στρέψη [4]. Από την μακροσκοπική εξέταση έλεγχου παρατηρείται ότι η περίπτωση που προσεγγίζει περισσότερο την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο άξονας N1, είναι αυτή της στρέψης σύμφωνα με την εικόνα 4.25 [4].



Εικόνα 4.25 Σύγκριση άξονα και θραύσματος με βιβλιογραφικές αναφορές [4]

#### 4.5.2 Άξονας N2

Στις εικόνες 4.26 έως 4.30 παρουσιάζονται λεπτομέρειες που προέκυψαν από την στεροσκοπική ανάλυση του άξονα N2.

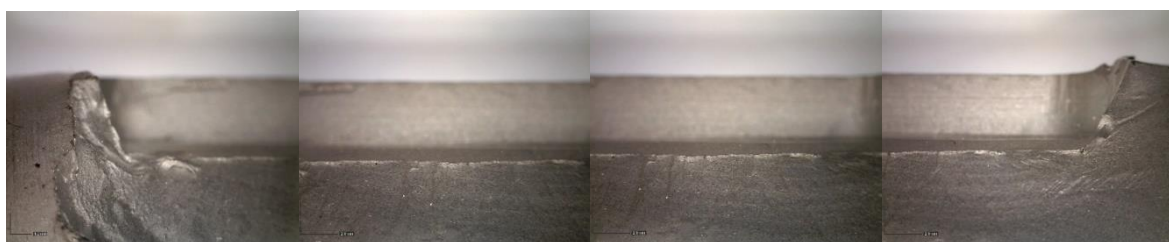
Ο δεύτερος άξονας, αστόχησε δίπλα στο σημείο όπου ασφαλίζει με την περωτή. Σε χαμηλή μεγέθυνση, με τη βοήθεια του στερεοσκοπίου, η αστοχία προσδιορίζεται δίπλα στη σφηνάλακα. Η ρωγμή αναπτύχθηκε λόγω της κόπωσης που προήλθε από στρεπτικές δυνάμεις, αφήνοντας αποτυπώματα στην επιφάνεια της θραύσης. Τα δύο θραύσματα διαχωρίστηκαν μετά τη θραύση (Εικόνες 4.26 και 4.27). Η μικρή ζώνη κόπωσης συγκριτικά με την αποκόλληση των δύο θραυσμάτων, υποδηλώνουν υψηλές τάσεις κόπωσης.



Εικόνα 4.26 Σημάδια κόπωσης στο θραύσμα, στο σημείο της σφήνας



Εικόνα 4.27 Σημάδια παραλίας στο θραύσμα.



Εικόνα 4.28 Η σφήνα του άξονα σε ολόκληρο μήκος.





Εικόνα 4.29 Η ρωγμή που ξεκινάει από το σφηνόδρομο.



Εικόνα 4.30 Εσωτερικό σφηνάλακας με διακριτά τα σημάδια φρέζας.

## 4.6 Μέτρηση σκληρότητας

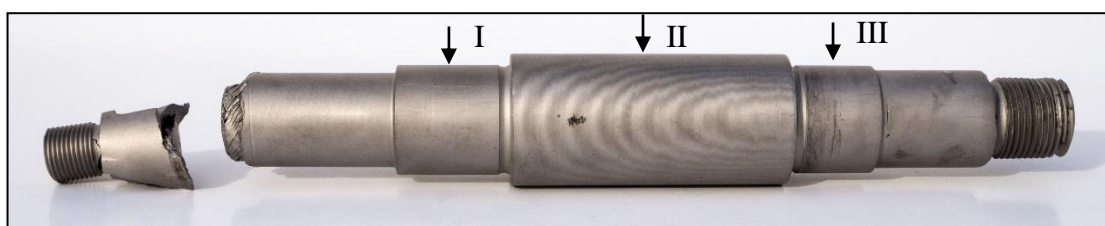
Στο πειραματικό μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σκληρότητας στο σκληρόμετρο του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Οι μετρήσεις σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο HRC, ενώ το σκληρόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι INNOVATEST 600 SERIES, model 600a (Εικόνα 4.31).

Η σκληρομέτρηση πραγματοποιήθηκε μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες του άξονα και όχι στο εσωτερικό του, προκειμένου να μην πραγματοποιηθεί καταστροφικός έλεγχος. Οι δύο σειρές μετρήσεων έχουν ληφθεί από την ίδια επιφάνεια του άξονα και σε κοντινά σημεία



Εικόνα 4.31 Διαδικασία λήψης μετρήσεων σκληρότητας του άξονα.

Στην εικόνα 4.32 παρουσιάζονται τα σημεία στα οποία έχει πραγματοποιηθεί σκληρομέτρηση και στον πίνακα 4.1 δίνονται οι τιμές σκληρότητας στην περίμετρο των αξόνων



4.32 Γενική άποψη του άξονα N1 και τα σημεία σκληρομέτρησης.

Πίνακας 4.1 Σκληρότητα των αξόνων (HRC)

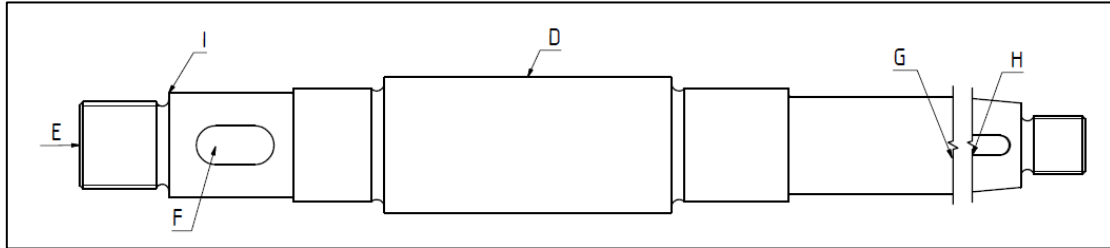
Άξονας	N1			N2		
	I	II	III	I	II	III
Σημείο μέτρησης						
1η μέτρηση	12	10	7	11	10	10
2η μέτρηση	12	10	8	11	10	10
Σκληρότητα HRC	12	10	7,5	11	10	10

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις, παρατηρούμε ότι η σκληρότητα διαφέρει από άξονα σε άξονα. Ο άξονας N1 χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενής, μιας και η σκληρότητά είναι διαφορετική όχι μόνο στις τρεις διαφορετικές επιφάνειες που μετράμε (I,II,III), αλλά ακόμη και στην ίδια περιοχή υπάρχουν αποκλίσεις. Αντιθέτως ο άξονας N2 χαρακτηρίζεται ως ομοιογενής καθώς η σκληρότητά του είναι σταθερή σε όλες τις μετρούμενες επιφάνειες και σχεδόν ίση με 11 HRC.

Οι σκληρότητες των αξόνων κυμαίνονται από 7 HRC = 170 HB έως 12 HRC = 186 HB (Hardness Brinell), τιμές που χαρακτηρίζονται πολύ χαμηλές και ακατάλληλες για το υλικό που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εφαρμογή [13]. Σύμφωνα με συστάσεις τεχνικών φυλλαδίων, για τέτοιου τύπου εφαρμογές η σκληρότητα κυμαίνεται από 248HB (24HRC) έως 388HB (42HRC) ανάλογα με το υλικό κατασκευής [14]. Βέβαια υπάρχει τεράστια ποικιλία υλικών και κραμάτων, κυρίως ειδικών κραμάτων, που η τιμή της σκληρότητας δεν αναφέρεται σε όλες τις περιπτώσεις ελεύθερα στο διαδίκτυο όπως και η χημική σύσταση. Οι τιμές σκληρότητας που αναφέρουμε είναι βάσει μίας εταιρίας και είναι μια προσέγγιση καθώς μπορεί για την ίδια εφαρμογή να υπάρχει απαίτηση σκληρότητας μεγαλύτερη των 42HRC.

#### 4.7 Χημική ανάλυση

Στο πλαίσιο της αναγνώρισης του υλικού του υπάρχοντος άξονα πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση με τον εξοπλισμό της εταιρίας SPECTRUMLABS S.A.. Το μηχάνημα Innov-X systems είναι της κατηγορίας P.I.M. (Positive material identification) το οποίο χρησιμοποιεί τον φθορισμό ακτινών X για την αναγνώριση της χημικής σύστασης του υλικού (Εικόνα 4.34). Το συγκεκριμένο όργανο δεν αφήνει κάποιου είδους αποτύπωμα, συνεπώς είναι μη καταστροφική μέθοδος και δεν έχει την δυνατότητα να καταγράψει το στοιχείο του άνθρακα (Εικόνες 4.36, 4.38, 4.40, 4.42, 4.44, και 4.46). Για την λήψη των μετρήσεων δεν χρειάστηκε κάποιου είδους προεργασία και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στον άξονα N1, στο θραύσμα του αλλά και σε διάφορα σημεία όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες ( Εικόνες 4.33, 4.35, 4.37, 4.39, 4.41, 4.43, και 4.45). Ένας γρήγορος έλεγχος για το είδος του υλικού ήταν να χρησιμοποιήσουμε έναν μαγνήτη και να δούμε εάν το υλικό μαγνητίζει. Από αυτό τον έλεγχο παρατηρήσαμε ότι το υλικό μας ήταν ελαφρά μαγνητιζόμενο. Αυτό πιθανότατα σημαίνει ότι εμπεριέχει κάποιο τύπο ανοξειδωτου χάλυβα, καθώς εάν ήταν αλουμίνιο δεν θα υπήρχαν μαγνητικές δυνάμεις, ενώ εάν ήταν κάποιος βελτιωμένος χάλυβας θα μαγνητιζε ισχυρά.



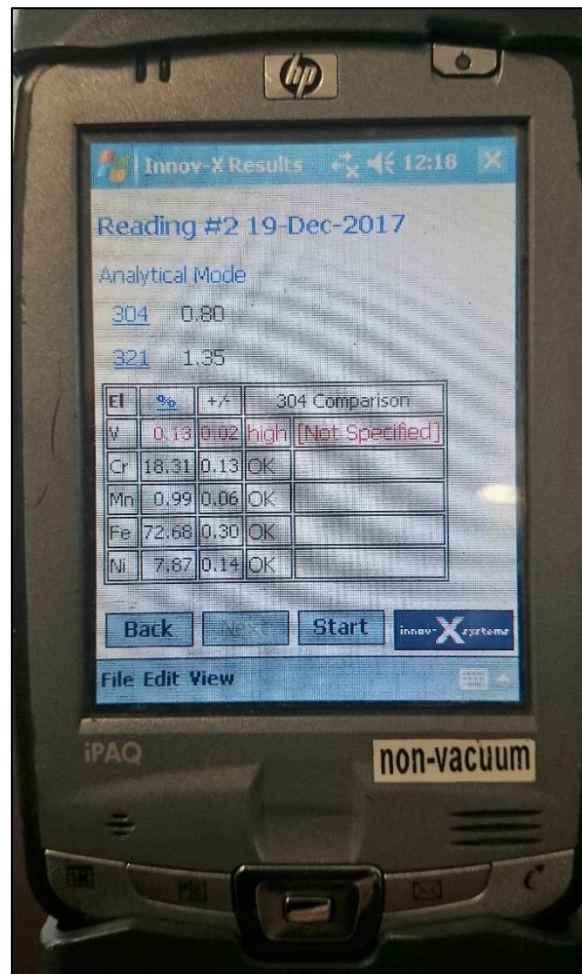
Εικόνα 4.33 Ενδεικτικοί συμβολισμοί των επιφανειών όπου έγινε χημική ανάλυση.



Εικόνα 4.34 Όργανο μέτρησης χημικής σύστασης υλικού το οποίο χρησιμοποιήθηκε.



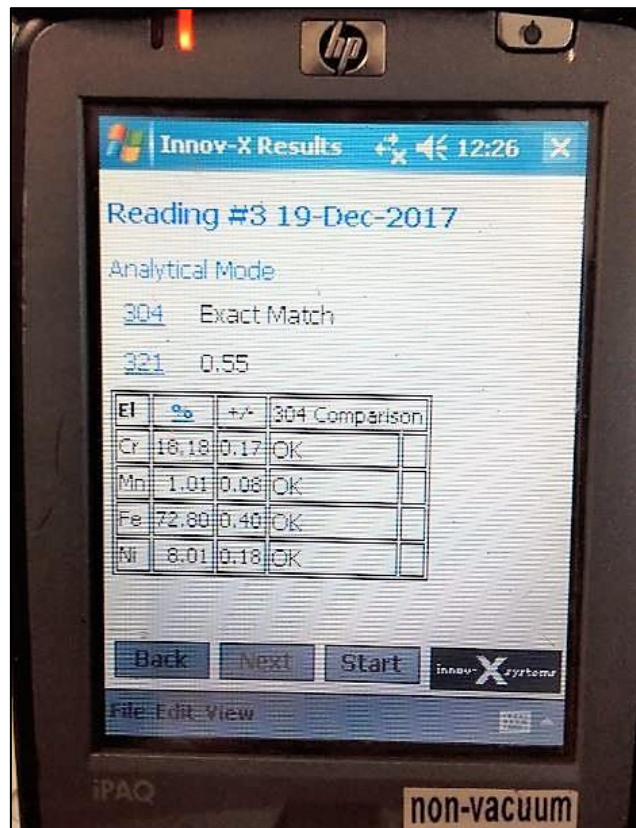
Εικόνα 4.35 Μέτρηση στο σημείο D.



Εικόνα 4.36 Αποτελέσματα μέτρησης σημείου D.



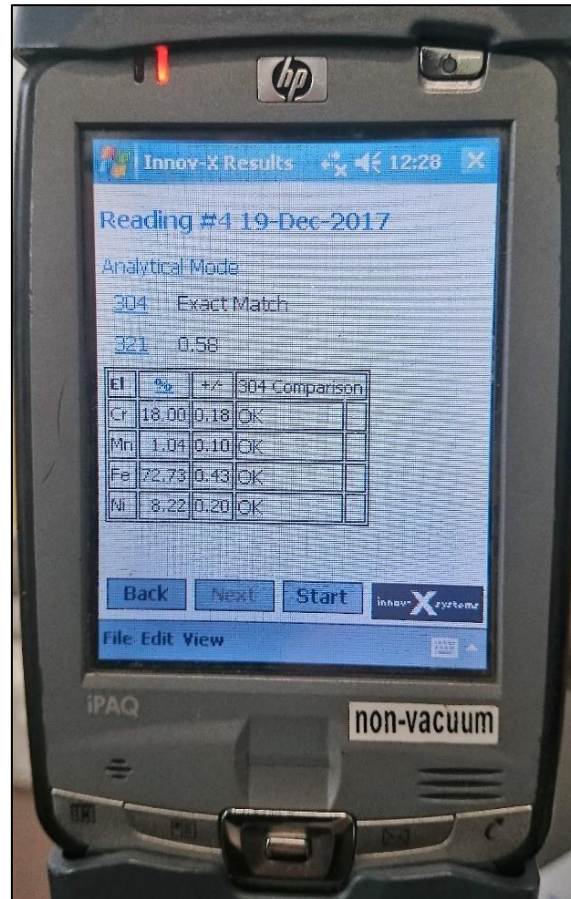
Εικόνα 4.37 Μέτρηση στο σημείο G.



Εικόνα 4.38 Αποτελέσματα μέτρησης σημείου G.



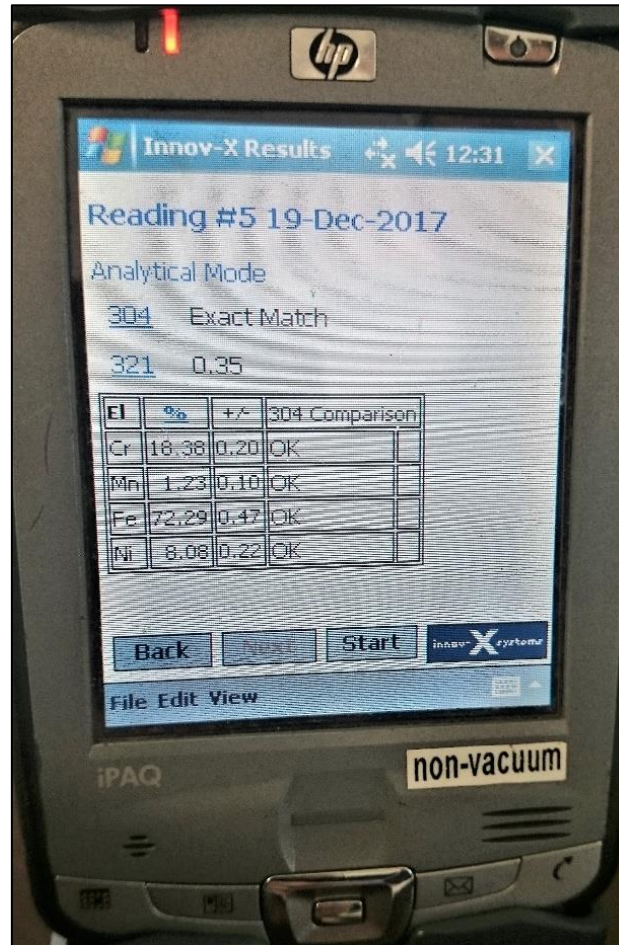
Εικόνα 4.39 Μέτρηση στο σημείο Η.



Εικόνα 4.40 Αποτελέσματα μέτρησης σημείου Η.



Εικόνα 4.41 Μέτρηση στο σημείο Ε.

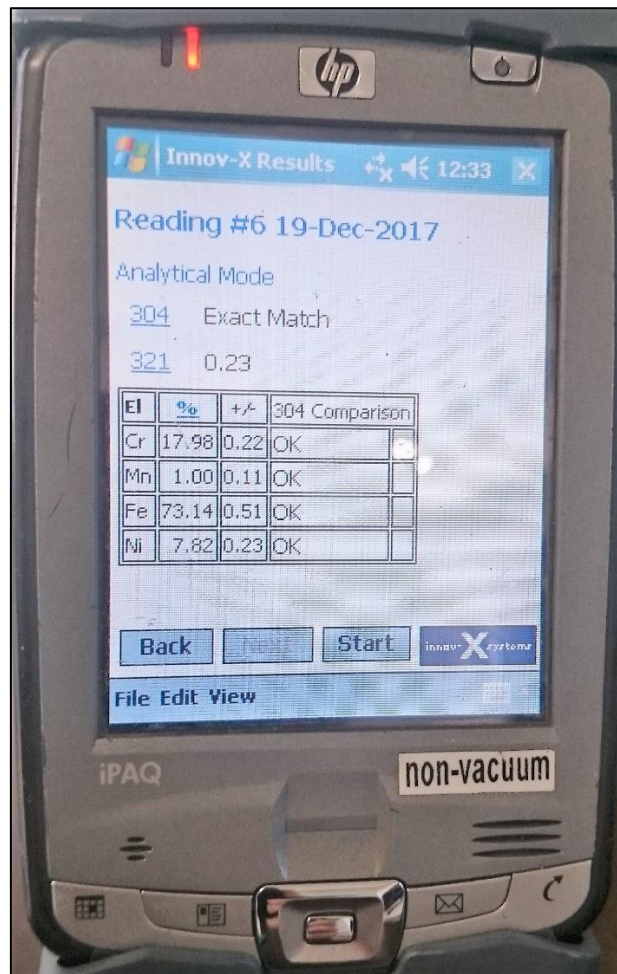


Εικόνα 4.42 Αποτελέσματα μέτρησης σημείου Ε.



Εικόνα 4.43 Μέτρηση στο σημείο Ι.

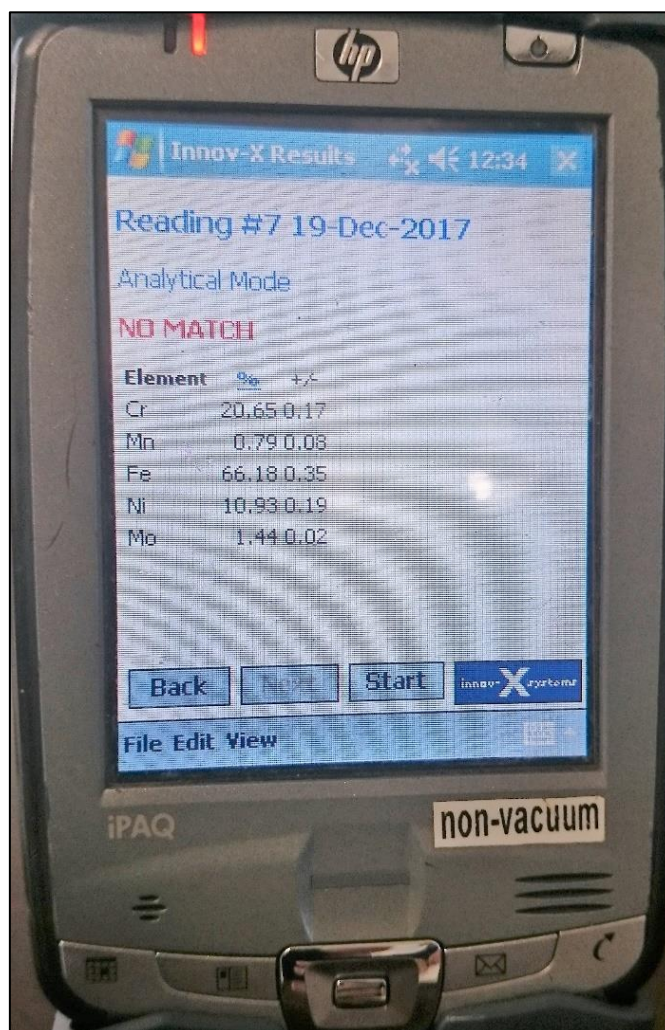




Εικόνα 4.44 Αποτελέσματα μέτρησης σημείου I.



Εικόνα 4.45 Μέτρηση στο σημείο F.



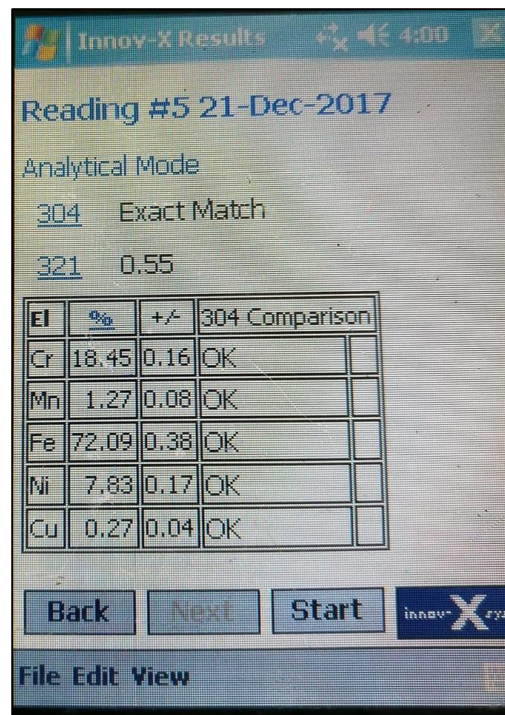
Εικόνα 4.46 Αποτελέσματα μέτρησης σημείου F.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παρακάτω αποτελέσματα, το υλικό κατασκευής του άξονα N1 είναι το AISI 304, όπου παρουσιάζει πλήρη ταύτιση στις περισσότερες μετρήσεις. Στις περιπτώσεις όπως στην μέτρηση των σημείων D και F η ταύτιση δεν ήταν μόνο για το υλικό AISI 304 αλλά και για το AISI 321 και αυτό διότι ανιχνεύτηκε ποσότητα βαναδίου η οποία δεν άρμοζε στο εύρος της ποσότητας που πρέπει να έχει ο χάλυβας AISI 304. Παρόμοιο γεγονός παρατηρήθηκε και στην μέτρηση του σημείου F όπου δεν έγινε ταύτιση με κάποιο υλικό με τα αποτελέσματα βέβαια να μην αποκλίνουν πολύ από τα στοιχειώδη εύρη.

Οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στον άξονα N2 παρουσιάζονται στην εικόνα 4.47, και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην εικόνα 4.48.



Εικόνα 4.47 Χημική ανάλυση άξονα N2.



Εικόνα 4.48 Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης του άξονα N2.

Σύμφωνα με τη χημική ανάλυση το υλικό κατασκευής και του άξονα N2 είναι ο ο χάλυβας AISI 304.

Για την εξακρίβωση του υλικού και βάση των τυποποιημένων ευρών που πρέπει να έχει ο χάλυβας AISI 304, έγινε αναζήτηση στην Aerospace Specification Materials) [8] και έγινε η σύγκριση των μετρούμενων καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι ο χάλυβας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε είναι ο AISI 304 (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2 Εύρος χημικής σύστασης χάλυβα AISI 304.[8]

Component		C	Cr	Fe	Mn	Ni	P	S	Si
Wt. %	Min	-	18	66,345	-	8	-	-	-
	Max	0,08	20	74	2	10,5	0,045	0,03	1

#### 4.8 Εύρεση σημείου μέγιστης τάσης με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

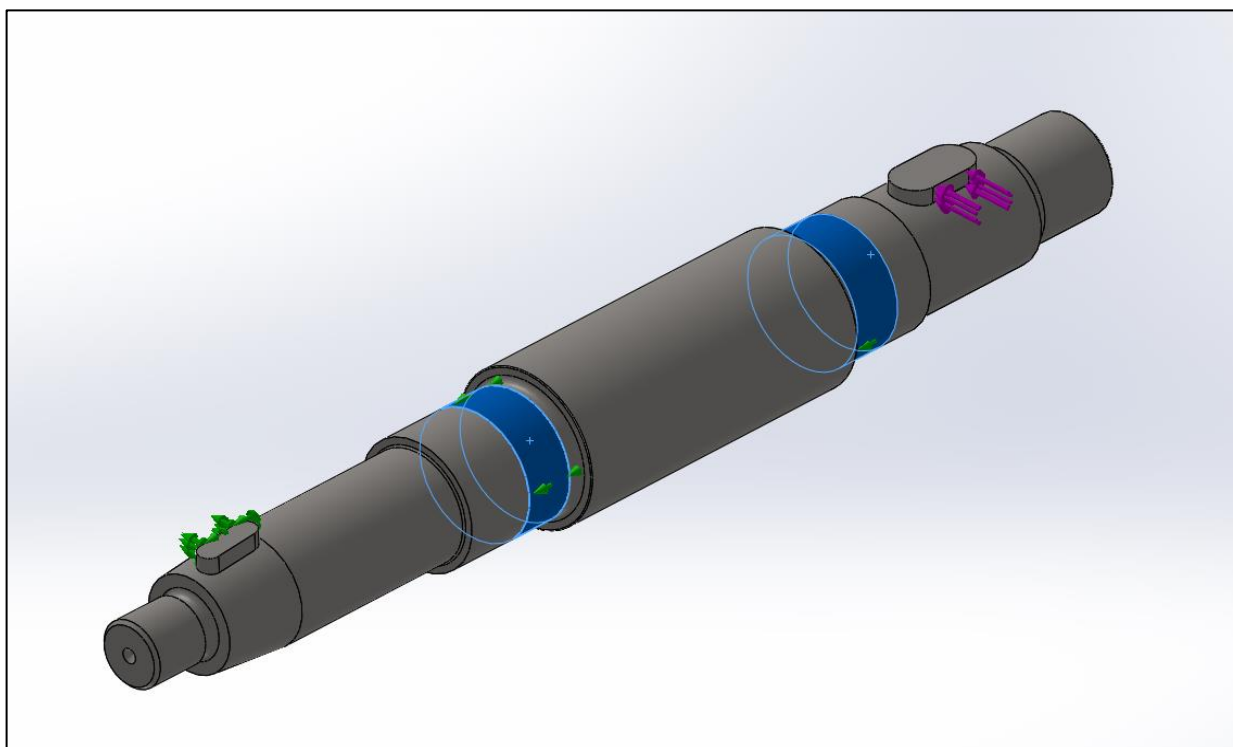
Για τον έλεγχο της τοποθεσίας των μέγιστων τάσεων του άξονα πραγματοποιήθηκε μια σύντομη προσομοίωση στο λογισμικό της εταιρίας Dassault Systems στο πρόγραμμα Solidworks 2017. Πρέπει να αναφερθεί ότι στην ακόλουθη μελέτη δεν είναι γνωστό το μέγεθος της ισχύος ή της ροπής που λαμβάνει ο άξονας. Επιπλέον στο σημείο των μέγιστων τάσεων εφαρμόζουμε αυθαίρετα μια τιμή δύναμης, όπου μεταφράζεται σε ροπή. Η επιλογή υλικού του άξονα έγινε βάση της χημικής ανάλυσης ο AISI 304 και των σφηνών κράμα χάλυβα (alloy steel).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.49, για προσομοιώσουμε σε έναν καλό βαθμό το πρόβλημα μας, θέσαμε μια δύναμη στην επιφάνεια της σφήνας η οποία λαμβάνει την ροπή από τον

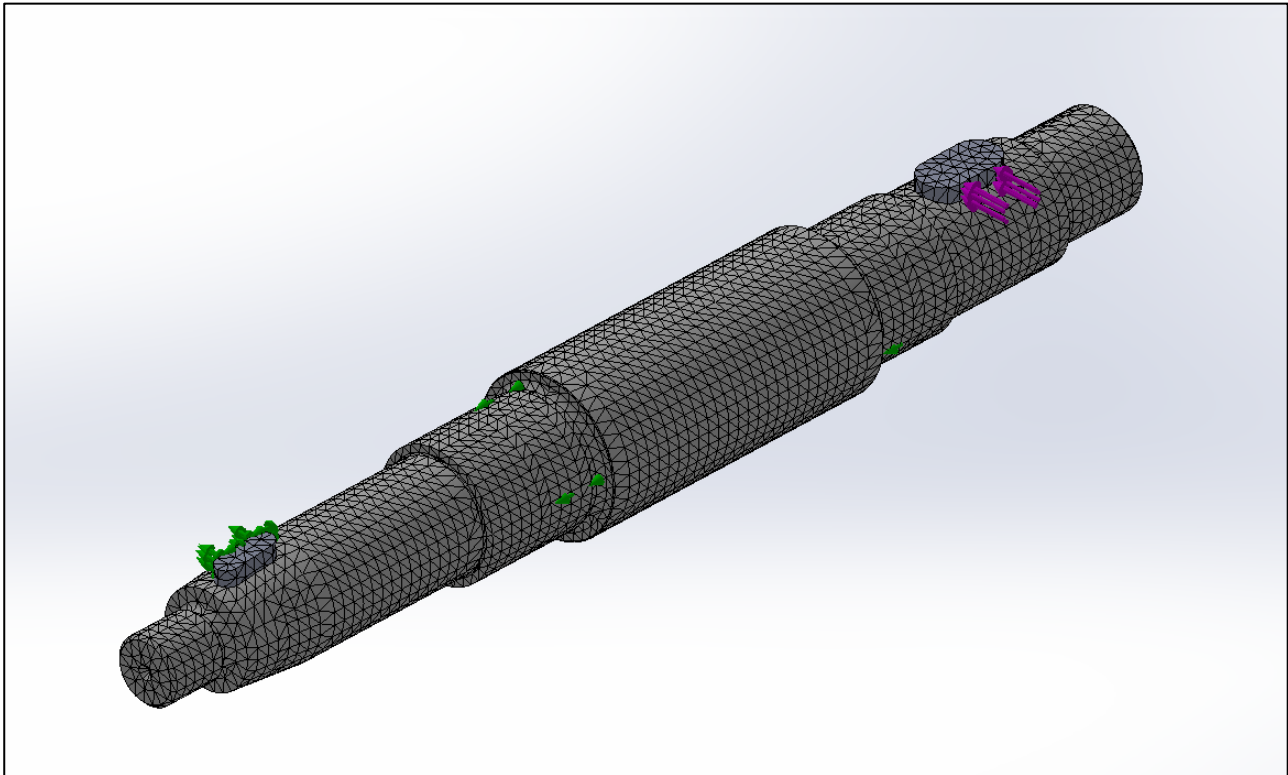
οδοντωτό τροχό (μωβ βέλη, εικόνα 4.50). Αντίστοιχα για να δημιουργήσουμε τις στρεπτικές τάσεις, πακτώνουμε την πλευρά της σφήνας η οποία συνδέεται με την αντλία (πράσινα βέλη). Επίσης στην επιφάνεια των εδράνων κύλισης τοποθετούμε τις αντίστοιχες εδράσεις (μπλε επιφάνειες) που επιτρέπουν μόνο την περιστροφή του άξονα. Στην εικόνα 4.51 παρουσιάζεται και η δημιουργία του πλέγματος πριν την επίλυση.



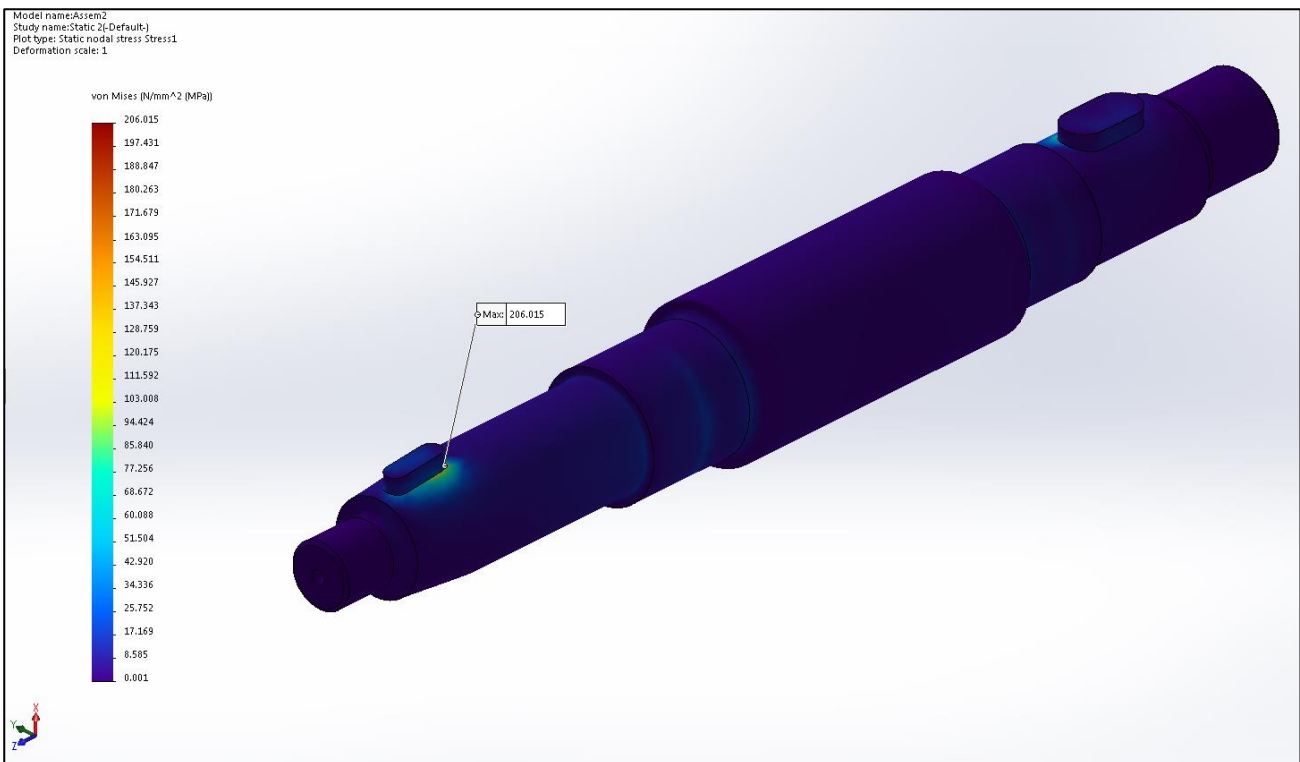
Εικόνα 4.49 Σύνδεση άξονα με οδοντωτό τροχό και στις εδράσεις του.



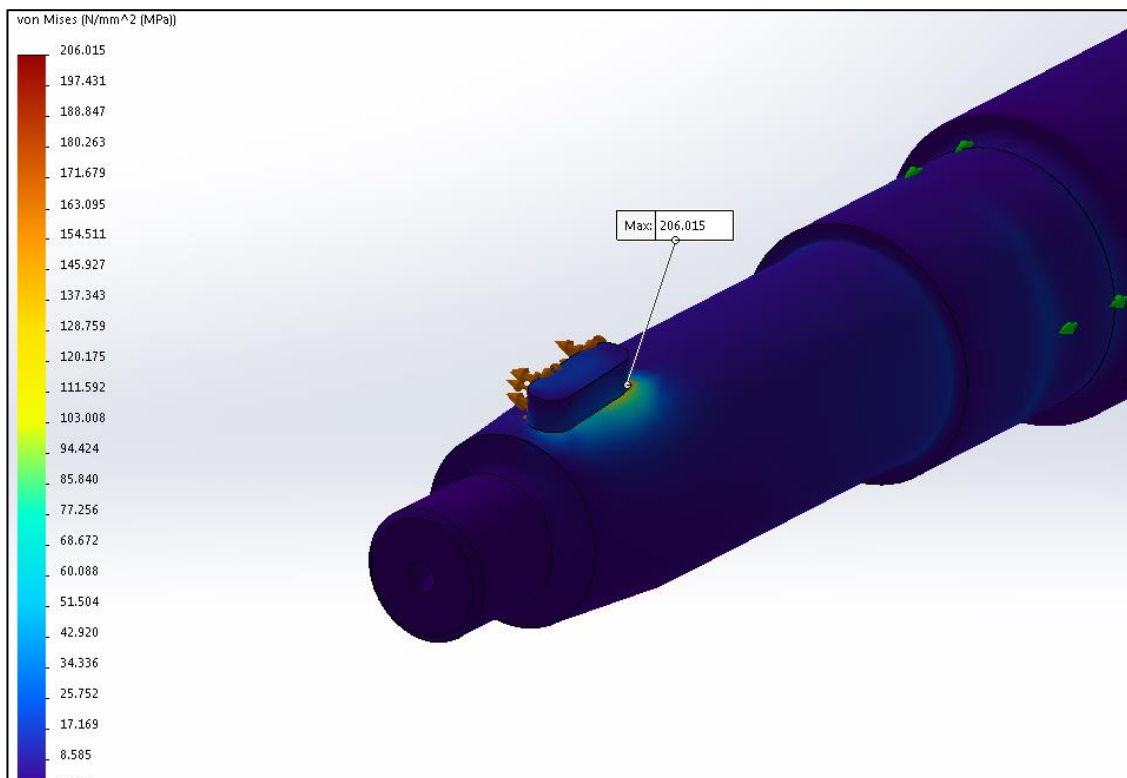
Εικόνα 4.50 Οριακές συνθήκες επίλυσης του προβλήματος



Εικόνα 4.51 Δημιουργία πλέγματος.

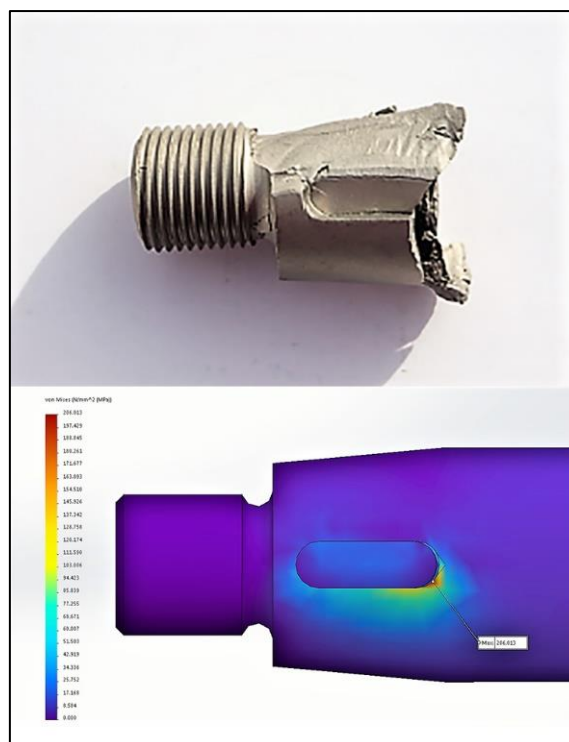


Εικόνα 4.52 Αποτελέσματα επίλυσης.



Εικόνα 4.53 Μεγέθυνση στο σημείο μέγιστων τάσεων.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρούμε ότι το σημείο με τις μέγιστες τάσεις είναι τελικά και το σημείο θραύσης του πραγματικού άξονα. Το σημείο αυτό εμφανίζεται προς το πίσω άκρο της σφήνας και στο τέλος του κωνικού μέρους του άξονα ( Εικόνα 4.53). Επομένως μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι ήταν επόμενο να επέλθει η θραύση σε αυτό το σημείο, καθώς είναι τα αποτελέσματα μας πάρα πολύ κοντά με την πραγματικότητα (Εικόνα 4.54). Επίσης στο συγκεκριμένο σημείο υπάρχει μεταφορά ροπής [15].



Εικόνα 4.54 Σύγκριση πραγματικού σημείου θραύσης με το αποτέλεσμα της ανάλυσης.

## 5. Καταστροφικός έλεγχος των αξόνων

Οι καταστρεπτικές δοκιμές, πραγματοποιήθηκαν στον εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν τον τεμαχισμό των δύο αξόνων και τη μικροσκοπική ανάλυση με οπτικό μικροσκόπιο. Ο τεμαχισμός των αξόνων έγινε έτσι ώστε τα τμήματα των αξόνων να προετοιμαστούν, προκειμένου να προσβληθούν χημικά και έπειτα να αναλυθούν στο οπτικό μικροσκόπιο.

### 5.1 Κοπή των δειγμάτων

Οι δύο άξονες κόπηκαν σε συγκεκριμένα σημεία, από το προσωπικό του εργαστηρίου, βάσει των προτύπων ASTM. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με το κοπτικό της εταιρίας Struers Lobotom-3 (type: 05326156/ serial No: 5321698), μοτέρ μικροτόμου: ABB MOTORS, ενώ για την ψύξη χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού (Εικόνα 5.1).

Ο άξονας N1 έχει κοπεί σε 2 σημεία. Τα σημεία ενδιαφέροντος είναι τα άκρα του, μιας και εκεί αστόχησε (Εικόνα 5.2b). Ο άξονας N2 έχει κοπεί σε ένα σημείο. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο σημείο επειδή βρίσκεται σε σημείο αλλαγής διατομής το οποίο έχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων (Εικόνα 5.2a).



Εικόνα 5.1 Κοπτικό Struers Lobotom-3



Εικόνα 5.2 Οι άξονες N1(b) και N2(a) τεμαχισμένοι.

## 5.2 Χημική προσβολή

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της κοπής των αξόνων επιλέχθηκαν δοκίμια για μεταλλογραφική ανάλυση. Ακολούθησε προετοιμασία των δοκιμίων με λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Η προετοιμασία των μεταλλογραφικών δοκιμίων διενεργήθηκε σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο [16].

Για τη χημική προσβολή, χρησιμοποιήθηκε διάλυμα Dilute Aqua Regia το οποίο κατασκευάστηκε από το προσωπικό του εργαστηρίου (15ml HCl, 5ml HNO<sub>3</sub> και 100ml H<sub>2</sub>O).

Χρησιμοποιείται κατεξοχήν για ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες (όπως είναι και το υλικό μελέτης μας) διότι προσβάλλει τη σ φάση, τονίζει τα καρβίδια και εμφανίζει τα όρια των κόκκων. Η σύστασή του αντιδραστήριου είναι προτυποποιημένη [17].

### 5.2.1 Άξονας N1

Αρχικά προσβάλλεται χημικά η επιφάνεια του δοκιμίου I, όπου υπάρχει η υποψία συγκόλλησης στη συγκεκριμένη περιοχή ( σημείο I στην Εικόνα 5.3 ). Ο χρόνος παραμονής του τεμαχίου μέσα στο αντιδραστήριο ήταν 8 λεπτά και 23 δευτερόλεπτα.

Στη συνέχεια ακολουθεί η επιφάνεια που βρίσκεται δίπλα στο σημείο της θραύσης (σημείο II στην Εικόνα 5.3). Ο χρόνος παραμονής του τεμαχίου μέσα στο αντιδραστήριο ήταν 12 λεπτά και 20 δευτερόλεπτα.

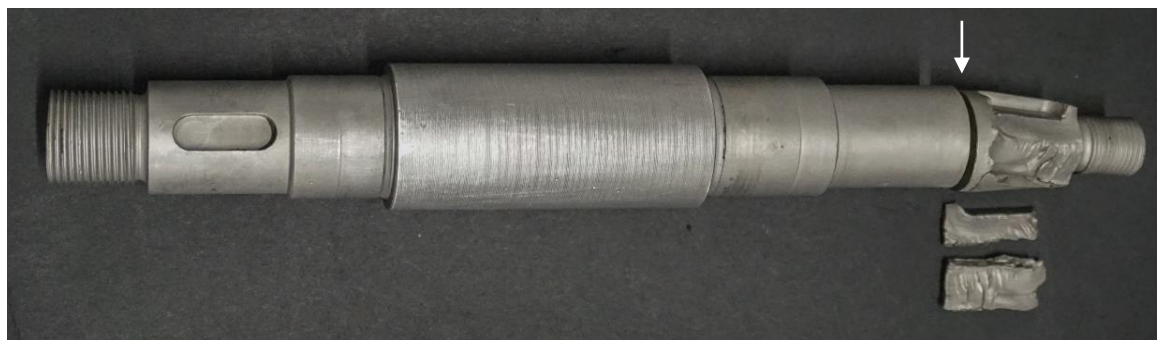


Εικόνα 5.3 Τα σημεία κοπής του άξονα N1 και οι επιφάνειες χημικής προσβολής.

### 5.2.2 Άξονας N2

Αντίστοιχα η κομμένη επιφάνεια του προς μελέτη δοκιμίου προσβάλλεται χημικά μέσα στο διάλυμα για 32 λεπτά και 17 δευτερόλεπτα.





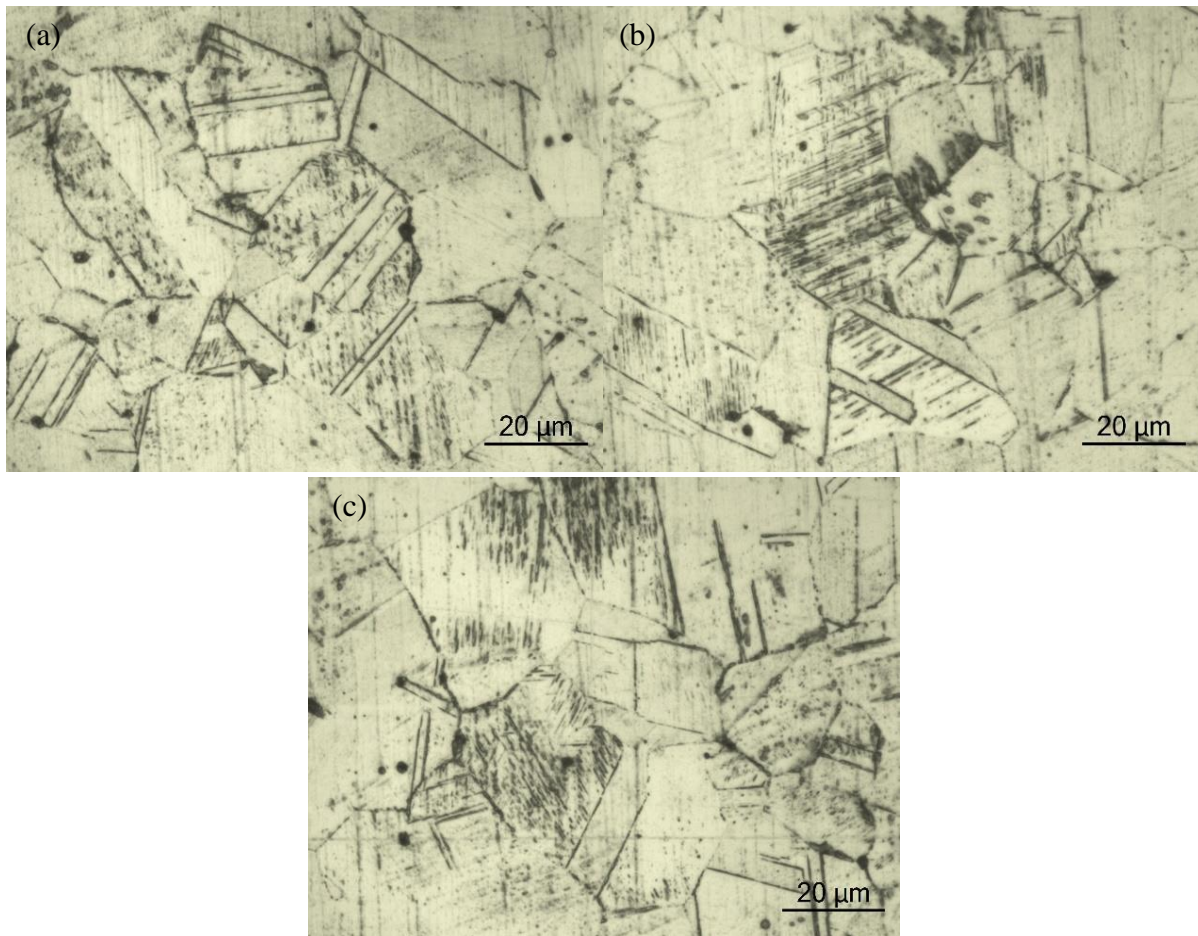
Εικόνα 5.4 Το σημείο κοπής του άξονα N2 η επιφάνεια χημικής προσβολής.

## 5.3 Ανάλυση Μικροδομής

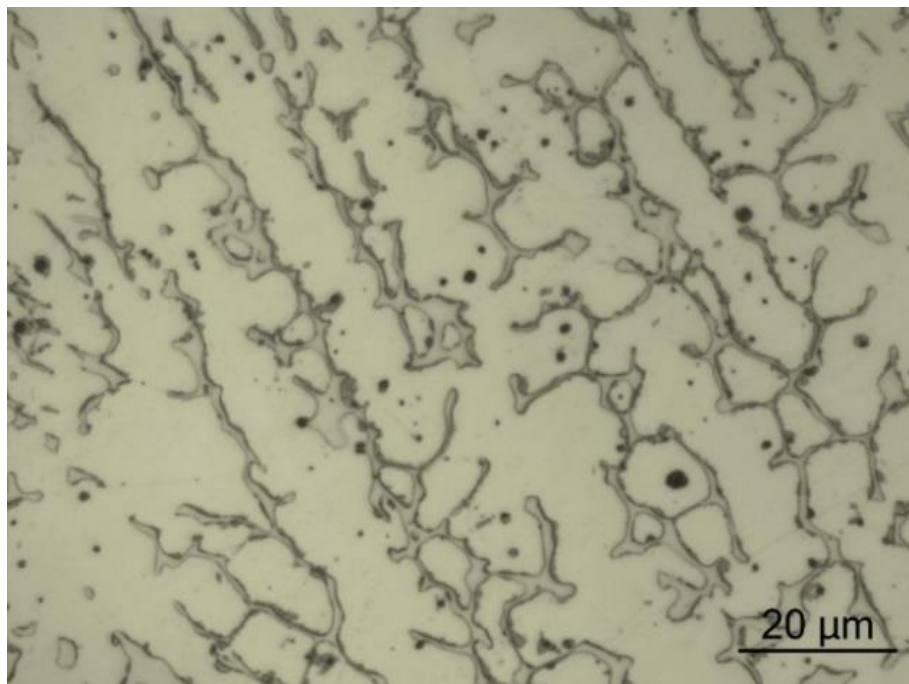
### 5.3.1 Άξονας N1

Στο σημείο του άξονα που βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά από αυτή της θραύσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση της μικροδομής. Απεικονίζονται κόκκοι ωστενίτη, κατακρημνίσεις καρβιδίων στα όριά τους και διδυμίες. Οι διδυμίες προέρχονται από τις ανοπτήσεις, είναι ατέλειες εντός του κόκκου και οφείλονται στο γεγονός ότι το υλικό αγοράστηκε σε ανοπτυμένη κατάσταση (Εικόνες 5.5a,b). Επιπλέον παρατηρούνται ολισθήσεις πλεγματικών επιπέδων, οφειλόμενες στην εκτενή πλαστική παραμόρφωση που υπέστη ο άξονας μέχρι τη θραύση του (Εικόνα 5.5c).

Η αρχική εκτίμηση για την ύπαρξη συγκόλλησης στην περιοχή του σπειρώματος (σημείο I στην Εικόνα 5.3) επιβεβαιώθηκε (Εικόνα 5.6). Στο οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο απεικονίζεται το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση το οποίο παρουσιάζει δενδριτική μορφή, δεν έχει δομή ούτε κόκκους. Συγκεκριμένα είναι δ-φερίτης σε μήτρα ωστενίτη στην περιοχή της συγκόλλησης ωστενιτικού χάλυβα. Λόγω συγκόλλησης στο συγκεκριμένο σημείο αρκετοί κόκκοι φαίνεται να εισχωρούν ο ένας στον άλλον. Η διεπιφάνεια της συγκόλλησης είναι δενδριτικής μορφής ενώ δεν έχει δομή ούτε κόκκους. Επίσης παρατηρούνται εκκρεμότητες λείανσης σε κάποια σημεία. Τα όρια των κόκκων φαίνονται ενισχυμένα και αυτό οφείλεται σε κατακρημνίσεις καρβιδίων του χρωμίου.



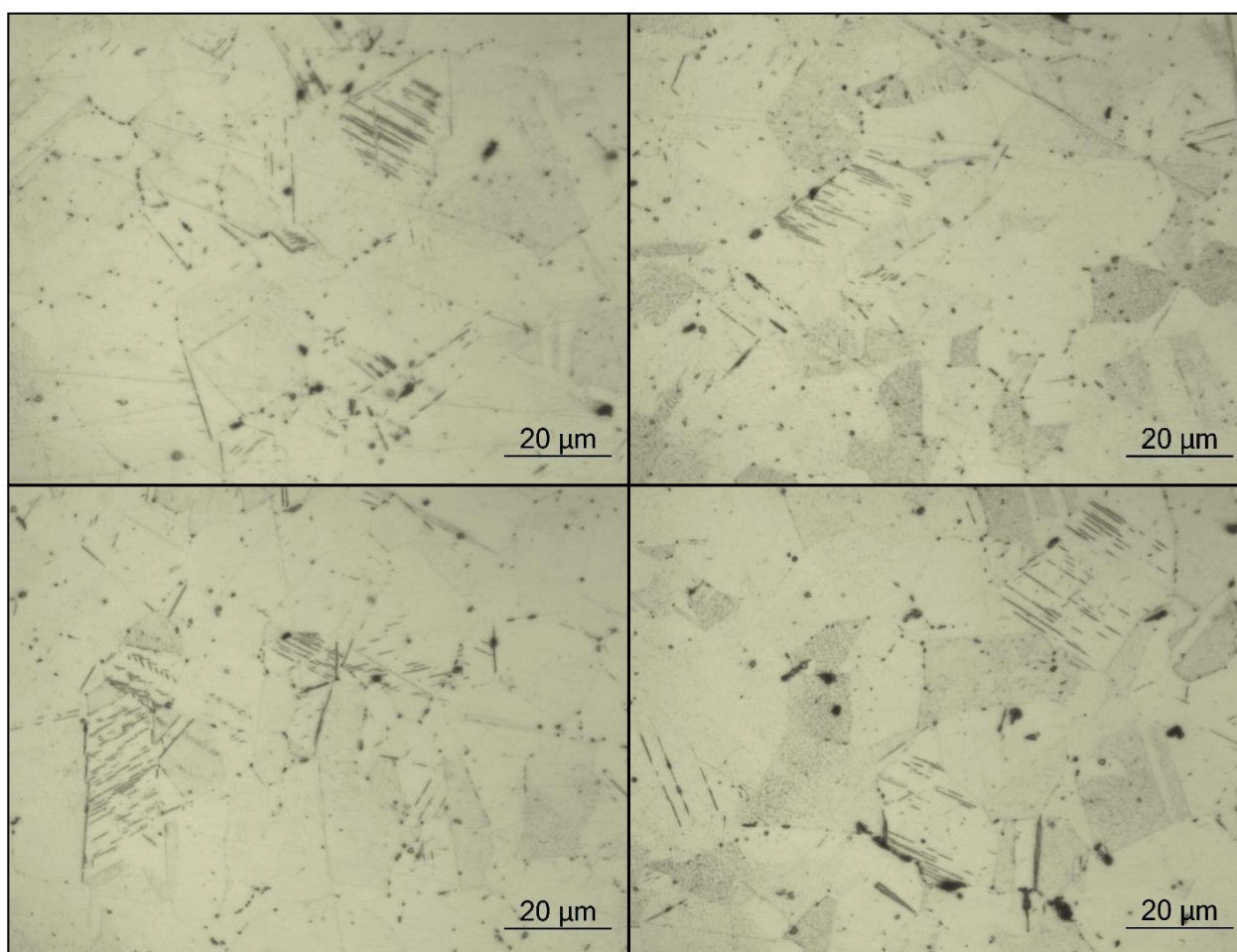
Εικόνα 5.5 Μικροδομή του υλικού κατασκευής του άξονα N1



Εικόνα 5.6 Μικροδομή του άξονα N1 στην περιοχή της συγκόλλησης (σύνολο δενδριτών εντός του υλικού συγκόλλησης στην περιοχή του σπειρώματος).

### 5.3.2 Άξονας N2

Το σημείο μελέτης βρίσκεται στην πλευρά της θραύσης (σημείο II στην Εικόνα 5.4). Η μικροδομή που απεικονίζεται έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά του άξονα N1 και αποτελείται από κόκκους ωστενίτη, κατακρημνίσματα καρβιδίων περιορισμένης έκτασης στα όρια των κόκκων, και διδυμίες. Οι παράλληλες γραμμές απεικονίζουν τον μαρτενσίτη που δημιουργείται λόγω εργοσκλήρυνσης κατά τη λειτουργία. Οι κουκίδες στα όρια των κόκκων αφορούν τη σ φάση που έχει κατακρημνιστεί στα όρια των κόκκων, λόγω παρατεταμένης παραμονής μεταξύ των 650-900°C κατά τη διαδικασία παρασκευής του υλικού. Τέλος, οι μικρές σφαίρες εντός των κόκκων, αποτελούν καρβίδια του χρωμίου τα όποια έχουν κατακρημνιστεί από εκτεταμένη έκθεση σε θερμοκρασίες μεταξύ 650-900°C (Εικόνα 5.7)



Εικόνα 5.7 Μικροδομή του υλικού κατασκευής του άξονα N2

## 6. Συμπεράσματα

Η κύρια αιτία αστοχίας των δύο αξόνων είναι κοινή. Οφείλεται στην καταπόνηση από στρεπτικές τάσεις οι οποίες ξεπέρασαν το συμβατικό όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση του υλικού (endurance limit). Συγκεκριμένα η θραύση προήλθε από ροπή στρέψης. Οι χάλυβες της συγκεκριμένης ποιότητας ανήκουν στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους οι οποίοι ως γνωστόν παρουσιάζουν διαρκώς μειούμενο όριο αντοχής σε κόπωση. Οφείλεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα στο οποίο κρυσταλλώνεται ο ωστενίτης. Η προσθήκη τιτανίου (Ti) και η χρήση του χάλυβα 304Ti κατά AISI ο οποίος παρουσιάζει φανερό όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση θα μπορούσε να ήταν μία λύση. Η εκτενής πλαστική παραμόρφωση σε επίπεδο αποσάθρωσης στο σημείο της σφηνάλακας αναιρεί τη χρήση του παραπάνω υλικού λόγω πολύ χαμηλών μηχανικών αντοχών του υλικού απέναντι στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Συμπερασματικά το συγκεκριμένο υλικό ήταν ακατάλληλο για τη συγκεκριμένη χρήση λόγω φύσης της μικροδομής και εφαρμοζόμενων στρεπτικών τάσεων.

Η θραύση ξεκίνησε από τον σφηνόδρομο στην πλευρά που ασφαρίζει η πτερωτή. Αυτό συμπίπτει και από την ανάλυση αυτής της κρίσιμης ζώνης με πεπερασμένα στοιχεία. Η λανθασμένη επιλογή υλικού έπαιξε κυρίαρχο παράγοντα στην αστοχία. Επίσης, η αστοχία επισπεύστηκε εξαιτίας της κακής καταργασίας.

Παρόμοια ζητήματα πρέπει να αντιμετωπίζονται άμεσα με τις κατάλληλες τεχνικές και πολλές φορές να προβλέπουν το πιθανό πρόβλημα κάνοντας της απαραίτητες κινήσεις. Οι υπεύθυνοι του πλοίου θα έπρεπε, επικοινωνώντας με την κατασκευάστρια εταιρία των αξόνων, να εξασφαλίσουν ότι ο άξονας είναι κατασκευασμένος από το σωστό υλικό αλλά και ότι έχει ακολουθήσει όλες τις προβλεπόμενες μηχανουργικές καταργασίες προτού τοποθετηθεί. Προκειμένου όμως το πλήρωμα να μπορεί να ανταπεξέλθει στη μια απρόσμενη αστοχία εν πλω, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση, είναι αναγκαίο να διαθέτει τα κατάλληλα υλικά στο μηχανουργείο του ώστε να κατασκευάσει το εξάρτημα.

Από οικονομικής και παραγωγικής άποψης οι συνέπειες μπορούν να ποσοτικοποιηθούν λαμβάνοντας υπόψιν το συνολικό κόστος των επισκευών. Εκτός από το κόστος των εξαρτημάτων, αυτό συμπεριλαμβάνει το χρόνο αντικατάστασης των εξαρτημάτων αλλά και το νεκρό χρόνο που απαιτείται γι' αυτήν, όπου το πλοίο παραμένει σε επισκευή.

## Βιβλιογραφία

1. DAS K. A. (1996) *Metallurgy of Failure Analysis*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc.
2. ΒΑΡΒΑΓΙΑΝΝΗΣ, Σ. (2014) *Ανάλυση αστοχίας κοπτικού καλουπιού μηχανήματος για εν ψυχρώ διαμόρφωση συρμάτων*. Πειραιάς: Αυτοέκδοση.
3. ASM HANDBOOK COMMITTEE (2002) *Failure Analysis and Prevention*. USA: ASM INTERNATIONAL.
4. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΔΗΣ, Γ. Κ. (2014) *Μεταλλογνωσία*. 2<sup>η</sup> έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
5. ΜΙΧΑΛΤΣΟΣ, Γ. Θ. και ΛΙΓΝΟΣ, Ξ.Α. (2014) *Οι μεταλλικές κατασκευές πριν και μετά τη μελέτη*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
6. ΠΑΣΠΑΛΑΣ (2009) Διαθέσιμο στο: [http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/TYPOPOIISH\\_XALYBON.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/TYPOPOIISH_XALYBON.pdf) [10/10/2018]
7. ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ, Π.Γ. (1997) *Μεταλλουργία*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
8. Aerospace Specification Metals Inc. Διαθέσιμο στο: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a>
9. ΔΑΓΚΙΝΗΣ, Κ. Ι. (2015) *Βοηθητικά Μηχανήματα Πλοίων*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
10. ΔΑΓΚΙΝΗΣ, Κ. Ι. και ΓΛΥΚΑΣ Ι. Α. (2016) *Αντλίες*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
11. Manual Daihatsu DK-20
12. Daihatsu Diesel (2017) Διαθέσιμο στο: [http://www.dhtd.co.jp/assets/flash/pdf\\_marine\\_diesel\\_engine\\_s\\_en/book.pdf](http://www.dhtd.co.jp/assets/flash/pdf_marine_diesel_engine_s_en/book.pdf) [21/11/2017]
13. ASTM E140-12be1 (2012) *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness*. West Conshohocken PA: ASTM International
14. Best Stainless & Alloys (2018) Διαθέσιμο στο: <http://www.beststainless.com>
15. Papageorgiou, D., Kovsenoglou, K., Bournelis, P. and Medrea, C. (2018). *Fracture analysis of a cooling water pump shaft*. MATEC Web of Conferences, 188, p.04022
16. ASTM E3-11(2017) *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. West Conshohocken PA: ASTM International
17. ASTM E407-07 (2015) *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. West Conshohocken, PA: ASTM International