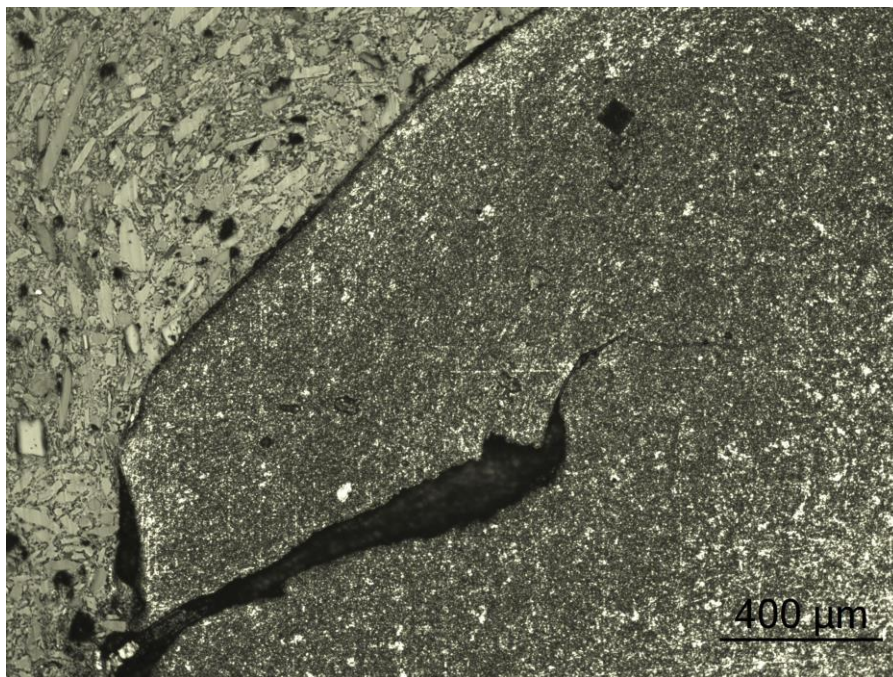


ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



*«Ανάλυση αστοχίας εξαρτημάτων κοπής για τον τεμαχισμό
στύλων ηλεκτροδότησης από οπλισμένο σκυρόδεμα»*

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: Μπελιμπασάκης Βασίλειος Α.Μ.38173

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ
ΑΘΗΝΑ - ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Αιγάλεω, Μάρτιος 2019

*«Η μελέτη αυτή αφιερώνεται σε όλους
εκείνους, τους συνοδοιπόρους που με
τίμησαν με την στήριξη και την αγάπη τους,
κατά τη διάρκεια της μακρόχρονης αυτής
προσπάθειας»*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, μελετά την πρόωρη αστοχία που επήλθε σε κοπτικά εργαλεία τα οποία συνεργάζονται ανά δύο (ζεύγος) εξασφαλίζοντας την αποκοπή, μέσω διάτμησης. Η κοπή γίνεται υδραυλικά, μέσω κατάλληλης διάταξης στην οποία τοποθετούνται τα εν λόγω κοπτικά εργαλεία. Η όλη διάταξη προσαρμόζεται σε εκσκαφείς και ανήκει σε μία ευρεία κατηγορία εργαλείων για εκσκαφείς που προορίζονται για ανακύκλωση οικοδομικών υλικών προερχόμενων από κτίσματα που έχουν κατεδαφιστεί. Τα συγκεκριμένα κοπτικά εξαρτήματα, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για τον τεμαχισμό στύλων ηλεκτροδότησης από οπλισμένο σκυρόδεμα. Κατασκευάστηκαν από διαφορετικές ποιότητες εργαλειοχαλύβων και αστόχησαν έχοντας λειτουργήσει για περίπου το 5% του προβλεπόμενου χρόνου ζωής τους.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας μηχανολογικών εξαρτημάτων που υπαγορεύεται από τον ASM, που αποτελεί το μεγαλύτερο οργανισμό επιστημόνων και μηχανικών με εξειδίκευση την έρευνα των υλικών. Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, στοχεύει στον εντοπισμό των κύριων αιτιών που οδήγησαν στην αστοχία, καθώς και στην πλήρη κατανόηση των μηχανισμών που επέδρασαν για να οδηγήσουν στην πραγματοποίησή της. Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί πως εφαρμόστηκαν διεξοδικά τα βήματα που επιτάσσει η πρακτική της ανάλυσης αστοχιών, ούτως ώστε τα συμπεράσματα που προκύπτουν να είναι απόλυτα ασφαλή και τεκμηριωμένα.

Για τη διεκπεραίωση της ανάλυσης, συγκεντρώθηκαν όλα τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα, πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικές δοκιμές ελέγχου (όπως σκληρομέτρηση) καθώς και καταστροφικές μέθοδοι (όπως μικροσκληρομέτρηση, οπτική μικροσκοπία, χημική ανάλυση). Η μελέτη ολοκληρώνεται με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από αυτά. Τέλος, προτείνονται διορθωτικές ενέργειες με σκοπό την αποφυγή παρόμοιων αστοχιών αλλά και με γνώμονα τη βελτίωση της ποιότητας κοπής που αποδίδουν τα συγκεκριμένα εργαλεία.

Λέξεις κλειδιά: ανάλυση αστοχίας, εν ψυχρώ εργαλειοχαλύβες, κρουογονική θερμική κατεργασία, διάτμηση, στύλοι ηλεκτροδότησης από οπλισμένο σκυρόδεμα.

ABSTRACT

The present thesis studies the premature failure, that occurred to shear cutting tools, used for the demolition of concrete electric pillars. The shearing process is executed by a hydraulic press. The cutting tools are appropriately tightened on a base so to cut off the reinforced concrete. The tool had been manufactured by different tool steel grades. The majority of them were failed while reaching fairly 5% of their predicted service life.

The study was conducted using engineering failure analysis methodology according to ASM organization. The objective of this study is to investigate the causes that led to failure as well as to understand the failure mechanisms that took place. The stages of failure analysis were followed in detail for the extraction of secure conclusions.

For the implementation of the component's failure analysis both nondestructive (preliminary examination, hardness test) and destructive methods (microhardness test, chemical analysis, microscopic examination) were carried out. At the end of the thesis, results of every step of the analysis are processed and conclusions are extracted. Finally, some practical suggestions related to material selection for the tool are given for the prevention of similar failures in the future.

Key words: failure analysis, tool steel, shear cutting, demolition shearing press, reinforced concrete pillar.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε σύμφωνα με το άρθρο 16 του Κανονισμού σπουδών του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.(Απόφαση Συνέλευσης Τ.Ε.Ι. αριθ. 5/16-12-98, ΦΕΚ 861/21-05-99, τ. Β'), κατόπιν εισηγήσεως και επίβλεψης του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών. Η δομή, η τεκμηρίωση, όπως επίσης και η παρουσίασή της έγινε στα μέτρα του εφικτού, σύμφωνα με τους Κανόνες και τις Οδηγίες του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης, καθώς και σύμφωνα με την πρακτική που έχει αναπτύξει και εξελίξει το συγκεκριμένο εργαστήριο.

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας αυτής, είναι η εφαρμογή της μεθοδολογίας του ASM για ανάλυση αστοχίας σε κοπτικά εξαρτήματα, τα οποία αποτελούν μέρος μηχανής ανακύκλωσης δομικών υλικών. Στην ανάλυση αστοχίας, εν γένει, αναζητούνται τα κύρια αίτια που οδήγησαν στην αστοχία των επιμέρους εξαρτημάτων, μέσω της επεξεργασίας πληροφοριών. Οι πληροφορίες αναφέρονται στον σχεδιασμό, στην κατασκευή, στην επεξεργασία, στην λειτουργία και στην συντήρηση του εξαρτήματος. Τελικός στόχος της ανάλυσης αποτελεί η εξεύρεση των αιτιών που οδήγησαν στη συγκεκριμένη αστοχία και την κατανόηση των μηχανισμών που συνέβαλλαν ώστε να προκληθεί. Η τυπική διαδικασία προβλέπει συγκεκριμένα βήματα για την ολοκλήρωσή της. Στο τέλος της διαδικασίας αυτής, επεξεργάζονται τα αποτελέσματα από τα οποία προκύπτουν τα κύρια συμπεράσματα και προτείνονται διορθωτικές κινήσεις. Οι διορθώσεις αποσκοπούν στην αποφυγή παρόμοιων αστοχιών και ορισμένες φορές οδηγούν και στην βελτίωση του χρόνου ζωής του εξαρτήματος.

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελείται από δύο ξεχωριστά μέρη τα οποία αν και φαινομενικά είναι ανεξάρτητα, στην πραγματικότητα είναι αλληλένδετα. Το πρώτο μέρος παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης και το δεύτερο τις πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, οι οποίες συνοδεύονται από τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και τις αντίστοιχες διορθωτικές προτάσεις.

Για την εκπόνηση του θεωρητικού μέρους χρησιμοποιήθηκε ελληνική και ξένη βιβλιογραφία (βιβλία, άρθρα, δημοσιεύσεις, προδιαγραφές), η οποία παρατίθεται στο τέλος της μελέτης. Αντίστοιχα, η τεχνογνωσία, που ακολουθήθηκε σε όλες τις εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψε από μελέτη και εφαρμογή των προτύπων του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης ISO (International Organization for Standardization), του οργανισμού ASTM (American Society for Testing and Materials), αλλά και από την εμπειρία προηγούμενων πτυχιακών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν από το εργαστήριο Π.Ε.Τ.ΥΛ. (Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών) του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. Οι μετρήσεις και γενικά οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, έγιναν από διακριβωμένα όργανα μέτρησης διαφόρων εταιρειών που αναφέρονται στις Ευχαριστίες, καθώς και από βαθμονομημένα (άτυπα) όργανα εντός του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. Είναι αδιαμφισβήτητο πως η αξιοπιστία των μετρήσεων κρίνεται πολύ σημαντική τόσο για εκπαιδευτικούς λόγους και απόκτηση εμπειρίας του σπουδαστή όσο και για την αξιοπιστία των συμπερασμάτων και των προτάσεων που εξάγονται από αυτές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την επιτυχημένη έκβαση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, οφείλονται ευχαριστίες σε όλες τις κάτωθι καταγεγραμμένες εταιρίες και εργαστήρια που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωσή της. Ακόμη, θερμές ευχαριστίες απευθύνονται σε όλους εκείνους τους επιστήμονες, καθηγητές, μηχανικούς και τεχνίτες για την υποστήριξή τους απέναντι στη μελέτη αυτή με τις θεωρητικές γνώσεις τους και τη μοναδική τους τεχνογνωσία. Συγκεκριμένα:

- Στην εταιρία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε. και ιδιαίτερος στον εκλιπόντα Κ^ον Ι.Φ. Σιδέρη, Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό ΕΜΠ, Τεχνικό Διευθυντή της εταιρίας, και ειδικό συνεργάτη του εργαστηρίου ΠΕΤΥΛ του Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ. για τη γενική χορηγία της εργασίας.
- Στο Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (ΠΕΤΥΛ, Β216) του τμήματος Φυσικής Χημείας και Τεχνολογίας Υλικών (Φ.Χ.Τ.Υ.) του Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ, το οποίο πρόσφερε τον εξοπλισμό του στις υπηρεσίες της πτυχιακής εργασίας αυτής. Συγκεκριμένα, κοπή, εγκιβωτισμός, μηχανική λείανση και στίλβωση, μεταλλογραφικοί έλεγχοι, καθώς επίσης και μηχανικές δοκιμές σκληρομέτρησης πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου με χρήση του εξοπλισμού του.
- Στην εταιρία Ν.ΒΑΖΙΓΟΣ S.A, όπου πρόσφερε αφιλοκεδώς τον απαραίτητο εξοπλισμό για την πραγματοποίηση των πρωτογενών κοπών σε μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος και για την μικροσκληρομέτρηση των εγκιβωτισμένων δοκιμίων.

Τέλος, οφείλεται ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στους καθηγητές και εισηγητές του θέματος της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, αλλά και σε όλους εκείνους που βοήθησαν για την ολοκλήρωσή της. Συγκεκριμένα:

- Στην Κα Κ. Μεντρέα Μπίχτα, Δρ. Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό UTC-N (Technical University of Cluj-Napoca), και καθηγήτρια του μαθήματος Π.Ε.Τ.ΥΛ. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ , που με καθοδήγησε με τις συμβουλές της όλο το χρονικό διάστημα αυτό.
- Στην κυρία Μαριάννα Κουκούλη, Μηχανολόγο Μηχανικό Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ, μηχανικό της SPECTRUMLABS Α.Ε., για την βοήθειά της στο στάδιο της μελέτης των υλικών με χρήση φασματογράφου της εταιρίας της.
- Στην κυρία Νικολέτα Μαστορίδου, Μηχανολόγο Μηχανικό Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ, μηχανικό της εταιρίας Ν.ΒΑΖΙΓΟΣ S.A, για την στήριξη και γενικότερη βοήθεια της σε όλα τα στάδια της μελέτης αυτής.
- Στο μελλοντικό συνάδελφο Δ.Γ. Παπαγεωργίου, Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, υπεύθυνου ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε., επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Β216) του ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ. για την πολύτιμη βοήθειά του, στην διενέργεια πειραματικών δοκιμών. Επιπρόσθετα, οφείλω να αναφέρω πως σε όλη αυτή τη δύσκολη πορεία μέχρι και την ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας αυτής αποτέλεσε εξεχούσης σημασίας αρωγό για εμένα σαν φοιτητή αλλά και σαν επαγγελματία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΑΦΙΕΡΩΣΗ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ABSTRACT.....	III
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	IV
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VI
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	IX
A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο «ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ»	2
1.1 Στάδια της ανάλυσης	2
1.1.1 Συλλογή ιστορικών δεδομένων και δειγμάτων	3
1.1.1.1 Ιστορικό παραγωγής και κατασκευής	3
1.1.1.2 Ιστορικό συντήρησης.....	4
1.1.1.3 Φωτογραφικό αρχείο	4
1.1.1.4 Επιλογή δειγμάτων	4
1.1.1.5 Αντικανονικές συνθήκες	5
1.1.2 Προκαταρτική εξέταση του αστοχούντος στοιχείου	5
1.1.2.1 Οπτική εξέταση	5
1.1.2.2 Φωτογράφιση θραύσεων	5
1.1.3 Μη καταστροφικές δοκιμές.....	6
1.1.3.1 Έλεγχος με χρήση μαγνητικών σωματιδίων	6
1.1.3.2 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά.....	8
1.1.3.3 Εξέταση με δινορεύματα	8
1.1.3.4 Έλεγχος με υπέρηχους.....	9
1.1.3.5 Ραδιογραφία.....	10
1.1.3.6 Μέθοδος ελέγχου με ακουστικές εκπομπές	11
1.1.3.7 Εξέταση με Φθορίζοντα Σωματίδια	12
1.1.3.8 Πειραματική ανάλυση τάσεων	13
1.1.3.9 Πειραματική ανάλυση αντοχής	13
1.1.4 Μηχανικές Δοκιμές	13
1.1.4.1 Δοκιμή σκληρότητας.....	13

1.1.4.2 Άλλες μηχανικές δοκιμές	13
1.1.5 Διάκριση προετοιμασία και καθαρισμός των επιφανειών θραύσης	14
1.1.5.1 Καθαρισμός	15
1.1.5.2 Τεμαχισμός	15
1.1.6 Μακροσκοπική ανάλυση επιφανειών θραύσης.....	16
1.1.7 Μικροσκοπική Ανάλυση των επιφανειών θραύσης.....	17
1.1.7.1 Οπτική Μικροσκοπία	18
1.1.7.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM)	18
1.1.7.3 Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Σάρωσης (SEM).....	18
1.1.8 Προπαρασκευή Μεταλλογραφικών τμημάτων	19
1.1.9 Εξέταση και ανάλυση των μεταλλογραφικών τμημάτων.....	20
1.1.10 Προσδιορισμός τύπου θραύσης.....	21
1.1.10.1 Όλκιμη θραύση	21
1.1.10.2 Ψαθυρή θραύση	22
1.1.10.3 Θραύση λόγω κόπωσης	24
1.1.10.4 Ράγισμα διάβρωσης υπό τάση	25
1.1.10.5 Ευθραυστότητα υγρού μετάλλου	25
1.1.10.6 Ευθραυστότητα υδρογόνου	26
1.1.10.7 Αστοχίες Ερπυσμού	27
1.1.10.8 Σύνθετες αστοχίες.....	27
1.1.11 Χημική ανάλυση.....	27
1.1.12 Αστοχίες που προκαλούνται από σχεδιαστικά λάθη	28
1.1.13 Ανάλυση της μηχανικής της θραύσης	28
1.1.14 Δοκιμή εξομίωσης της λειτουργίας.....	29
1.1.15 Ανάλυση των στοιχείων, διατύπωση συμπερασμάτων και σύνταξη της έκθεσης	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο «ΧΑΛΥΒΕΣ».....	31
2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Γενική ταξινόμηση χαλύβων	32
2.2.1 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες	33
2.2.2 Ήπιοι και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες (mild and low carbon steels).....	34
2.2.3 Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες (Medium Carbon Steels).....	34
2.2.4 Υψηλά κραματωμένοι χάλυβες (High Carbon Steels).....	35
2.2.5 Πολύ υψηλά κραματωμένοι χάλυβες (Ultra High Carbon Steels).....	35

2.2.6 Ανοξείδωτοι χάλυβες (Stainless steels)	36
2.2.7 Χάλυβες κατασκευής εργαλείων	36
B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο «ΣΥΛΛΟΓΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ»	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο «ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ»	52
4.1 Χημική Ανάλυση.....	53
4.2 Προετοιμασία και Προκαταρκτικός οπτικός έλεγχος.....	56
4.3 Έλεγχος με στερεοσκόπιο	57
4.4 Μέτρηση Σκληρότητας.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο «ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ»	64
5.1 Κοπές.....	64
5.2 Εγκιβωτισμοί.....	69
5.3 Λειάνσεις- Στιλβώσεις.....	70
5.4 Μικροσκληρομετρήσεις.....	72
5.5 Οπτική Μικροσκοπία	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο «ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ»	93

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αστοχία ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μία κατασκευή (ένα εξάρτημα ή ένα σύνολο εξαρτημάτων) αποτυγχάνει σε μέρος ή στο σύνολο της λειτουργίας του [2]. Ανάλυση αστοχίας καλείται η ερευνητική διαδικασία, αποτέλεσμα της οποίας είναι ο εντοπισμός των φυσικών αιτιών των προβλημάτων που δημιουργούνται κατά την λειτουργία ενός εξαρτήματος ή ενός συνόλου εξαρτημάτων.

Κατά την διαδικασία αυτή, γίνεται χρήση ποικίλων εργαστηριακών τεχνικών, προερχομένων από διαφορετικούς τεχνικούς κλάδους. Πρόκειται για μία ιδιαίτερα κρίσιμη διαδικασία της οποίας η επιτυχία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως την πλήρη συγκέντρωση δεδομένων και πληροφοριών γύρω από το εκάστοτε πρόβλημα και την ορθή ανάλυση αυτών με σκοπό την τεκμηρίωση μίας απόφασης [1]. Η πολυδιάστατη δομή των προβλημάτων που δημιουργούνται, συχνά απαιτεί την συνεργασία διάφορων ειδικοτήτων. Κατά την ανάλυση της αστοχίας όλοι οι παράγοντες γύρω από την λειτουργία του αστοχούντος εξαρτήματος παίζουν σημαντικό ρόλο. Είναι απαραίτητη η μελέτη σχετικά με το περιβάλλον, τον ακριβή σχεδιασμό, τα κατασκευαστικά στάδια (φάσεις), τα χρησιμοποιούμενα υλικά και το ιστορικό της λειτουργίας προκειμένου να καταγραφεί και να αξιολογηθεί η λειτουργία του αστοχούντος εξαρτήματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αστοχίας μπορεί να είναι πολύ σημαντικά για τον σχεδιασμό νέων εξαρτημάτων προς παρόμοια χρήση. Η κατανόηση και η ανάλυση των αστοχιών και των αιτιών που τις προκάλεσαν είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό και την κατασκευή βελτιωμένων εξαρτημάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέσω των αναλύσεων αστοχίας ο κάθε σχεδιαστής (κατασκευαστής) έχει την δυνατότητα να αναγνωρίσει τα στοιχεία εκείνα όπου προκάλεσαν το πρόβλημα ή επέτρεψαν σε αυτό να προκληθεί και να επιφέρει την αστοχία. Εφόσον η γνώση αυτή λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό και κατά την κατασκευή νέων εξαρτημάτων καταλήγει στην δημιουργία πιο αξιόπιστων και ανθεκτικών κατασκευών. Επίσης, εξ αιτίας της επικινδυνότητας κάποιας αστοχίας ακόμη και για ανθρώπινες ζωές, οι αναλύσεις αστοχίας χρησιμοποιούνται σαν βάση για ασφαλιστικούς και δικαστικούς σκοπούς. Η ανάλυση αστοχίας χρησιμοποιείται από κάποιους κατασκευαστές με σκοπό την διαφήμιση και την προώθηση νέων και εξελιγμένων κατασκευών. Ακόμη, αναλύσεις αστοχίας έχουν δώσει την αφορμή για την δημιουργία νέων, βελτιωμένων και καλύτερα εξειδικευμένων υλικών.

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

1.1 Στάδια της ανάλυσης

Η κάθε περίπτωση ανάλυσης αστοχίας αποτελεί μία ξεχωριστή έρευνα που καταλήγει σε μια νέα μελέτη κάποιου συνδυασμού στοιχείων ή πληροφοριών, είναι αποδεκτό το γεγονός πως τα στάδια που την αποτελούν είναι κοινά σε όλες τις περιπτώσεις.

Σε κάθε ανάλυση αστοχίας τα δεδομένα είναι διαφορετικά με αποτέλεσμα η σειρά με την οποία χρησιμοποιούνται τα στάδια της ανάλυσης να είναι διαφορετική. Ακόμη, είναι πιθανό ανάλογα με το θέμα και την οπτική σύμφωνα με την οποία εξετάζεται μία αστοχία, να μην κριθεί απαραίτητη η χρήση όλων των σταδίων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη ανάλυση μίας αστοχίας αποτελεί η συντήρηση στα πρώτα στάδια, στοιχείων η ενδείξεων που πιθανώς να απαιτούν πιο ενδελεχή εξέταση σε επόμενα στάδια. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου η ανάλυση προορίζεται για εκδίκαση κάποιας υπόθεσης είναι απαραίτητη η ακολουθία των Ομοσπονδιακών Κανονισμών Τεκμηρίων προκειμένου να διαφυλαχθούν στοιχεία και ενδείξεις έτσι ώστε το αποτέλεσμα της ανάλυσης να είναι ορθό και απόλυτα τεκμηριωμένο.

Τα στάδια από τα οποία αποτελείται μία ανάλυση αστοχίας είναι:

1. Συλλογή του ιστορικού υπόβαθρου και επιλογή δειγμάτων προς ανάλυση.
2. Προκαταρκτική μελέτη του εξαρτήματος που υπέστη την αστοχία συνοδευόμενη από οπτική εξέταση και δημιουργία αρχείου.
3. Μη καταστροφικές δοκιμές.

Αυτά τα προκαταρκτικά στάδια συχνά συνοδεύονται από γενικές εκτιμήσεις της αστοχίας και των συνθηκών που οδήγησαν σε αυτήν. Τα στάδια μπορεί να διαφοροποιούνται εξαρτόμενα από την εντοπιζόμενη αιτία της αστοχίας (θραύση, διάβρωση και φθορά). Σε αναλύσεις αστοχίας εξ αιτίας θραύσης χρησιμοποιούνται τα παρακάτω στάδια:

4. Επιλογή, ταυτοποίηση, διατήρηση και καθαρισμός των δειγμάτων.
5. Μακροσκοπικός έλεγχος και ανάλυση των επιφανειών που γίνεται εμφανής η θραύση μέσω κύριων, δευτερευόντων ρωγμών και άλλων επιφανειακών φαινομένων.
6. Μικροσκοπικός έλεγχος και ανάλυση των επιφανειών που πραγματοποιήθηκε η θραύση.
7. Ανάλυση των τάσεων προκειμένου να αναδειχθεί η κατάσταση του τμήματος που αστόχησε.
8. Αναγνώριση των μηχανισμών φθοράς που επίδρασαν.
9. Προσδιορισμός του τρόπου μετάδοσης της θραύσης.

Εν ακολουθία των παραπάνω σταδίων για την ανάλυση αστοχίας από θραύση, ποικίλλουν τα στάδια που περιγράφουν σημαντικούς παράγοντες και μεθόδους στην ανάλυση αστοχίας από τριβή και διάβρωση. Επιπροσθέτως, οι έρευνες αστοχίας μπορεί να χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές για να χαρακτηρίσουν την κατάσταση του υλικού. Αυτές περιλαμβάνουν:

10. Μεταλλογραφία ή Ανάλυση Μικροδομής.
11. Μηχανικές δοκιμές.

12. Χημικές αναλύσεις.
13. Δοκιμές στα ελεγχόμενα δείγματα, τα οποία θα πρέπει να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση με τα δείγματα της αστοχίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της προσομοίωσης συνθηκών συντήρησης.

Τελικά, η έρευνα ολοκληρώνεται με την σύνθεση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στο τελικό αυτό στάδιο είναι πιθανό να παραστεί η ανάγκη να επαναληφθεί κάποιο από τα προηγούμενα βήματα ή να πραγματοποιηθεί κάποιο νέο. Παρομοίως με το σχεδιασμό η ανάλυση αστοχίας μπορεί να είναι μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία ανακάλυψης και επανεξέτασης. Η ανάλυση αστοχίας μπορεί ακόμα να γίνει μία διεπιστημονική διαδικασία η οποία απαιτεί συμβουλές από ειδικούς διάφορων κλάδων κατά την διάρκεια της έρευνας. Εφόσον παρατεθούν όλες οι πληροφορίες εκκρεμεί η σύνθεση αυτών για την διατύπωση των τελικών συμπερασμάτων. Αυτό απαιτεί τη σύνταξη μίας αναφοράς ακολουθούμενης από προτάσεις για την αποφυγή μελλοντικών αστοχιών. Ο απώτερος σκοπός κάθε αναλυτή αστοχίας δεν είναι μόνο ο προσδιορισμός του μηχανισμού αστοχίας αλλά και η ανάδειξη της βαθύτερης αιτίας η οποία μπορεί να σχετίζεται με κακή χρήση, κακή συντήρηση, ακατάλληλη εφαρμογή, με τις ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου υλικού, το σχεδιασμό του είτε ακόμα και με την κατασκευή του αστοχούντος εξαρτήματος. Σε περιπτώσεις που αφορούν σωματικές βλάβες ή περιλαμβάνουν νομικές διώξεις θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην διατήρηση των φυσικών στοιχείων ως έχουν. Εξέχουσας σημασίας αποτελεί το γεγονός ότι ακούσια ή εκούσια καταστροφή των αποδεικτικών στοιχείων μίας αστοχίας μπορεί να οδηγήσει σε εκτροπή της νομικής ευθύνης στο φυσικό πρόσωπο ή την εταιρία που ευθύνεται για την καταστροφή των αποδεικτικών στοιχείων παρόλο που η αρχική αστοχία είχε άλλη αιτία [4].

1.1.1 Συλλογή ιστορικών δεδομένων και δειγμάτων

Κατά το στάδιο αυτό είναι απαραίτητη η λεπτομερής καταγραφή όλων των διαθέσιμων πληροφοριών γύρω από την αστοχία. Σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται απαραίτητη η επίσκεψη του αναλυτή στο χώρο όπου πραγματοποιήθηκε η αστοχία προκειμένου να γίνει συλλογή πληροφοριών και στοιχείων άμεσα. Σε πολλές αστοχίες μάλιστα απαιτείται η χρήση φορητού εργαστηριακού εξοπλισμού εξ αιτίας του όγκου ή της τοποθέτησης της κατασκευής που επήλθε η αστοχία. Παρόλα αυτά, είναι δύσκολο και μη πρακτικό σε ορισμένες περιστάσεις. Εξ αιτίας αυτού διατηρείται έγγραφο αρχείο κατά την συλλογή δεδομένων.[4] Στο αρχείο αυτό θα πρέπει να συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την γενικότερη λειτουργία του αστοχούντος στοιχείου. Εν συνεχεία, γίνεται έρευνα πιθανών επισκευών και καταγράφεται το ιστορικό τους. Τέλος, είναι απαραίτητη η συλλογή των δεδομένων σχετικά με την εξέλιξη της αστοχίας και την χρονική σειρά των γεγονότων που κατέληξαν στην αστοχία.

1.1.1.1 Ιστορικό παραγωγής και κατασκευής

Το ιστορικό παραγωγής και κατασκευής ενός στοιχείου θα πρέπει να αποτελείται από τις τεχνικές προδιαγραφές, τα σχέδια καθώς και όλα τα στάδια της κατασκευής και επεξεργασίας του στοιχείου αυτού. Η κατηγοριοποίηση των δεδομένων γίνεται σύμφωνα με τις μηχανολογικές διεργασίες (ψυξηλασία, εφελκυσμό, κάμψη), τις μηχανουργικές κατεργασίες (λείανση, στίλβωση) και τις χημικές κατεργασίες (καθαρισμός, ηλεκτροδιάβρωση και επικάλυψη με χημική κρυστατοποίηση) που υπόκεινται.

1.1.1.2 Ιστορικό συντήρησης

Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου ιστορικού συντήρησης εξαρτάται από την βαρύτητα που δόθηκε στην καταγραφή πλήρους αρχείου γύρω από το στοιχείο που αστόχησε. Ένα ολοκληρωμένο ιστορικό συντήρησης διευκολύνει πολύ το έργο του αναλυτή της αστοχίας αφού του επιτρέπει την πραγματοποίηση μίας εις βάθος μελέτης γύρω από το σύνολο των καταγεγραμμένων δεδομένων. Κατά την καταγραφή του ιστορικού συντήρησης ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δίνεται στις εργασιακές συνθήκες όπως κανονικές και μη κανονικές φορτίσεις, ατυχείς υπερφορτίσεις, κυκλικές φορτίσεις, θερμοκρασιακές μεταβολές και λειτουργία σε διαβρωτικό περιβάλλον. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως δεν υπάρχει ολοκληρωμένο ιστορικό συντήρησης με αποτέλεσμα να αναγκάζεται ο αναλυτής της αστοχίας να εργαστεί με αποσπασματικές πληροφορίες λειτουργίας. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει δυνατότητα ανεύρεσης πληροφοριών ο αναλυτής αναγκάζεται να συμπεράνει τις συνθήκες λειτουργίας βασισμένος στην εμπειρία και στην κρίση του. Στην περίπτωση αυτή η ορθή ανάλυση της αστοχίας εξαρτάται από τον αναλυτή διότι ένα λανθασμένο συμπέρασμα μπορεί να αποπροσανατολίσει πλήρως την έρευνα της αστοχίας.

1.1.1.3 Φωτογραφικό αρχείο

Οι φωτογραφίες του αστοχούντος στοιχείου είναι πολύ συχνά κρίσιμες για την ορθή ανάλυση της αστοχίας. Μία λεπτομέρεια που φαίνεται να μην έχει συνέπειες στην προκαταρκτική εξέταση μπορεί να αποδειχθεί ζωτικής σημασίας για την εξέλιξη της έρευνας της αστοχίας. Ένα πλήρες και λεπτομερές φωτογραφικό αρχείο είναι πάντα πολύ χρήσιμο για τον αναλυτή. Οι φωτογραφίες θα πρέπει να αποδίδουν λεπτομερώς την αστοχία αλλά και το περιβάλλον λειτουργίας του αστοχούντος στοιχείου. Οι συνθήκες στις οποίες παίρνονται οι φωτογραφίες αλλά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα της φωτογράφισης. Ο αναλυτής είναι υπεύθυνος για το αποτέλεσμα της φωτογράφισης και για την πιθανή επιλογή κατάλληλων φωτογραφιών από άλλες πηγές.

1.1.1.4 Επιλογή δειγμάτων

Τα δείγματα θα πρέπει να επιλέγονται προτού ξεκινήσει η εξέταση ειδικά στις περιπτώσεις που η έρευνα είναι μακροσκελής. Όπως και στην περίπτωση των φωτογραφιών, ευθύνη του αναλυτή αποτελεί η διασφάλιση της καταλληλότητας και της επάρκειας των δειγμάτων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η επιλογή δειγμάτων που να καταδεικνύουν τα χαρακτηριστικά της αστοχίας. Η αναζήτηση επιπλέον στοιχείων για την πλαισίωση και απόδειξη μίας αστοχίας πέρα από τα εμφανή αποτελούν χρέος του αναλυτή προκειμένου να υπάρξει μία πλήρης δειγματοληψία. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου υπάρχει οικονομικής φύσης ανάγκη για άμεση επισκευή και επαναλειτουργία του αστοχούντος στοιχείου θα πρέπει να δίνεται δυνατότητα εξέτασης της αστοχίας και με κοινή απόφαση και στάση να απομακρύνονται τα προς εξέταση στοιχεία με σκοπό να μην καταστραφούν οι αποδείξεις της αστοχίας. Πολύ συχνά είναι απαραίτητη η σύγκριση αστοχούντων στοιχείων με παρόμοια στοιχεία που δεν αστόχησαν προκειμένου να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο επήλθε η αστοχία (πιθανό λάθος στην κατασκευή ή λάθη κατά τις συντηρήσεις).

1.1.1.5 Αντικανονικές συνθήκες

Επιπρόσθετα στην ανάπτυξη ενός ιστορικού του αστοχούντος εξαρτήματος είναι η αναφορά σε πιθανές, μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας του. Οι συνθήκες αυτές θα βρίσκονται σίγουρα εκτός προδιαγραφών λειτουργίας και θα χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα στην συχνότητα της εμφάνισής τους. Συνήθως αναφέρονται σε αυξομειώσεις στις θερμοκρασίες λειτουργίας, σε τυχαία κρουστικά φορτία και λάθη κατά την λειτουργία.

1.1.2 Προκαταρκτική εξέταση του αστοχούντος στοιχείου

Το στοιχείο που αστόχησε συμπεριλαμβανομένων όλων των τεμαχίων του, θα πρέπει να υπόκεινται σε μία εξονυχιστική, οπτική μακροσκοπική εξέταση. Η εξέταση αυτή γίνεται πριν από κάθε είδος καθαρισμού προκειμένου να μην καταστραφούν αποδεικτικά στοιχεία της αστοχίας. Πολύ συχνά, οι ατέλειες και τα θραύσματα που βρίσκονται πάνω σε ένα κομμάτι προβάλλουν χρήσιμα στοιχεία στην αναζήτηση της αιτίας της αστοχίας ή και στον καθορισμό μίας αλληλουχίας γεγονότων όπου οδήγησαν τελικά στην αστοχία.

1.1.2.1 Οπτική εξέταση

Η προκαταρκτική εξέταση ξεκινάει με την μη υποβοηθούμενη οπτική επιθεώρηση. Το ανθρώπινο μάτι έχει εξαιρετική ικανότητα εστίασης και έχει τη δυνατότητα να εξετάζει μεγάλες περιοχές γρήγορα αντιλαμβανόμενο πιθανές εναλλαγές σε χρώμα και τραχύτητα. Σε επόμενο στάδιο χρησιμοποιούνται οπτικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Ιδιαίτερης σημασίας για την ανάλυση είναι οι επιφάνειες θραύσης και οι διαδρομές που ακολουθούν οι ρωγμές. Επίσης εξαιρετικό ενδιαφέρον για την έρευνα έχει η παρατήρηση και η αξιολόγηση των πιθανών ενδείξεων για μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του αστοχούντος στοιχείου ή κατάχρησης αυτού κατά την λειτουργία του. Ακόμη, θα πρέπει να γίνεται και μία γενική αξιολόγηση του βασικού σχεδιασμού και της λειτουργικότητας του στοιχείου που αστόχησε. Το σύνολο των σημαντικών χαρακτηριστικών, συμπεριλαμβανομένων των διαστάσεων θα πρέπει να καταγράφονται και να συνοδεύονται είτε από σκαριφήματα είτε από φωτογραφίες. Τα ευρήματα της οπτικής εξέτασης και η επιτυχής πραγματοποίηση της εξαρτώνται πολύ από την σχολαστικότητα, την προσοχή και την εμπειρία του αναλυτή της αστοχίας. Μετά την πλήρη οπτική εξέταση θα μπορούσε σε αυτό το στάδιο να γίνει χρήση ενός μικροσκοπίου χαμηλής ισχύος για την παρατήρηση μικρότερων λεπτομερειών και στοιχείων που παρατηρήθηκαν.

1.1.2.2 Φωτογράφιση θραύσεων

Απαραίτητο στάδιο για μια ολοκληρωμένη μελέτη των θραύσεων αποτελεί και η φωτογράφιση του αστοχούντος στοιχείου συμπεριλαμβανομένων και των θραυσμάτων του. Στην περίπτωση που οι επιφάνειες θραύσης εμπλέκονται θα πρέπει το αστοχούν κομμάτι μαζί με τα θραύσματά του να εξεταστεί και να φωτογραφηθεί για να καταγραφούν το μέγεθος και η κατάσταση στην οποία βρίσκονται. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με μία πλήρη εξέταση της θραύσης μπορούν να καταδείξουν τον τρόπο με τον οποίο η θραύση εξελίχθηκε και επηρέασε το κάθε κομμάτι του αστοχούντος στοιχείου. Η εξέταση θα πρέπει να ξεκινήσει με χρήση φωτισμού ευθείας κατεύθυνσης και να ολοκληρωθεί με χρήση φωτισμού υπό διάφορες γωνίες με σκοπό να σκιαγραφηθούν τα χαρακτηριστικά της θραύσης. Η επιτυχία της παραπάνω διαδικασίας ευνοεί στον εντοπισμό των περιοχών θραύσης πρωτεύουσας σημασίας για την μελέτη. Τέλος η

διαδικασία ολοκληρώνεται με την φωτογράφιση των επιφανειών θραύσης με διάφορες μεγεθύνσεις και από διάφορες οπτικές γωνίες. Απαραίτητο στοιχείο στις πληροφορίες κάθε φωτογραφίας αποτελεί η μεγέθυνση προκειμένου να γίνεται εύκολα ο συσχετισμός των φωτογραφιών μεταξύ τους.

1.1.3 Μη καταστροφικές δοκιμές

Οι μη καταστροφικές δοκιμές αποτελούνται από ένα σύνολο τεχνικών που επιτρέπουν την επιθεώρηση ενός τεμαχίου, με σκοπό να διακριβωθεί η λειτουργικότητα του χωρίς την καταστροφή της ικανότητας του τεμαχίου αυτού να τεθεί ξανά σε λειτουργία [5].

Παρόλο που συχνά οι μη καταστροφικές δοκιμές χρησιμοποιούνται σαν εργαλεία ποιοτικού ελέγχου, πολλές από αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην έρευνα μίας αστοχίας. Η επιθεώρηση σιδηρούχων μετάλλων από μαγνητικά σωματίδια, ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά, η επιθεώρηση με χρήση υπερήχων και η επιθεώρηση με δινορεύματα (ECT) αποτελούν παραδείγματα εφαρμογών μη καταστροφικών ελέγχων που στοχεύουν στην ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών και ασυνεχειών πάνω στο εξεταζόμενο δοκίμιο. Η ραδιογραφία αποτελεί μία ακόμα μη καταστροφική δοκιμή η οποία όμως στοχεύει στην εξέταση του εσωτερικού των επιφανειών θραύσης. Μία φωτογραφική αποτύπωση και καταγραφή των αποτελεσμάτων της μη καταστροφικής δοκιμής αποτελεί σημαντικό μέρος του αρχείου της ανάλυσης αστοχίας.

1.1.3.1 Έλεγχος με χρήση μαγνητικών σωματιδίων

Αποτελεί μια μη καταστροφική δοκιμή η οποία βασίζεται στην δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου με υψηλή πυκνότητα ροής σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό και την οπτικοποίηση του φαινομένου αυτού με χρήση μαγνητικών σωματιδίων και ειδικών συνθηκών φωτισμού.

Ο μαγνητισμός, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία αόρατων γραμμών ροής περιμετρικά του εξεταζόμενου δοκιμίου. Οι γραμμές της μαγνητικής ροής έχουν την ιδιότητα να απλώνονται όταν περνούν από ένα μη μαγνητικό υλικό όπως ο αέρας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ασυνέχειες. Επειδή οι γραμμές ροής δεν μπορούν να διασχίσουν η μία την άλλη, φαινόμενο είναι η εξάπλωση αυτών έξω από το υλικό (διαρροή γραμμών ροής). Η διαρροή των γραμμών ροής μπορεί επίσης να προκληθεί από την μείωση του σιδηρομαγνητικού υλικού κατά περιοχή, από κάποια έντονη διαφοροποίηση στη μορφή του δοκιμίου και από τις ακμές αυτού. Αν η διαρροή αυτή των μαγνητικών γραμμών ροής είναι αρκετά ισχυρή, χρησιμοποιούμενα μαγνητικά σωματίδια θα συσσωρευθούν σε αυτή την περιοχή με αποτέλεσμα το φαινόμενο αυτό να είναι ορατό κάτω από κατάλληλες συνθήκες φωτισμού. Παρόλο που υπάρχουν πολλές μέθοδοι ελέγχου μαγνητικών σωματιδίων, κοινή κατάληξη όλων είναι η παρατήρηση των περιοχών με διαρροή μαγνητικών γραμμών ροής. Η ποσότητα των διαρρεόντων μαγνητικών γραμμών στις ασυνέχειες μορφής εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα ροής στο υλικό, το μέγεθος, τον προσανατολισμό και την απόσταση της ασυνέχειας από τα επιφανειακά στρώματα. Με διαμήκη μετάδοση όλες οι γραμμές ροής πρέπει να ολοκληρώσουν τους βρόγχους τους παρόλο που ο αέρας και κάποια δημιουργούμενα ισχυρά μαγνητικά πεδία εμποδίζουν τη διαδικασία αυτή.

Υπάρχει μία πληθώρα τύπων εξοπλισμών ικανών να μαγνητίσουν σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούν την διαφορά δυναμικού για την δημιουργία τάσης. Εκτός του τύπου αυτού, ο μαγνητισμός μπορεί να προκληθεί και από μόνιμους μαγνήτες. Τα μαγνητικά σωματίδια που

χρησιμοποιούνται είτε σε ξηρό είτε σε υγρό περιβάλλον είναι διαχωρισμένα σιδηρομαγνητικά υλικά επεξεργασμένα ώστε να εκπέμπουν χρώμα (φθορίζων ή και μη) προκειμένου να είναι εύκολα ορατά πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Απαραίτητο χαρακτηριστικό των σωματιδίων είναι η χαμηλή ικανότητα μαγνητικής απομνημόνευσης προκειμένου να μην μαγνητίζονται μεταξύ τους αλλά να καταδεικνύουν τις περιοχές με ρηγματώσεις με τους σχηματισμούς τους [3].

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Είναι μία από τις πιο ακριβείς και διαδεδομένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό επιφανειακών ασυνεχειών.
- Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από ταχύτητα και ιδιαίτερη ευκολία στην εφαρμογή.
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη εξειδίκευση για την κατανόηση των ενδείξεών της.
- Η μέθοδος δεν περιορίζει τον αναλυτή ως προς το μέγεθος του προς εξέταση δοκιμίου.
- Δίνει την δυνατότητα εντοπισμού ξένων σωμάτων πάνω στην επιφάνεια και των ασυνεχειών που προκύπτουν εξ αιτίας τους εν αντιθέσει με τα διεισδυτικά υγρά όπου υπάρχει πιθανότητα παρερμηνείας και λάθος εκτίμησης.
- Δεν απαιτείται προκαθορισμός με επιμέλεια.
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιπτώσεις που υπάρχουν επιφανειακές επικαλύψεις ακόμα και από μη μαγνητικά υλικά με την προϋπόθεση ότι δεν ξεπερνούνται τα 3μm(πρακτικά).
- Η μέθοδος επιδέχεται αυτοματοποίηση.
- Είναι μία μέθοδος χαμηλού κόστους.
- Τέλος, δίνει την δυνατότητα εντοπισμού υποεπιφανειακών ασυνεχειών αλλά σε μικρά βάθη.

Περιορισμοί της μεθόδου:

- Βρίσκει εφαρμογή μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά.
- Σε περιπτώσεις που η ρηγματώση βρίσκεται πολύ βαθιά εντός του εξεταζόμενου δοκιμίου η μέθοδος δεν αποδίδει.
- Απαιτούνται τουλάχιστον δύο μαγνητίσεις διαφορετικού προσανατολισμού.
- Συχνά απαιτείται απομαγνητισμός πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου.
- Τα μεγάλα σε μέγεθος προς εξέταση κομμάτια συνήθως χυτά και σφυρήλατα απαιτούν ισχυρά ηλεκτρικά πεδία για τον μαγνητισμό τους.
- Είναι απαραίτητη η προσοχή του τεχνικού προσωπικού στα σημεία επαφής προκειμένου να αποφευχθούν υπερθέρμανση και καψίματα.
- Στην περίπτωση που το πλήθος των προς εξέταση κομματιών είναι μεγάλο και το μέγεθος τους πολύ μικρό είναι πολύ χρονοβόρος ο ατομικός μαγνητισμός τους. Το ίδιο παρατηρείται και στις περιπτώσεις όπου τα προς μαγνητισμό κομμάτια είναι μεγάλου μήκους ή γενικότερα μεγάλου εμβαδού.
- Ακόμη, τεχνική εμπειρία αλλά και θεωρητικό υπόβαθρο απαιτείται για την ορθή ερμηνεία των ενδείξεων της μεθόδου αυτής.

1.1.3.2 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά

Πρόκειται για μία μη καταστροφική δοκιμή η οποία χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τον εντοπισμό ασυνεχειών που βρίσκονται αποκλειστικά στην επιφάνεια του προς έλεγχο δοκιμίου

όπως ρωγμές, σπασίματα και περιοχές που έχει πραγματοποιηθεί συγκόλληση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται αποτελεσματικά σε μη πορώδη μεταλλικά υλικά (σιδηρούχα και μη), σε πλήρως συμπτυκνωμένα κεραμικά, σε ορισμένα μη πορώδη πλαστικά και σε γυαλί.

Η διαδικασία που ακολουθείται ξεκινά με τον σχολαστικό καθαρισμό των προς εξέταση επιφανειών. Είναι πολύ σημαντικό να απαλλαγθούν οι επιφάνειες αυτές από προσμίξεις που μπορεί να υπάρχουν (στερεής ή υγρής φάσης) διότι η διαδικασία μπορεί να επηρεαστεί και τα διεισδυτικά υγρά να μην καταφέρουν να εισέλθουν σε πιθανές ασυνέχειες. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικής σύνθεσης καθαριστικά (removers) τα οποία πριν την εφαρμογή του διεισδυτικού υγρού απομακρύνονται και οι επιφάνειες στεγνώνονται. Εν συνεχεία ένα διεισδυτικό υγρό εφαρμόζεται ομοιόμορφα στην προς εξέταση επιφάνεια και αφήνεται ώστε να εισέλθει στις υπάρχουσες ασυνέχειες. Τα διεισδυτικά υγρά είναι συνήθως έντονου χρώματος ή περιέχουν φωσφορούχα σωματίδια έτσι ώστε κάτω από υπεριώδη ακτινοβολία να παρουσιάζονται οι ασυνέχειες. Η εφαρμογή του διεισδυτικού υγρού μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους όπως διαβροχή και εμβάπτιση ανάλογα με την επιφάνεια και το μέγεθος του προς έλεγχο αντικειμένου. Μετά από συγκεκριμένο χρόνο παραμονής ανάλογα με την μέθοδο και τη φύση του διεισδυτή η περίσσεια του διεισδυτικού υγρού αφαιρείται και στεγνώνεται η επιφάνεια χωρίς όμως να καθαριστούν οι ασυνέχειες επιφανείας. Ειδικά υγρά που ονομάζονται εμφανιστές αντίθετου συνήθως χρώματος από τους διεισδυτές αναδεικνύουν την ύπαρξη των ασυνεχειών[6].

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Η δυνατότητα που δίνεται για εφαρμογές σε μη μαγνητικά υλικά.
- Το χαμηλό κόστος με το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέθοδος.
- Η ευκολία στην μεταφορά και την πραγματοποίηση της μεθόδου.
- Η ευκολία με την οποία αναγνωρίζονται οι ενδείξεις της.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για εξέταση χαμηλής πυκνότητας μετάλλων κονιομεταλλουργείας ή άλλων πορώδων υλικών.
- Η μέθοδος εντοπίζει μόνο επιφανειακές ασυνέχειες.
- Οι προς εξέταση επιφάνειες πρέπει να καθαρίζονται σχολαστικά πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου.

1.1.3.3 Εξέταση με δινορεύματα

Ο έλεγχος με δινορεύματα αποτελεί μία μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου που βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και ως εκ τούτου εφαρμόζεται σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά για ανίχνευση επιφανειακών και υποεπιφανειακών ελαττωμάτων.

Σε πρώτη φάση το πηνίο διέγερσης (excitation coil) τοποθετείται γύρω από το προς εξέταση δοκίμιο. Εν συνεχεία εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό φορτίο με αποτέλεσμα τη δημιουργία εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου στο πηνίο. Το προς εξέταση δοκίμιο βρίσκεται μέσα στο εν λόγω μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα να προκαλείται σε αυτό ροή ηλεκτρονίων (δινορεύματα ή αλλιώς eddy currents). Τα δινορεύματα δημιουργούν με τη σειρά τους δικό τους μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλοεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο που τα προκάλεσε μέσω

εμπέδησης. Αν σε κάποιο σημείο του υπό εξέταση υλικού υπάρχει ασυνέχεια ή μεταβολή στην ηλεκτρική του αγωγιμότητα άρα και την μαγνητική διαπερατότητα, τότε διαταράσσεται η ροή των δινορευμάτων και μεταβάλλεται το μαγνητικό τους πεδίο. Η μεταβολή αυτή ανιχνεύεται είτε από ένα δευτερο πηνίο (receiver coil), είτε από τη μεταβολή του εναλλασσόμενου ρεύματος του πρωτεύοντος πηνίου (excitation coil) και υποδεικνύει την ύπαρξη της ατέλειας μέσω αντίστοιχης ένδειξης στην οθόνη της συσκευής [7].

Τα πλεονεκτήματα της εξέτασης με δινορεύματα είναι:

- Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό επιφανειακών και μη ελαττωμάτων.
- Η μέθοδος αυτή είναι εύκολη στην εφαρμογή της και δεν απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις.
- Η μέθοδος προσαρμόζεται σε συνεχή παρακολούθηση.
- Η μέθοδος είναι εύκολο να αυτοματοποιηθεί και να παρακολουθείται στο χρόνο.
- Η μέθοδος δεν απαιτεί την επαφή με κάποιου είδους κεφαλή.

Τα μειονεκτήματα της εξέτασης με δινορεύματα είναι:

- Μικρό βάθος διείσδυσης
- Τα εξεταζόμενα υλικά πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγίμα.
- Οι ενδείξεις επηρεάζονται από περισσότερες από μία μεταβλητές.
- Απαιτούνται σημεία αναφοράς.

1.1.3.4 Έλεγχος με υπέρηχους

Πρόκειται για μία μη καταστροφική μέθοδο στην οποία εισάγονται δέσμες υψηλής συχνότητας ακουστικής ενέργειας μέσα στο προς εξέταση δοκίμιο. Η πορεία που ακολουθούν οι δέσμες αυτές μέσα στο εσωτερικό του δοκιμίου είναι ενδεικτική για τον εντοπισμό πιθανών ασυνεχειών. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής βασίζεται στο γεγονός ότι η υπερηχητική δέσμη που διαπερνά το προς εξέταση δοκίμιο σε περίπτωση που έρθει σε επαφή με υλικό άλλης αντίστασης ή ασυνέχεια θα ανακλαστεί με συγκεκριμένο τρόπο ο οποίος εξαρτάται από την φύση και τον προσανατολισμό της ασυνέχειας.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Υψηλή ευαισθησία, η οποία επιτρέπει τον εντοπισμό μικρορωγμών υποεπιφανειακά αλλά και επιφανειακά.
- Επιτρέπει την εξέταση κομματιών με πολύ μεγάλα πάχη και σε σχέση με τις άλλες μη καταστροφικές μεθόδους θεωρείται η πιο αξιόπιστη στις περιπτώσεις αυτές.
- Ακρίβεια στον υπολογισμό της θέσης και του μεγέθους της ασυνέχειας.
- Απαιτείται πρόσβαση μόνο από τη μία πλευρά στο προς έλεγχο αντικείμενο, χαρακτηριστικό που διευκολύνει την κατάσταση σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει επαρκής προσβασιμότητα.
- Ελάχιστη προετοιμασία απαιτείται στο προς εξέταση δοκίμιο.
- Τα αποτελέσματα της μεθόδου φαίνονται στιγμιαία.
- Είναι μέθοδος που μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Η επιθεώρηση απαιτεί εκπαίδευση και εξειδικευμένες τεχνικές σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.
- Απαιτείται η χρήση κάποιου μέσου σύζευξης για να επιτραπεί η μετάδοση του ηχητικού κύματος στο εξεταζόμενο δοκίμιο.
- Η μέθοδος είναι δύσκολα εφαρμόσιμη σε κομμάτια ακανόνιστου σχήματος, σε κομμάτια με μεγάλη τραχύτητα, σε πολύ μικρά κομμάτια και σε ανομοιογενή υλικά.
- Η εφαρμογή σε χυτοσιδήρους και άλλα χονδρόκοκκα υλικά δεν ενδείκνυται διότι η δομή τους χαρακτηρίζεται από χαμηλή ηχητική μετάδοση.
- Ασυνέχειες κάτω ακριβώς από την επιφάνεια είναι δύσκολο να ανιχνευθούν
- Το πολύπλοκο του σχήματος μίας ασυνέχειας μπορεί να προκαλέσει παρερμηνεία του σχήματος της ανάκλασης άρα και δημιουργία λάθος συμπερασμάτων.
- Γραμμικές ασυνέχειες παράλληλες προς την κατεύθυνση μετάδοσης του ηχητικού κύματος απαιτούν εμπειρία για την παρατήρησή τους.
- Σημεία αναφοράς χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση του εξοπλισμού και τον χαρακτηρισμό των ελαττωμάτων [8].

1.1.3.5 Ραδιογραφία

Η μέθοδος της Ραδιογραφίας βασίζεται στην ιδιότητα του κάθε υλικού να απορροφά διαφορετικές ποσότητες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος. Ειδικότερα, αυτό σημαίνει ότι σε ένα αντικείμενο που παρουσιάζει διαφορετική σύσταση στην σύνθεσή του θα απορροφώνται διαφορετικά επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αναδεικνύοντας έτσι μέσα από τις αποκλίσεις της ενέργειας που το διαπερνά σε ποια σημεία του παρατηρούνται αντίστοιχες μεταβολές στην σύνθεσή του. Για την αποτύπωση των αποκλίσεων της εξερχόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα από το αντικείμενο αυτό, χρειάζεται κάποιο φιλμ αποτύπωσης, φωτοευαίσθητο χαρτί ή γενικότερα κάποιο είδος ανιχνευτή της ακτινοβολίας.

Με τον όρο ραδιογραφία καλείται η αποτύπωση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που διαπερνά το σώμα σε μέσα αποτύπωσης. Στις περιπτώσεις που γίνεται απεικόνιση της εξέτασης σε οθόνες με φθόριο ή σε αναλυτές εικόνας, η διαδικασία λέγεται ότι πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο μιας και μας δίνει άμεσα τις ενδείξεις από το υλικό που εξετάζεται. Όταν δεν γίνεται απεικόνιση των αποτελεσμάτων αλλά χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης της έντασης της εξερχόμενης ακτινοβολίας τότε η μέθοδος ονομάζεται σχεδιασμός ακτινοβολίας ή αλλιώς gaging. Άλλη μια μέθοδος εξέτασης ενός αντικειμένου είναι η τομογραφία η οποία έχει εμπνευστεί από την ιατρική χρήση της ακτινοβολίας και στην οποία χρησιμοποιείται μια αντιπροσωπευτική τομή του αντικειμένου που αναλύεται.

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι βασίζονται στην διαφορετική διαπεραστικότητα που έχει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ακτίνες χ και γ) μέσα από διαφορετικής σύστασης υλικά. Ομοίως αντί ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και νετρόνια (Ραδιογραφία Νετρονίων).

Απαραίτητος ο ραδιογραφικός έλεγχος κρίνεται σε περιπτώσεις κατασκευής καλουπιών και συγκολλήσεων όπου είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία των παραγόμενων αντικειμένων η ομοιομορφία σύστασης της μάζας τους.

Τα πλεονεκτήματα της παραπάνω μεθόδου είναι:

- Τα αποτελέσματα απεικονίζουν την σύσταση του υλικού εις βάθος.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Κοστοβόρα μέθοδος
- Πρέπει να γίνει ειδική πρόβλεψη στην διαμόρφωση των κτηριακών δομών για ασφαλή χρήση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.
- Υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις όπου οι αλλοιώσεις είναι δύσκολο να ανιχνευτούν όπως μικρής έκτασης ρωγμές σε ογκώδη αντικείμενα.
- Καταστροφικές συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία η έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Έχει διαπιστωθεί ότι αλλοιώσεις που εμφανίζονται με κλίση μεγαλύτερη από 8 μοίρες από το επίπεδο που βρίσκεται η ρωγμή, δεν ανιχνεύονται.

1.1.3.6 Μέθοδος ελέγχου με ακουστικές εκπομπές

Ακουστικές εκπομπές αποτελούν το σύνολο των φαινομένων στα οποία μεταβατικά ελαστικά και κρουστικά κύματα δημιουργούνται εξ αιτίας της απότομης απελευθέρωσης ενέργειας από τοπικές πηγές σε ένα υλικό (ASTM E1316). Η ένταση της ακουστική εκπομπής ποικίλει ανάλογα με το φαινόμενο. Το ποσοστό της απόσβεσης ενός κύματος ακουστικής εκπομπής εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού. Η απόσβεση είναι μεγαλύτερη σε πορώδη και βισκοελαστικά υλικά από ότι σε μεταλλικά.

Η βασική αρχή επομένως της μεθόδου ΑΕ για τον έλεγχο κατασκευών είναι η καταγραφή των ελαστικών κυμάτων που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών στην δομή του υλικού από αισθητήρες τοποθετημένους στην επιφάνεια της κατασκευής. Τέτοιες ασυνέχειες δομής αποτελούν η έναρξη και διάδοση ρηγματώσεων, η ύπαρξη διδυμίων κι η κατακρήμιση των κόκκων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον μη καταστροφικό έλεγχο και χαρακτηρίζει την συμπεριφορά των υλικών υπό επεξεργασία, παραμόρφωση και φθορά. Σε αντίθεση με τις τεχνικές υπερήχων και ραδιογραφίας, η ΑΕ δεν απαιτεί εξωτερική ενέργεια, αφού παράγεται από το ίδιο το υπό εξέταση αντικείμενο. Είναι η μόνη μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια της κατασκευής και στα ενδιάμεσα στάδια θερμικής κατεργασίας ενός εξαρτήματος. Οι τεχνικές ακουστικής εκπομπής έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον εντοπισμό πιθανών διαρροών σε δεξαμενές και για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων βιομηχανικών εξαρτημάτων.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ακουστικών εκπομπών είναι:

1. Η δυνατότητα καθορισμού των θέσεων ανάπτυξης των ρωγμών. Η πηγή της ακουστικής εκπομπής μπορεί να καθοριστεί από την χρονική καθυστέρηση των σημάτων που λαμβάνουν οι αισθητήρες.
2. Το είδος και η διεύθυνση των ρωγμών μπορεί να καθοριστεί με ανάλυση των κυματομορφών της ΑΕ.
3. Υπάρχει δυνατότητα ελέγχου ακόμα και μίας ολόκληρης κατασκευής χωρίς να χρειαστεί αποσυναρμολόγηση.

4. Δίνεται δυνατότητα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο.
5. Δεν απαιτείται η διακοπή της λειτουργίας μιας κατασκευής κατά τον έλεγχο ακόμα και σε περιπτώσεις διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας.
6. Είναι δυνατός ο έλεγχος σε κατασκευές που έχουν επικαλυφθεί με μονωτικό υλικό χωρίς να απαιτείται η αφαίρεση του υλικού παρά μόνο στα σημεία που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου ακουστικών εκπομπών είναι:

1. Η διάκριση μεταξύ των πραγματικών σημάτων ακουστικής εκπομπής και του θορύβου από το περιβάλλον κατά την διάρκεια της μέτρησης είναι ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Σε θορυβώδη περιβάλλοντα είναι απαραίτητη η εφαρμογή εξειδικευμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος για την μείωση του θορύβου και την αναγνώριση του πραγματικού σήματος ΑΕ.
2. Σε μερικά υλικά τα κύματα ΑΕ διαδίδονται μόνο όταν η φόρτιση φτάσει στο όριο παραμόρφωσης του.
3. Είναι δύσκολος ο υπολογισμός της θέσης της ΑΕ σε περιπτώσεις μη ομογενών υλικών, όπου οι ταχύτητες διάδοσης του κύματος διαφέρουν ανάλογα με την κατεύθυνση [9].

1.1.3.7 Εξέταση με Φθορίζοντα Σωματίδια

Η εξέταση με φθορίζοντα μαγνητικά σωματίδια παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με εκείνη των απλών μαγνητικών σωματιδίων, με την μόνη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση σωματιδίων επικαλυμμένων από μια φθορίζουσα βαφή ώστε να ξεχωρίζουν οπτικά.

Η χρήση των μαγνητισμένων, φθορίζόντων σωματιδίων βασίζεται στο φαινόμενο της συγκέντρωσης τους σε περιοχές με ασυνέχειες πάνω στην επιφάνεια που εξετάζεται ακριβώς όπως και των απλών ορατών μαγνητικών σωματιδίων. Μεγάλη σημασία για την επιτυχία και την αποδιδόμενη ακρίβεια της μεθόδου έχει η ικανότητα εντοπισμού των σωματιδίων από το ανθρώπινο μάτι. Ιδιαίτερη σημασία στον εντοπισμό των ενδείξεων έχει ο λόγος αντίθεσης (contrast ratio) του σωματιδίου και της περιβάλλουσας επιφάνειας. Είναι κατανοητό λοιπόν πως είναι δύσκολη και μη αποδοτική η αναζήτηση άσπρων σωματιδίων σε μαύρο περιβάλλον (εξέταση με απλά ορατά μαγνητικά σωματίδια). Η εξέταση με φθορίζοντα σωματίδια παρουσιάζει υψηλότερη ευκρίνεια άρα και ακρίβεια σε σχέση με την απλή εξέταση μαγνητικών σωματιδίων. Είναι χαρακτηριστικό πως στην εξέταση αυτή οι λόγοι αντίθεσης μπορούν να φθάσουν και τιμές 1000:1, ενώ στα ορατά σωματίδια αγγίζουν το 9:1.

Το ανθρώπινο μάτι έχει την ικανότητα να διακρίνει διαφορές φωτεινότητας που αγγίζουν το 15%. Το ποσοστό αυτό δείχνει πως δεν είναι ιδιαίτερα εύκολος ο εντοπισμός μικρών φωτεινών πηγών σε κάποιο σκοτεινό περιβάλλον. Η αναποτελεσματικότητα της μεθόδου ορατών σωματιδίων και η δυσκολία της εξέτασης οδήγησαν στην εξέλιξη της σε μια νέα μέθοδο με χρήση πιο εύκολα παρατηρήσιμων, για το ανθρώπινο μάτι, σωματιδίων.

1.1.3.8 Πειραματική ανάλυση τάσεων

Πρόκειται για την πειραματική διαδικασία κατά την οποία εντοπίζονται οι φορτίσεις και οι τάσεις που εφαρμόζονται σε ένα εξεταζόμενο εξάρτημα. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στον εντοπισμό των φορτίσεων αυτών που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία αλλά και των περιοχών πάνω στο εξεταζόμενο εξάρτημα που συγκεντρώνονται οι τάσεις αυτές. Κατά την πειραματική ανάλυση

τάσεων, γίνεται χρήση ειδικών μετρητικών οργάνων προκειμένου να εντοπιστεί από τον μελετητή η οποιαδήποτε διαστασιακή μεταβολή στο εξεταζόμενο εξάρτημα. Τα μετρητικά αυτά όργανα μπορεί να λειτουργούν είτε οπτικά είτε ηλεκτρονικά είτε και μηχανικά. Στην πληθώρα των περιπτώσεων που απαιτείται φορητότητα και ταχύτητα στην μέτρηση χρησιμοποιούνται τα μηχανικά μετρητικά όργανα.

1.1.3.9 Πειραματική ανάλυση αντοχής

Η εξέταση αντοχής των υλικών στοχεύει στον προσδιορισμό των φορτίσεων που ασκούνται από κάποια μηχανική συστοιχία και των τάσεων που εφαρμόζονται από τα συνεργαζόμενα εξαρτήματα που δύναται να οδηγήσουν σε αστοχία. Η εξέταση αυτή επιτρέπει την ανάλυση και μέτρηση, κατά προσέγγιση των εφελκυστικών-θλιπτικών δυνάμεων που ασκούνται στο αστοχηθέν εξάρτημα και δίνει την δυνατότητα εντοπισμού σημείων όπου συγκεντρώνονται τάσεις. Ακόμη, δίνεται η δυνατότητα «χαρτογράφησης» της κατεύθυνσης των τάσεων αυτών.

1.1.4 Μηχανικές Δοκιμές

Μηχανικές δοκιμές είναι εκείνες, που προσδιορίζουν αριθμητικά την αντίσταση των σωμάτων στη δράση εξωτερικών δυνάμεων, που προσπαθούν να τα παραμορφώσουν, δηλαδή να αλλάξουν το σχήμα αλλά και τις διαστάσεις τους.

1.1.4.1 Δοκιμή σκληρότητας

Κατά την δοκιμή σκληρότητας γίνεται έλεγχος μη καταστροφικού χαρακτήρα. Εξαιρέση αποτελεί η μέτρηση μικροσκληρότητας όπου απαιτείται η δημιουργία ειδικών δειγμάτων από το εξεταζόμενο εξάρτημα. Με τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής μπορεί να γίνει αντιπαραβολή θεωρητικής και μετρούμενης τιμής με σκοπό την αξιολόγηση της ορθότητας της θερμικής κατεργασίας του δείγματος. Με τον ίδιο τρόπο εξετάζονται και άλλα χαρακτηριστικά του υλικού του εξαρτήματος, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό και οι ανωμαλίες της δομής που μπορεί να εμφανιστούν σε καταστάσεις υπερθέρμανσης, εξανθράκωσης, ενανθράκωσης και εναζώτωσης.

1.1.4.2 Άλλες μηχανικές δοκιμές

Οι μηχανικές δοκιμές πραγματοποιούνται πάνω στα εξεταζόμενα δοκίμια με σκοπό να δώσουν στον αναλυτή μία εικόνα της δομής. Ο αναλυτής πρέπει να συγκρίνει τα αποτελέσματα της δοκιμής με τα θεωρητικά δεδομένα που προδιαγράφουν το εξάρτημα. Ακόμη, είναι αναγκαίο να παρατηρηθούν και να αξιολογηθούν διαφορές επιφάνειας και καρδιάς στο δοκίμιο και πως αυτές επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες του εξαρτήματος. Οι δοκιμές που πραγματοποιούνται σε αναλύσεις αστοχίας γενικότερα είναι η δοκιμή εφελκυσμού, η δοκιμή θλίψης, η δοκιμή κόπωσης και η δοκιμή κρούσης.

Επειδή η θερμοκρασία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην γενικότερη συμπεριφορά των μετάλλων, πολλές φορές οι μηχανικές δοκιμές πραγματοποιούνται σε ίδιες θερμοκρασίες με την αστοχία. Μία τέτοια εφαρμογή είναι η ψαθυρή θραύση χάλυβα με μικρά ποσοστά άνθρακα όπου ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στην θερμοκρασία που θα πραγματοποιηθεί η θραύση. Αυτό οφείλεται στο ότι ο χάλυβας αυτός μεταβαίνει από όλκιμη σε ψαθυρή κατάσταση σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Σε περιπτώσεις δοκιμών σε μικρού μεγέθους δοκίμια εξαρτημάτων θα πρέπει να αποδίδεται η απαραίτητη προσοχή έτσι ώστε να μην συγχέεται η συμπεριφορά ενός μικρού δοκιμίου με το εξάρτημα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών καθολικά στα δοκίμια πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά της συμπεριφοράς του αστοχούντος εξαρτήματος, αφού κάθε δοκίμιο ανάλογα με τον χώρο και την κατεύθυνση που κατέχει στο εξάρτημα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις στις μηχανικές του ιδιότητες.

1.1.5 Διάκριση προετοιμασία και καθαρισμός των επιφανειών θραύσης

Ξεχωριστή σημασία στην εξέταση αστοχίας έχει ο ορθός καθαρισμός της επιφάνειας θραύσης. Συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο η επιφάνεια καθαρίζεται και, σε ορισμένες περιπτώσεις, συντηρείται έτσι ώστε να μην αφαιρεθούν πολύτιμα στοιχεία που θα οδηγήσουν σε σωστά συμπεράσματα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ομαλή έκβαση της εξέτασης. Μόνιμοι κίνδυνοι για τις επιφάνειες θραύσης αποτελούν η χημική και η μηχανική φθορά.

Κάθε είδους παράγοντας που μπορεί να φθείρει ή να αλλοιώσει πολύτιμα δεδομένα από την επιφάνεια θραύσης θα πρέπει να προβλεφθεί. Παραδείγματος χάριν, μικρά κομμάτια που αποτελούν προϊόντα της αστοχίας και μπορεί να είναι κολλημένα ή σφηνωμένα στην επιφάνεια δεν πρέπει να καθαριστούν ή να αποκολληθούν. Επομένως, είναι κατανοητό πως θα πρέπει να αποφεύγεται το τρίψιμο της επιφάνειας θραύσης με τα δάκτυλα ή με κάποιο πανί ή ακόμα και ο καθαρισμός της με νερό μιας και στις τρεις περιπτώσεις υπάρχει η πιθανότητα απομάκρυνσης δυνητικά πολύτιμων στοιχείων για την κατανόηση του μηχανισμού της αστοχίας. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να αποφευχθεί κάθε προσπάθεια να έρθουν τα προϊόντα της θραύσης το ένα κοντά στο άλλο στο πλαίσιο μιας επιτόπιας έρευνας αφού και πάλι η πιθανότητα να φθαρούν μηχανικά οι επιμέρους επιφάνειες είναι μεγάλη αλλοιώνοντας έτσι την μορφή τους.

Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις έχουν να κάνουν με την μηχανική φθορά μιας επιφάνειας θραύσης όμως γενικότερα η φθορά μπορεί να έχει και χημική προέλευση με διαβρωτικές αλλοιώσεις να εμφανίζονται στην επιφάνεια αυτή. Υπάρχουν εργαστήρια τα οποία δεν τοποθετούν υλικά που προλαμβάνουν την διάβρωση πάνω στις επιφάνειες θραύσης και τις μελετούν άμεσα μετά την θραύση. Με τον τρόπο αυτό καταφέρνουν να μελετήσουν την επιφάνεια θραύσης χωρίς καμία αλλοίωση. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται προσπάθεια να μην χαθούν στοιχεία της αστοχίας διότι ο εντοπισμός ενός ανομοιογενούς σώματος στην επιφάνεια θραύσης μπορεί να ρίξει φως στα βαθύτερα αίτια της αστοχίας. Σε περιπτώσεις που αυτό είναι εφικτό το ξένο σώμα απομονώνεται από την επιφάνεια θραύσης με χρήση ξηρού αέρα. Έτσι, καθαρίζεται η επιφάνεια θραύσης και συλλέγεται το ξένο σώμα, όπου πλέον μελετώνται ξεχωριστά.

Η χρήση του νερού θα ήταν χρήσιμο να αποφεύγεται αφού γενικότερα παρουσιάζει διαβρωτική δράση σε μεταλλικές επιφάνειες. Δυνητικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέσο καθαρισμού επιφανειών που έχουν εκτεθεί σε άλλα ισχυρότερα διαβρωτικά όπως το νερό της θάλασσας ή πυροσβεστικά υγρά. Μετά τον καθαρισμό με νερό και πριν την αποθήκευση των στοιχείων θα πρέπει να αφαιρεθεί όλη η παραμένουσα υγρασία από τις επιφάνειες με χρήση υγρών υψηλού πτητικού χαρακτήρα όπως οινόπνευμα ή ακετόνη.

1.1.5.1 Καθαρισμός

Τα προϊόντα μιας θραύσης θα καθαρίζονται μόνο κατά περίπτωση και όταν κρίνεται απαραίτητο έτσι ώστε να λειτουργήσουν σωστά τα στάδια της εξέτασής αστοχίας. Στις περιπτώσεις αυτές που κρίνεται αναγκαίος ο καθαρισμός, γίνεται λεπτομερής αφαίρεση όλων των ξένων σωμάτων, ρυπαντικών ουσιών και διαβρωμένου μετάλλου. Η καθαρή πλέον επιφάνεια μπορεί να εξεταστεί με την χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Στο στάδιο του καθαρισμού επιστρατεύονται διάφορες μέθοδοι και βοηθητικά εργαλεία έτσι ώστε να απαλλαγεί η επιφάνεια θραύσης από ίχνη και κατάλοιπα τα οποία ενδέχεται να περιπλέξουν τα επόμενα στάδια της ανάλυσης. Ο καθαρισμός μπορεί να γίνει είτε με μηχανήμα που παράγει ριπές ξηρού αέρα είτε με χρήση μαλακής βούρτσας και να συνεχιστεί με βύθιση ή ψεκασμό του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά με διαλύτη οργανικής φύσης. Τέλος, τα στοιχεία πρέπει να καθαριστούν με αλκοολικά διαλύματα ή ήπιας οξύτητας υγρά ανάλογα με την περίπτωση.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι επιφάνειες θραύσης μπορεί να έχουν εκτεθεί σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται χρήση αντίγραφου από οξικό αλάτι όπου ύστερα από ειδική επεξεργασία με εμβάπτιση σε ακετόνη, που προσδίδει ελαστικότητα, τοποθετείται στην επιφάνεια θραύσης και συμπιέζεται. Στόχος της διαδικασίας είναι η πλήρης αποτύπωση της επιφάνειας θραύσης πάνω στο αλάτι. Ύστερα, ακολουθεί η ξήρανση και η αφαίρεση του στερεού πλέον αντίγραφου (θραύσης) άλατος. Με την διαδικασία αυτή απομακρύνονται και συντηρούνται με ασφάλεια τα θραύσματα από την επιφάνεια θραύσης προκειμένου σε μετέπειτα στάδιο να εξεταστούν λεπτομερικά.

1.1.5.2 Τεμαχισμός

Αν το μέγεθος του εξαρτήματος προς εξέταση δεν επιτρέπει την εύκολη διαχείριση του προκειμένου να πραγματοποιηθεί σκληρομέτρηση, οπτική μικροσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία θα πρέπει να γίνεται προπαρασκευαστικός τεμαχισμός του εξαρτήματος σε εργαστηριακά δοκίμια. Κατά την διάρκεια της προπαρασκευαστικής διαδικασίας του τεμαχισμού θα πρέπει να κρατείται λεπτομερές οπτικό αρχείο για κάθε μεμονωμένο προϊόν θραύσης σε όλα τα στάδια του τεμαχισμού τους. Έτσι, κατά την μελέτη ο ερευνητής μπορεί να ανατρέξει στο φωτογραφικό υλικό για να κατανοήσει τα αποτελέσματα και να προσδιορίσει τον μηχανισμό της αστοχίας.

Εξέχουσας σημασίας είναι ο τρόπος που πραγματοποιείται ο τεμαχισμός αφού πρόκειται για μια δραστηκή διαδικασία πάνω στα δείγματα και ενέχει πολλούς κινδύνους όσον αφορά την αλλοίωση στοιχείων. Γενικά, προτείνεται η απομόνωση και προστασία των επιφανειών όπου έλαβε χώρα και άφησε τα ίχνη της η αστοχία. Κατά τον τεμαχισμό, δεν πρέπει να αλλοιωθούν ή να επηρεαστούν οι επιφάνειες θραύσης. Ακόμη, η διατήρηση της ξηρότητας αποτελεί σημαντική προϋπόθεση.

Σε περιπτώσεις ανάλυσης αστοχίας μεγάλων εξαρτημάτων όπου απαιτείται σημαντική μείωση του μεγέθους τους μπορεί να εφαρμοστεί φλογοκοπή. Κατά την διαδικασία αυτή, θα πρέπει διατηρηθεί κάποια απόσταση ασφαλείας από την επιφάνεια θραύσης έτσι ώστε να προστατευθεί από τυχόν αλλοιώσεις που μπορεί να προκληθούν. Ο τεμαχισμός με εξειδικευμένα πριόνια, σιδηροπριόνια ή λειαντικούς τροχούς είθισται να πραγματοποιείται προκειμένου τα προϊόντα

θραύσης να έρθουν στα επιθυμητά μεγέθη προστατεύοντας ταυτόχρονα τις επιφάνειές τους. Η χρήση ψυκτικού γενικά αποφεύγεται ούτως ώστε να μην κινδυνεύσουν τα εργαστηριακά δοκίμια από τυχόν διαβρώσεις. Ακόμη, με τη χρήση ψυκτικών κατά την κοπή είναι πιθανή η απομάκρυνση ξένων σωμάτων από τις επιφάνειες θραύσης που μπορεί να είναι ενδεικτικά της αστοχίας. Η μόνη περίπτωση που πρέπει να πραγματοποιηθεί τεμαχισμός με ψυκτικό είναι όταν η επιφάνεια θραύσης είναι πολύ κοντά στο σημείο που θα γίνει η κοπή με κίνδυνο να προκληθεί θερμική αλλοίωση της δομής. Άλλη μια μέθοδος αφαίρεσης πλεονάζοντος υλικού είναι η χρήση τρυπανιού η οποία με προσεκτική εφαρμογή δεν διαταράσσει την δομή της επιφάνειας θραύσης.

Σε περιπτώσεις όπου οι επιφάνειες θραύσης έχουν καταστραφεί ανεπανόρθωτα σε σημείο που δεν είναι εφικτή η μελέτη τους, χρησιμοποιείται η μέθοδος διάνοιξης δευτερευουσών ρηγματώσεων. Κατά την μέθοδο αυτή δημιουργούνται δευτερεύουσες επιφάνειες θραύσης διανοίγοντας μικρότερου μήκους προεπάρχουσες ρηγματώσεις.

1.1.6 Μακροσκοπική ανάλυση επιφανειών θραύσης

Η ακριβής παρατήρηση μιας επιφάνειας θραύσης μεταξύ μεγεθύνσεων Mx1 έως Mx100 μπορεί να γίνει με γυμνό μάτι. Επίσης ενδείκνυται η χρήση μίας φωτεινής πηγής, ενός φακού ή ενός χαμηλής ισχύος μικροσκοπίου. Σε περίπτωση που απαιτείται φωτογράφιση σωμάτων μέχρι Mx20 τότε είναι απαραίτητη μια φωτογραφική μηχανή υψηλής ευκρίνειας και για μεγεθύνσεις από Mx20 έως Mx50 είναι απαραίτητη η χρήση μιας μεταλλογραφικής συσκευής με αντικειμενικούς φακούς και φωτισμό.

Σε περίπτωση που τα προϊόντα της θραύσης είναι μεγάλου μεγέθους ή βάρους και ο τεμαχισμός κριθεί αδύνατος, συνίσταται η εξέταση και απεικόνιση αντιγράφων τα οποία προκύπτουν από την διαδικασία καθαρισμού των θραύσεων.

Μεγάλος όγκος πληροφοριών μπορεί να εξαχθεί ύστερα από παρατήρηση μίας επιφάνειας θραύσης σε χαμηλής ισχύος μεγέθυνση. Οι πληροφορίες αυτές αναδεικνύουν τον τρόπο διάδοσης τάσεων πριν την αστοχία αλλά και το είδος της.

Παράγωγο αστοχίας μπορεί να αποτελέσει μια επίπεδη θραύση εμφανιζόμενη στη μέγιστη εφελκυστική τάση. Η θραύση αυτή πραγματοποιείται σε συνθήκες όπου η παραμόρφωση στον άξονα z είναι μηδενική ή αν μη τι άλλο θεωρούμε μηδενική. Ο μηχανισμός της θραύσης αυτής είναι διάτμηση υπό κλίση 45 μοιρών κατά προσέγγιση, εφόσον βέβαια υπερισχύσει η μηδενική τάση στον z άξονα. Παρόλα αυτά, είναι εξαιρετικά σπάνιο φαινόμενο κατά την διάρκεια μιας τέτοιας φόρτισης να προκύπτουν μηδενικές τιμές τάσης στον άξονα z. Συνήθως οι θραύσεις είναι κεντρικά επίπεδες και πλαισιωμένες από μια ζώνη διατμητικής θραύσης, άρα εκ του αποτελέσματος φαίνεται πως η ισορροπία στον z άξονα διαταράσσεται. Στην παραπάνω περίπτωση ανήκουν οι θραύσεις εφελκυσμού όπου τα ζεύγη επιφανειών σχηματίζουν όψεις κρατήρα και κώνου.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι διατμητικές θραύσεις είναι εξαιρετικά απίθανο να οφείλονται απόλυτα στο μηχανισμό της διάτμησης και μόνο. Ακόμη, σε τυπική διάτμηση με θραύση υπό κλίση 45 μοιρών μπορεί να παρατηρηθεί σημαντική απόκλιση στη γωνία μεταξύ κυρίως άξονα και άξονα θραύσης. Επομένως, όροι όπως «θραύση 45 μοιρών» και «διατμητικό χείλος» (ζώνη

διατμητικής θραύσης μεταξύ επίπεδης περιοχής και μιας ελεύθερης επιφάνειας), δεν περιγράφουν αξιόπιστα τα φαινόμενα που καλούνται να αποσαφηνίσουν και χρησιμοποιούνται κατά προσέγγιση ως εννοιολογικός καθορισμός. Απόδειξη της προαναφερθείσας προσέγγισης είναι ότι σε θραύσεις μπορούν να εμφανιστούν κυρτές επιφάνειες αλλά και σπειροειδείς επιφάνειες ως αποτέλεσμα στρεπτικών τάσεων παραγώγων κόπωσης.

Κατά την διάρκεια της μακροσκοπικής εξέτασης καθορίζεται η προέλευση της αστοχίας μέσω της κατεύθυνσης που ακολουθούν οι ρηγματώσεις στην επιφάνεια θραύσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ειδικά στις επίπεδες ψαθυρές θραύσεις ο ανάλογος προσδιορισμός γίνεται από τα σημάδια τύπου V που εμφανίζονται στην επιφάνεια θραύσης. Τα σημάδια V σε αυτή την περίπτωση είναι ίχνη που καταδεικνύουν την επιτάχυνση σε αρχικούς σχηματισμούς ρωγμών οι οποίες επεκτείνονται εξωτερικά από τα άκρα των σχηματισμών αυτών. Σε περίπτωση που στην επιφάνεια εμφανίζονται διατμητικές και επίπεδες θραύσεις τότε άμεσα συμπεραίνεται πως οι επίπεδες έχουν εμφανιστεί πριν τις διατμητικές.

Κατά την παρατήρηση επιφανειών με χαμηλή μεγέθυνση, συχνά αναδεικνύονται περιοχές που έχουν διαφορετική σύσταση από την περιοχή που η θραύση εμφανίζεται. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται κατά κόρον σε περιπτώσεις κόπωσης, διάβρωσης υπό τάση και άλλα.

1.1.7 Μικροσκοπική Ανάλυση των επιφανειών θραύσης

Κατά την μικροσκοπική ανάλυση μίας επιφάνειας, μπορούν να εξεταστούν εις βάθος όλα τα στοιχεία που φαίνεται να οδήγησαν στην εμφάνιση των προβλημάτων άρα και στην τελική αστοχία. Η ανάλυση αυτή καλείται ανάλυση μικροδομής και μερικά από τα στοιχεία αυτά είναι η κατεύθυνση των ρηγματώσεων, η εμφάνιση των παραμορφώσεων αλλά και η θερμική κατεργασία των συστατικών του υλικού.

Σπουδαίο ρόλο επί της διαδικασίας, διαδραματίζει η δειγματοληψία που πραγματοποιείται με σκοπό να αναδείξει τα χαρακτηριστικά του υλικού και να ρίξει φως στα βαθύτερα αίτια εμφάνισης της αστοχίας. Το ζητούμενο από την διαδικασία αυτή, είναι να αποκαλυφθεί μια ευρεία γκάμα στοιχείων και πληροφοριών από ένα μικρό αλλά χαρακτηριστικό δείγμα. Το δείγμα που θα επιλεγεί πρέπει να προετοιμαστεί κατάλληλα για τις διαδικασίες που θα ακολουθήσουν και να ελεγχθεί. Χαρακτηριστικά όπως το τελείωμα της επιφάνειας, οι γραμμές ροής και ο συνυπολογισμός πόρων θα πρέπει να παρατηρηθούν στο μικροσκόπιο.

Η μικροσκοπική εξέταση πραγματοποιείται με χρήση ενός εκ των τριών πιο διαδεδομένων τύπων μικροσκοπίου:

- Οπτικό μικροσκόπιο
- Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM)
- Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)

1.1.7.1 Οπτική Μικροσκοπία

Αποτελεί ένα οπτικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την παρατήρηση δοκιμίων υπό μεγέθυνση και κατάλληλο φωτισμό. Η λειτουργία του βασίζεται στην συστοιχία μεγεθυντικών φακών ανάμεσα στο μάτι και το εξεταζόμενο δοκίμιο σε κατάλληλες συνθήκες φωτισμού.

Χρησιμοποιείται εκτενώς για θραυστογραφία που δεν απαιτεί μεγάλη μεγέθυνση μιας και έχει περιορισμένες δυνατότητες ανάλυσης και εστίασης σε τραχιές επιφάνειες.

1.1.7.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM)

Πρόκειται για ένα οπτικό σύστημα που προσφέρει υψηλή μεγέθυνση και μεγάλο βάθος εστίασης, γεγονός που το καθιστά απαραίτητο στην θραυστογραφία. Σε ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (TEM=Transmission Electron Microscopy) ο μηχανισμός λειτουργίας βασίζεται στην ακτινοβολία μίας δέσμης ηλεκτρονίων ομοιόμορφης πυκνότητας ρεύματος πάνω στο εξεταζόμενο δοκίμιο και στην μαγνητική συγκέντρωσή τους σε μία φθορίζουσα οθόνη. Η εκπομπή των ηλεκτρονίων γενικά πραγματοποιείται με θερμιονική εκπομπή, με εκπομπή τύπου Schottky ή και με εκπομπή πεδίου. Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων γίνεται με χρήση μαγνητικών φακών και η συλλογή τους ολοκληρώνεται σε μία φθορίζουσα οθόνη. Για τις αναλύσεις αυτές απαιτείται ένα προπαρασκευαστικό στάδιο των δειγμάτων κατά το οποίο με διάφορες τεχνικές επιτυγχάνεται η εκλέπτυνση του δείγματος ώστε να διαπεραστεί από την ακτινοβολία ηλεκτρονίων. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές είναι:

- Η λέπτυνση με δέσμη ηλεκτρονίων
- Η χρήση μικροτόμων υψηλής λεπτότητας
- Η χημική λέπτυνση
- Ο σχισμός παράλληλα σε κρυσταλλικά επίπεδα
- Ο βομβαρδισμός με δέσμες ιόντων

Τέλος, θα πρέπει να κρατηθούν αντίγραφα των επιφανειών θραύσης αφού σε μετέπειτα στάδιο σε συνδυασμό με τα στοιχεία από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορούν να αναλυθούν δεδομένα όπως η σύνθεση, η δομή του κρυστάλλου και ο προσανατολισμός μικρών μορίων δεύτερης φάσης ευκολότερα.

1.1.7.3 Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Σάρωσης (SEM)

Ένα από τα πιο διάσημα μέσα που έχουν συμβάλει στην ανάλυση της μικροδομής των μεταλλικών υλικών, αλλά και στην μελέτη επιφανειών θραύσης είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Το όργανο αυτό, κλείνει το φάσμα χρησιμοποιούμενων μεγεθύνσεων μεταξύ απλού οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διερχόμενης δέσμης με ικανότητα μεγέθυνσης από $M \times 10000$ έως και $M \times 60000$ ενώ, το βάθος εστίασής του είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του οπτικού μικροσκοπίου.

Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και των υπολοίπων μικροσκοπίων έγκειται στο γεγονός ότι δεν χρησιμοποιεί οπτικούς φακούς. Ο μηχανισμός λειτουργίας ενός SEM βασίζεται στην επιτάχυνση ηλεκτρονίων μέσα στο πεδίο εκπομπής ενός σωλήνα καθοδικής ακτίνας. Η επιτάχυνση τους επιτυγχάνεται με εφαρμογή διαφοράς δυναμικού 1kV-50kV μεταξύ καθόδου και ανόδου. Η ακτίνα των ηλεκτρονίων, εξερχόμενη από τον θερμιονικό πομπό έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου με διάμετρο πρόσπτωσης στο δοκίμιο 2-100nm. Η λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δοκιμίου ενώ ειδικοί ανιχνευτές παραγόμενων ηλεκτρονίων εντοπίζουν δευτερογενή ηλεκτρόνια. Η εικόνα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου δημιουργείται από το σύνολο των μοναδικών σημειακών ανακλάσεων της ακτίνας από την επιφάνεια που ερευνάται. Άλλα σήματα (δευτερεύοντα

φαινόμενα) που λαμβάνει από το δοκίμιο και δίνει την ικανότητα για απεικόνιση είναι τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, η χαρακτηριστική ακτίνα x (EDS), οπτικά φωτόνια (καθοδοφωτάγια) και άλλα. Η πιο κοινή απεικόνιση των SEM είναι η απεικόνιση δευτερευόντων ηλεκτρονίων.

Οι δυνατότητες των ηλεκτρονικών μικροσκοπιών σάρωσης SEM όπως η εξαιρετική ικανότητα εστίασης σε μεγάλα βάθη, η δυνατότητα μεταβαλλόμενης μεγέθυνσης σε μεγάλο εύρος, η δυνατότητα τρισδιάστατων απεικονίσεων και η μη καταστρεπτική προπαρασκευή των δειγμάτων, αναδεικνύουν το είδος αυτού του μικροσκοπίου ως το δημοφιλέστερο στην θραυστογραφία και στις αναλύσεις αστοχίας.

Η ανάλυση της μικροθραυστογραφίας απαιτεί εκτενή γνώση της μηχανικής των θραύσεων και μεγάλη εμπειρία από τον μελετητή όσον αφορά την αναγνώριση των κυριότερων και βασικότερων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της. Κάποια βασικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Σε αστοχίες πάνω σε όλκιμα μέταλλα και κράματα, που οφείλονται σε εφαρμογή μεγάλων φορτίων, παρατηρείται κυψελωτός τύπος θραύσης.
- Σε αστοχίες πάνω σε ψαθυρά μέταλλα που διαδίδονται διακρυσταλλικά και κράματα με δομή κυβικού χωροκεντρομένου (BCC) παρατηρούνται έδρες σχισίματος.
- Σε επαναφερμένους χάλυβες συνήθως παρατηρείται ψαθυρή θραύση περικρυσταλλικά η οποία οφείλεται σε κάποιο εύθραυστο είδος δομής περιφερειακά των κόκκων.
- Τέλος σε περιπτώσεις που παρατηρούνται ραβδώσεις, συνεπάγεται η αστοχία λόγω κόπωσης.

1.1.8 Προπαρασκευή Μεταλλογραφικών τμημάτων

Οι αναλύσεις μεταλλογραφικού χαρακτήρα με χρήση οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για μια ολοκληρωμένη ανάλυση αστοχίας. Γίνεται αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων που απεικονίζουν την δομή ενός δείγματος αστοχίας και ενός ιδανικού δείγματος και έτσι εξάγονται πληροφορίες για πιθανά αίτια αστοχίας. Από το μικροσκόπιο παρέχονται πληροφορίες για τις μεθόδους κατασκευής και τις θερμικές κατεργασίες στις οποίες υποβλήθηκε το εξάρτημα είτε σκόπιμα είτε τυχαία λόγω αστάθμητων παραγόντων κατά την λειτουργία του. Ακόμη, μπορούμε να εντοπίσουμε και άλλα στοιχεία πάνω στα δείγματα που οφείλονται στην λειτουργία του εξαρτήματος, όπως διάβρωση και εργοσκληρυνση. Όλες οι παραπάνω ενδείξεις αξιολογούνται και εκτιμάται η πιθανότητα και ο τρόπος με τον οποίο ενήργησαν βοηθητικά προς στην αστοχία. Ο εντοπισμός ρηγματώσεων κατά την εξέταση στο μικροσκόπιο είναι συχνό φαινόμενο. Από τον τρόπο διάδοσής τους, και το μέγεθος τους κατανοούνται οι βαθύτερες αιτίες της αστοχίας.

Είναι απαραίτητο να γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη δειγματοληψία. Συγκεκριμένα θα πρέπει να εξετάζονται αντιπροσωπευτικά δείγματα του εξαρτήματος γενικότερα αλλά και της αιτίας που αστόχησε. Στην περίπτωση μίας θραύσης θα πρέπει να υπάρχουν δείγματα γύρω από τη περιοχή της θραύσης αλλά και αντιπροσωπευτικά δείγματα του εξαρτήματος και της αρχικής του κατάστασης λειτουργίας.

Η μελέτη μικρορωγμών είναι εξέχουσας σημασίας. Ο τρόπος μετάδοσης τους αλλά και η μορφολογία των άκρων τους αποτελούν ενδείξεις για την διάδοση τους άρα και για την εξέλιξη

της αστοχίας. Η μελέτη των μεγαλύτερων ρωγμών (ορατών δια γυμνού οφθαλμού) είναι επίσης σημαντική αλλά στις περιπτώσεις αυτές είναι κατανοητό πως η ρηγμάτωση επηρεάζεται (φθείρεται) από φυσικές αιτίες όπως η διάβρωση άρα οι παρατηρήσεις δεν είναι ενδεικτικές της αστοχίας.

Σε μελέτη θραύσης από κόπωση μια γενική οδηγία είναι η δειγματοληψία από το σημείο της θραύσης με σκοπό να εντοπιστεί η βαθύτερη αιτία (εάν υπάρχει) γύρω από το σημείο αυτό. Πιθανές ενδείξεις της εξέτασης μπορεί να είναι μία ατελής συγκόλληση, εξανθράκωση επιφανείας ή μια ζώνη πλούσια σε εγκλείσματα. Στην περίπτωση όπου η ρηγμάτωση είναι πιο έντονη και η προέλευσή της μη συγκεκριμένη, η δειγματοληψία από τα άκρα των ρωγμών είναι αδύνατη και ίσως ανούσια. Στις περιπτώσεις αυτές η ρηγμάτωση οφείλεται σε τοπική ανομοιογένεια. Συχνό φαινόμενο αποτελεί η κάλυψη των επιφανειών θραύσης με νικέλιο με σκοπό να διατηρηθεί η μορφή τους στο ακέραιο μέχρι την παρατήρηση. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται χτυπήματα και στρογγυλέματα που μπορεί να δυσκολέψουν και να αποπροσανατολίσουν το μελετητή.

1.1.9 Εξέταση και ανάλυση των μεταλλογραφικών τμημάτων

Η εξέταση με μικροσκόπιο των μεταλλογραφικών τμημάτων αποτελεί βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι της ανάλυσης αστοχίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δυνατότητα του μικροσκοπίου να αναδείξει στον μελετητή πιθανές ατέλειες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, να εμφανίσει τα αποτελέσματα πιθανής μη ορθής λειτουργίας και να προβάλλει το περιβάλλον λειτουργίας και τις συνέπειες αυτού στην αστοχία. Κάποιες πιθανές ανεπιθύμητες ενδείξεις του μικροσκοπίου είναι τα εγκλείσματα, η εξανθράκωση, η ύπαρξη μη επαναφερμένου μαρτενσίτη και η διάβρωση στα όρια των κόκκων. Τέλος, ακόμη και στην περίπτωση που δεν εντοπιστεί κάποια από τις παραπάνω ανεπιθύμητες ενδείξεις, η εξέταση με μικροσκόπιο μπορεί να αναδείξει το βάθος της εναζώτωσης, το μέγεθος του κόκκου και τη ζώνη θερμικής επιρροής όπου αποτελούν βασικές παραμέτρους για την εξέλιξη της αστοχίας.

1.1.10 Προσδιορισμός τύπου θραύσης

Ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες για την ομαλή και επιτυχή έκβαση στις αναλύσεις αστοχίας αποτελεί ο μελετητής. Είναι υπεύθυνος να γνωρίζει όλες τις επιμέρους διαδικασίες για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του κάθε είδους θραύσης. Πολύ σημαντικό ρόλο πέραν των γνώσεων του μελετητή διαδραματίζει και η εμπειρία του στις αναλύσεις αστοχίας. Η εμπειρία είναι αυτή που δίνει τη δυνατότητα σε ένα μελετητή να καταλήξει σε σωστά συμπεράσματα και κρίνοντας από λεπτομέρειες να παρουσιάσει μία ολοκληρωμένη ανάλυση αστοχίας. Η οποιαδήποτε παρερμηνεία σε μία ανάλυση αστοχίας εύκολα οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα. Αναγκαία συνθήκη αποτελεί ο διαχωρισμός των τύπων θραύσης και των μεμονωμένων χαρακτηριστικών τους. Με αυτόν τον τρόπο εντοπίζεται ένας συνοπτικός μηχανισμός για το κάθε είδος αστοχίας με απώτερο σκοπό να αξιολογούνται γενικότερα οι αστοχίες.

Εξ αιτίας του πολύπλοκου της φύσης της θραύσης γενικότερα αλλά και των παραγόντων που μπορεί να την προκαλέσουν δεν υπάρχει κάποια λογική ταξινόμηση των αστοχιών που οφείλονται σε θραύση. Εξ αιτίας αυτού οι θραύσεις θα ταξινομηθούν βάσει του μηχανισμού μετάδοσης της ρηγμάτωσης, ενώ δεν θα εξεταστεί η έναρξή της. Αποτέλεσμα αυτού είναι η επέκταση της ρωγμής

να θεωρείται ψαθυρή μη λαμβάνοντας υπόψιν την πλαστική παραμόρφωση που μπορεί να προηγηθεί ή και να ακολουθεί αυτής. Η συνένωση μικροκενών και η θραύση εξαιτίας της θα θεωρείται όλκιμη αφού η πλαστική παραμόρφωση αποτελεί απαραίτητο χαρακτηριστικό του μηχανισμού επέκτασης της ρωγμής [7].

1.1.10.1 Όλκιμη θραύση

Εξ αιτίας των μεγάλων εφαρμοζόμενων φορτίων σε διάφορα μέταλλα και κράματα παρατηρείται το φαινόμενο της όλκιμης θραύσης. Κατά την λειτουργία ενός εξαρτήματος και κάτω από περίπλοκες συγκυρίες μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτό κάποια τάση ικανή να το οδηγήσει στην αστοχία λόγω όλκιμης θραύσης. Πιο συγκεκριμένα, τάσεις ικανές να οδηγήσουν σε τέτοιου είδους θραύση μεμονωμένα ή και αθροιστικά είναι τα εφελκυστικά, τα καμπτικά και τα στρεπτικά φορτία. Κατά την όλκιμη εφελκυστική θραύση σε πρώτη φάση παρατηρείται η πλαστική παραμόρφωση. Για παράδειγμα σε κυλινδρικά δοκίμια κατά την πλαστική επέκταση αυτή, και πριν την εμφάνιση λαιμού, ξεκινά η διάδοση ρηγματώσεων από εγκλεισμένα μόρια εντός της δομής του υλικού που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μικροκενών στη δομή του υλικού. Η επέκταση του φαινομένου αυτού συνεχίζεται και το υλικό υπόκειται σε εργοσκλήρυνση. Όταν το υλικό δεν δύναται να υποστεί περαιτέρω εργοσκλήρυνση ξενικά η δημιουργία λαιμού. Οι τάσεις συγκεντρώνονται με αποτέλεσμα τα μικροκενά στην δομή να επεκτείνονται συνεχώς με φορά κάθετη στην φορά των εφαρμοζόμενων φορτίων. Στη συνέχεια η επέκταση των μικροκενών καταλήγει στην συνένωσή τους και την δημιουργία μίας κεντρικής ρηγμάτωσης περιφερειακά του εφελκυσζόμενου δοκιμίου, πράγμα που οδηγεί στη θραύση. Η συνένωση των μικροκενών πραγματοποιείται είτε με τοπική δημιουργία λαιμού είτε με την δημιουργία ζώνης διάτμησης. Στην δημιουργία ζώνης διάτμησης η συνένωση των μικροκενών που προαναφέρθηκαν γίνεται μέσω έντονης διατμητικής παραμόρφωσης. Το τελικό είδος θραύσης μπορεί να χαρακτηριστεί από την μορφή των άκρων των δύο θραυσμάτων. Στη μία περίπτωση στο σημείο θραύσης εντοπίζεται κώνος-κρατήρας και στην άλλη περίπτωση κρατήρας-κρατήρας.

Θραυστογραφία

Κατά την θραυστογραφική μελέτη των επίπεδων επιφανειών της όλκιμης θραύσης αποκαλύπτονται οι περίπου ισοαξονικοί θύλακες. Στις θραύσεις αυτές, που εμφανίζονται σε τμήματα που έχουν υποστεί διατμητικές τάσεις, δημιουργούνται επιμηκυμένοι θύλακες στην μεταλλική δομή. Μετά την θραύση εντοπίζονται θύλακες στις εκατέρωθεν επιφάνειες όπου κοιτούν σε αντίθετες κατευθύνσεις, γεγονός που αποτελεί χαρακτηριστικό των όλκιμων διατμητικών θραύσεων. Στις όλκιμες θραύσεις που ολοκληρώνονται με απόσπαση, η ρηγμάτωση είναι αυτή που παράγει τους επιμηκυμένους θύλακες στις επιφάνειες οι οποίες είναι όμοιες.

Σύνηθες χαρακτηριστικό των όλκιμων θραύσεων σε μία μικροσκοπική εξέταση είναι πως η μετάδοση της θραύσης πραγματοποιείται διακρυσταλλικά. Υπάρχουν εξαιρέσεις βέβαια στις οποίες η μεταλλογραφική ανάλυση κατέδειξε πως η θραύση διαδόθηκε περικρυσταλλικά και ψαθυρά με εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου. Ακόμη η εμφάνιση θυλάκων έχει παρατηρηθεί και σε ψαθυρές, περικρυσταλλικές επιφάνειες θραύσης. Ο τρόπος να περιοριστούν ως ένα βαθμό τα φαινόμενα αυτά είναι η επιλογή κραμάτων σκλήρυνσης με κατακρύμνιση.

1.1.10.2 Ψαθυρή θραύση

A) Διακρυσταλλική ψαθυρή θραύση

Μια από τις πιο κοινές διαδικασίες ψαθυρής θραύσης αποτελεί αυτή που πραγματοποιείται στο διακρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου αλλά και των χαλύβων με χαμηλό ποσοστό άνθρακα. Αποτελεί τόσο κοινή και χαρακτηριστική διαδικασία όπου, σε πολλές περιπτώσεις η ψαθυρή θραύση συνεπάγεται αυτόματα την ρηγμάτωση σε αυτά τα υλικά. Παρόλα αυτά η διακρυσταλλική ρηγμάτωση μπορεί να εμφανιστεί και σε άλλα μέταλλα, όπως τα μέταλλα bcc και τα κράματα τους με ψευδάργυρο, μαγνήσιο, βηρύλλιο και άλλα. Αντίθετα, στα μέταλλα και τα κράματα κυβικής εδροκεντρομένης μορφής (fcc) παρατηρούμε πως ο μηχανισμός αυτός της θραύσης δεν εμφανίζεται σε σημείο να θεωρείται μη εφικτό να προσβληθούν από αυτόν. Η ισχυρή εξάρτηση του ορίου διαρροής με την θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα με μείωση της θερμοκρασίας να παρατηρείται μία μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή κατάσταση στους χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και στον σίδηρο.

Η θερμοκρασία στην οποία θα πραγματοποιηθεί η μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή κατάσταση δεν αποτελεί μία φυσική σταθερά και ο μηχανισμός αυτός εξελίσσεται συναρτήσει πολλών παραγόντων. Ως εκ τούτου, ένα εξάρτημα για να προφυλαχθεί από αυτό τον μηχανισμό λαμβάνονται υπόψιν διάφοροι άλλοι φυσικοί παράγοντες όπως η μορφή του, το μέγεθος του αλλά και ο ρυθμός παραμόρφωσης του. Αποτέλεσμα αυτού αποτελεί το γεγονός ότι μία αστοχία λόγω μετάβασης από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση μπορεί να πραγματοποιηθεί απρόβλεπτα στο χρόνο και απροσδόκητα.

Κρυσταλλικές καλούνται οι θραύσεις εκείνες όπου η θραύση εμφανίζεται στο μικροσκόπιο σαν μια όψη λαμπερών εδρών κρυστάλλου. Στα πολυκρυσταλλικά δείγματα όπου και εμφανίζονται οι θραύσεις αυτές μπορούμε να παρατηρήσουμε θραύση σχισίματος δια γυμνού οφθαλμού. Κατά την εφαρμογή μέγιστης εφελκυστικής τάσης παρατηρείται το επίπεδο θραύσης αλλά και ένα χείλος το οποίο προκαλείται από διάτμηση πλαισιώνει την θραύση. Στο σημείο αυτό μια πιθανή έναρξη της θραύσης υποδεικνύεται από την απουσία ενός διατμητικού χείλους ή μίας διατμητικής θραύσης.

Θραυστογραφία

Μελετώντας χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, σίδηρο, ψευδάργυρο αλλά και διάφορα άλλα μονοφασικά μέταλλα και κράματα bcc παρατηρείται πως ένας από τους συχνότερα εμφανιζόμενους τύπους θραύσης αποτελεί η θραύση σχισίματος. Μικροσκοπικά στα πολυκρυσταλλικά αυτά μέταλλα, εντοπίζονται οροπέδια σχισίματος όπου χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό γεωμετρικής τελειότητας. Εντός των οροπεδίων αυτών εμφανίζονται σημάδια ποταμών. Στα σημάδια αυτά μπορεί να παρατηρηθεί το βήμα σχισίματος αλλά και η κατεύθυνση αύξησης των ρωγμών άρα και η φορά κατά την οποία εξελίσσεται η ρηγμάτωση. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι στις περιπτώσεις όπου οι μικρότεροι ποταμοί καταλήγουν στον κεντρικό τότε η κατεύθυνση της αύξησης των ρωγμών είναι η κατεύθυνση του κεντρικού ποταμού. Η μακροσκοπική επισκόπηση θα μπορούσε να οδηγήσει σε αντίθετα συμπεράσματα κρίνοντας από την κατεύθυνση της αύξησης των ρωγμών.

Στις διακρυσταλλικές ψαθυρές θραύσεις θα μπορούσαν επίσης να παρατηρηθούν και άλλα χαρακτηριστικά θραυστογραφίας, όπως η εμφάνιση σχισμάτων σε κεκλιμένα επίπεδα, οι ενώσεις διαφορετικού επιπέδου σχισμάτων με όλκιμα σχισίματα και η ύπαρξη γλωσσιδίων ύστερα από θραύση λόγω μηχανικών διδυμιών. Ιδιαίτερης δυσκολίας θεωρείται η αναγνώριση της θραύσης σχισίματος σε περλιτικούς και μαρτενσιτικούς χάλυβες εξ αιτίας της φυσικής τάσης της μικροδομής να αλλάξει την επιφάνεια της θραύσης.

B) Περικρυσταλλική ψαθυρή θραύση

Αποτελεί ένα πολύ ιδιαίτερο είδος θραύσης διότι είναι εύκολο να εντοπιστεί αλλά είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αναγνωρισθεί η αρχική της αιτία [11]. Μέσω της θραυστογραφικής εξέτασης μπορεί να ελεγχθεί η ύπαρξη δεύτερης φάσης μορίων στα όρια των κόκκων αλλά δυστυχώς δεν μπορεί να παρατηρηθεί η διαφοροποίηση ενός στρώματος λίγων ατόμων κάποιου στοιχείου ή και ένωσης που δημιουργεί περικρυσταλλική θραύση.

Η πρώτη αιτία που μπορεί να οδηγήσει σε περικρυσταλλική ψαθυρή θραύση είναι η απουσία ικανοποιητικών συστημάτων παραμόρφωσης προκειμένου να ικανοποιηθεί το κριτήριο Taylor von Mises. Το κριτήριο αυτό αναφέρει ότι για την παραμόρφωση ενός κόκκου σε διαφορετική μορφή είναι απαραίτητη η επιβολή της παραμόρφωσης αυτής από πέντε γειτονικά ανεξάρτητα συστήματα.

Συχνό φαινόμενο αποτελεί η περικρυσταλλική ψαθυρή θραύση εξ αιτίας της ύπαρξης καρβιδίων και γενικότερα μορίων δεύτερης φάσης στα όρια των κόκκων. Αποτελεί την δεύτερη αιτία αυτής της θραύσης και εμφανίζεται συχνά σε κράματα χρωμίου, σιδήρου και νικελίου.

Η τρίτη αιτία είναι η ύπαρξη ενός τελείως διαφορετικού στοιχείου ή μίας ένωσης στα όρια ενός κόκκου. Για παράδειγμα σημεία ιδιαίτερης ευθραυστότητας θεωρούνται εκείνα στα οποία ο υψηλής καθαρότητας σίδηρος και το νικέλιο ενέχουν οξυγόνο και ο χαλκός ενέχει αμέταλλα στοιχεία. Ακόμη και στους χάλυβες ύστερα από επαναφορά μπορεί να παρατηρηθεί περικρυσταλλική ευθραυστότητα. Στα παραπάνω παραδείγματα η παρατήρηση μορίων δεύτερης φάσης είναι ιδιαίτερα δύσκολη όπως προαναφέρθηκε.

Η περικρυσταλλική περιοχή μπορεί να αποτελέσει πιθανό χώρο διάδοσης μίας ρηγμάτωσης οφειλόμενης σε διάφορες άλλες συνθήκες. Τέτοιες συνθήκες είναι η θραύση από κόπωση, το διαβρωτικό ράγισμα υπό τάση, η αστοχία ερπυσμού και άλλες.

1.1.10.3 Θραύση λόγω κόπωσης

Θραύση από κόπωση καλείται η θραύση εκείνη που προκαλείται από την εφαρμογή επαναλαμβανόμενων και κυκλικών φορτίων σε ένα εξάρτημα. Στην θραύση λόγω κόπωσης τα εφαρμοζόμενα φορτία ενδέχεται να είναι πολύ χαμηλότερα από την ονομαστική αντοχή διαρροής του μετάλλου. Ως εκ τούτου, διαφαίνεται πως η πολυπλοκότητα της φύσης της κόπωσης αλλά και η επιρροή διάφορων μεταβλητών στον μηχανισμό της καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη την μελέτη της θραύσης. Κάποιοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν την κόπωση άρα και την θραύση λόγω αυτής είναι το μέγεθος, η γεωμετρία, το υλικό κατασκευής, η τραχύτητα της επιφανείας του εξαρτήματος όπου προκύπτει, η περίοδος εφαρμογής των κυκλικών τάσεων, η ύπαρξη μέσης ή μη

εφαρμοζόμενης τάσης, η θερμοκρασία και το περιβάλλον. Η κάθε μελέτη θραύσης από κόπωση είναι διαφορετική και η επιρροή του κάθε παράγοντα διαφοροποιείται ανάλογα την μελέτη.

Στις περιπτώσεις αυτές δια γυμνού οφθαλμού διακρίνονται σημάδια εξέλιξης. Πρόκειται για τις διαδοχικές θέσεις του μετώπου των αναπτυσσόμενων ρηγματώσεων, οι οποίες προσομοιάζονται είτε με σημάδια παραλίας είτε με σημάδια παλίσρριας.

Η ρηγμάτωση γεννάται ως αποτέλεσμα της ύπαρξης ενός συνόλου τάσεων που καλείται σύστημα τάσεων της κόπωσης. Το σημείο στο οποίο ξεκίνησε η θραύση, χαρακτηρίζεται γενικά από μικρή τραχύτητα, καθώς η ρηγμάτωση εξελίσσεται. Ακόμη συχνά συνδέεται με μικρή μακροσκοπική ολκιμότητα.

Ενδέχεται να υπάρξουν ενδείξεις πως η ρηγμάτωση εξελίχθηκε μέσα από συγκεκριμένα κρυσταλλικά επίπεδα δίνοντας εικόνες εδρών διαμαντιού στον μελετητή. Ως εκ τούτου, είναι κατανοητό πως σε διάφορες περιπτώσεις θραύσης λόγω κόπωσης δεν εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά σημάδια εξέλιξης της ρηγμάτωσης που προαναφέρθηκαν. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του είδους αυτού θραύσης είναι η ύπαρξη ρηγματώσεων με διαφορετικές και πολλαπλές προελεύσεις, όπου όμως μόνο μία εξ αυτών εξελίχθηκε καταστροφικά για το εξάρτημα. Παρατηρούνται περικρυσταλλικές αλλά και διακρυσταλλικές ρηγματώσεις μα συνηθέστερη είναι η διακρυσταλλική διάδοσή τους. Διακρυσταλλική είναι η διάδοση των ρωγμών και στις περιπτώσεις κοπώσεως υπό διαβρωτικό περιβάλλον.

Μελετώντας μικροσκοπικά τις επιφάνειες των θραύσεων από κόπωση εντοπίζονται πτυχώσεις. Οι πτυχώσεις αυτές δημιουργούνται από τη εφαρμογή των κυκλικών τάσεων. Στις μελέτες αυτές συνίσταται ιδιαίτερη προσοχή του ερευνητή διότι οι χαρακτηριστικές πτυχώσεις κοπώσεως, είναι πιθανό να ταυτιστούν λαθεμένα με τις γραμμές Wallner και τα σημάδια τριψίματος. Κάτι τέτοιο θα ήταν ολέθριο για την ανάλυση αστοχίας, αφού θα οδηγούσε σε λάθος συμπεράσματα. Γενικότερα, οι γραμμές Wallner εντοπίζονται στα πολύ ψαθυρά υλικά ή σε περιπτώσεις όπου οι ραβδώσεις κόπωσης δεν υπάρχουν. Από την άλλη οι ραβδώσεις κόπωσης μπορούν να εξελιχθούν με διαφορετικές κατευθύνσεις αλλά σίγουρα δεν μπορούν να τμηθούν η μία με την άλλη, όπως κάνουν οι γραμμές Wallner. Τα σημάδια τριψίματος προκαλούνται επιφανειακά συνήθως πάνω στην διάμετρο, εξ αιτίας του φαινομένου τριβής και εκτριβής.

1.1.10.4 Ράγισμα διάβρωσης υπό τάση

Ως μια πολυσύνθετη περιβαλλοντική-μηχανική αστοχία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί το ράγισμα διάβρωσης υπό τάση. Το πολυσύνθετο της φύσης της προκύπτει από την εφαρμογή ενός σχετικά χαμηλού εφελκυστικού φορτίου σε σχέση με το όριο διαρροής του μετάλλου αλλά σε ένα ήπια διαβρωτικό περιβάλλον. Είναι πιθανό το φορτίο και το περιβάλλον μεμονωμένα να μην μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία το εξάρτημα ωστόσο, ο συνδιασμός των δύο παραγόντων να είναι καταστροφικός. Στις περιπτώσεις αυτές, μακροσκοπικά υπάρχουν δείγματα κάποιας διάβρωσης, όχι ικανά να προκαλέσουν αστοχία αλλά εντός της μεταλλικής δομής δημιουργούνται λεπτές γραμμές με κατεύθυνση το εσωτερικό του εξαρτήματος. Τα παρακάτω μέταλλα κράματα είθισται να συνδέονται με ράγισμα διάβρωσης υπό τάση:

- Κράματα αλουμινίου ψευδαργύρου-μαγνησίου (σειρά 7xxx), όπου βρίσκονται εκτεθειμένα σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον.
- Κράματα νικελίου του τύπου Inconel και ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες σε περιβάλλοντα ιδιαίτερος χαμηλών συγκεντρώσεων ιόντων χλωρίου.
- Χάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα συνήθως δομικών εφαρμογών, σε περιβάλλοντα με έντονη ύπαρξη νιτρικού άλατος.
- Υψηλότατης αντοχής εφελκυσμού χάλυβες, άνω των 1240MPa σε περιβάλλοντα όπου η ευθραυστότητα υδρογόνου παίζει σημαντικό ρόλο.
- Τα κράματα χαλκού 79Cu-30Zn, σε περιβάλλοντα με υψηλή περιεκτικότητα σε αμμωνία.

Μικροσκοπικά, μπορεί να παρατηρηθεί πως η διάδοση των ρηγματώσεων εξελίσσεται διακρυσταλλικά αλλά και περικρυσταλλικά αναλόγως το υλικό. Σε πολλές μελέτες έχει παρατηρηθεί πως συνυπάρχουν διακρυσταλλικά και περικρυσταλλικά ρήγματα. Περικρυσταλλικές ρηγματώσεις εμφανίζονται συνήθως σε χάλυβες που χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, και σε κραμματα αλουμινίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν αστοχίες όπου η διαδρομή της ρωγμής εξελίσσεται ακριβώς δίπλα στο όριο του κόκκου και όχι εντός αυτού. Στις περιπτώσεις αυτές η ύπαρξη επίπεδων επιμηκυσμένων κόκκων δημιουργεί μια προσβάσιμη διαδρομή για την ρηγμάτωση διάβρωσης υπό τάση. Διακρυσταλλική ρηγμάτωση παρατηρείται σε ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες 18Cr-8Ni και σε κράμματα μαγνησίου. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται έντονη διακλάδωση των ρηγμάτων και μία τάση της θραύσης να ακολουθήσει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της μεταλλικής δομής που επιτρέπουν τη διάδοσή της (όρια των κόκκων και όρια των διδυμίων). Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διάβρωσης υπό τάση αποτελούν οι ξύλινες επιφάνειες θραύσης με εγκάρσια διάδοση, οι σχισμένες έδρες διαμαντιού, οι πτυχώσεις και τα γλωσσίδια.

1.1.10.5 Ευθραυστότητα υγρού μετάλλου

Ο μηχανισμός με τον οποίο λειτουργεί το συγκεκριμένο είδος αστοχίας βασίζεται στην ψαθυροποίηση ενός κατά τα άλλα όλκιμου μετάλλου, εξ αιτίας ενός άλλου υγρού μετάλλου και της επαφής των δύο. Η διαβροχή υδραργύρου (Hg) πάνω σε ορείχαλκο 70%Cu-30%Zn έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των εφελκυστικών και καμπτικών φορτίων που μπορεί να δεχθεί το υλικό μέχρι να σπάσει. Συγκεκριμένα, η τάση που θα σπάσει πλέον το υλικό είναι χαμηλότερη από αυτήν που θα προκαλούσε πλαστική παραμόρφωση στο υλικό υπό φυσιολογικές συνθήκες. Ο ορείχαλκος 70%Cu-30%Zn είναι ιδιαίτερα όλκιμο υλικό και κατά την μηχανική δοκιμή του εφελκυσμού παρουσιάζει λαιμό μέχρι την τελική θραύση. Η ίδια μηχανική δοκιμή πραγματοποιούμενη κάτω από συνθήκες ευθραυστότητας υδραργύρου καταλήγει σε επίπεδη περικρυσταλλική θραύση χωρίς να μετράται κάποια επιμήκυνση. Το γεγονός αυτό δείχνει πως η ευθραυστότητα υγρού μετάλλου προκαλεί βίαιη και ολοκληρωτική αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού.

Κάποια στερεά μέταλλα παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευπάθεια σε συγκεκριμένα υγρά μέταλλα. Ο υδράργυρος (Hg) ψαθυροποιεί κράματα χαλκού και αλουμινίου. Το λίθιο (Li), ο ψευδάργυρος (Zn) και τα κράματα τους ψαθυροποιούν ιδιαίτερος τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες. Το βισμούθιο (Bi) προσβάλλει τα κράματα χαλκού (Cu). Έχει παρατηρηθεί λοιπόν πως το κάθε υγρό μέταλλο λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο πάνω στο κάθε στερεό. Τα κοινώς ονομαζόμενα καθαρά

μέταλλα θεωρείται πως δεν είναι εύκολο να προσβληθούν από αυτό το είδος αστοχίας, εκτός από το χαλκό, τον ψευδάργυρο και το αλουμίνιο που προσβάλλονται από το βισμούθιο και τον υδράργυρο αντίστοιχα.

1.1.10.6 Ευθραυστότητα υδρογόνου

Το υδρογόνο έχει την ικανότητα να κάνει ψαθυρά διάφορα όλκιμα μέταλλα και κράματα. Η διαβροχή όμως υδρογόνου πάνω σε χάλυβες υψηλής αντοχής (αντοχή > 1240 MPa) μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα καταστροφική. Ο μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο λειτουργεί αυτή η αστοχία είναι ιδιαίτερα σύνθετος, αφού μετά το σπάσιμο παρατηρούνται περιοχές που χαρακτηρίζονται από όλκιμη θραύση αλλά και σημεία στα οποία η ψαθυρότητα της περιοχής είναι έντονη. Αυτό οφείλεται στο ότι τα άτομα του υδρογόνου που έρχονται σε επαφή με τον χάλυβα δημιουργούν μέσα στην μεταλλική του δομή ασυνεχείς ρηγματώσεις, δηλαδή ψαθυρές περιοχές που ευνοούν την θραύση. Τέτοια παραδείγματα αστοχιών μπορούν να προκληθούν από μη προστατευόμενα περιβάλλοντα φούρνων ενώ είναι ιδιαίτερα αναγνωρίσιμα λόγω του σύνθετου της μορφολογίας θραύσης τους. Στις εφαρμογές αυτές η διάδοση των ρηγματώσεων πραγματοποιείται μέσα από τα όρια προωστενιτικών κόκκων και διευκολύνεται από τον μερτενσιτικό μετασχηματισμό και τις εσωτερικές τάσεις του υλικού κατά την διαδικασία αυτή.

Θραυστογραφία

Στους χάλυβες που η αστοχία επέρχεται λόγω ευθραυστότητας υδρογόνου, κατά την θραυστογραφία παρατηρούνται επιφάνειες όμοιες με θραύσεις υπό τάση σε κράματα αλουμινίου και χάλυβα υψηλής αντοχής. Οι ρηγματώσεις παρατηρούνται να διαδίδονται στα όρια των κόκκων του ωστενίτη ενώ δημιουργούν περιοχές επιφάνειας θραύσης. Η καθυστερημένη τελική θραύση θα επέλθει όταν οι περιοχές αυτές επιφάνειας θραύσης πληθύνουν.

1.1.10.7 Αστοχίες Ερπυσμού

Ερπυσμός καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο, ένα μέταλλο ή ένα κράμα υπόκειται σε μία διαστασιακή μεταβολή, ενώ βρίσκεται σε περιβάλλον με θερμοκρασία που υπερβαίνει την μισή θερμοκρασία τήξης του. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρείται σε υλικά όπως ο μολύβδος, ο κασσίτερος και το αλουμίνιο όπου προκαλείται παραμόρφωση λόγω ερπυσμού σε θερμοκρασία δωματίου. Είναι κατανοητό λοιπόν πως λόγω του ερπυσμού και των μεγάλων διαστασιακών μεταβολών που προκαλούνται, ένα εξάρτημα χάνει κάθε χρησιμότητά του πριν σπάσει.

Στις αστοχίες ερπυσμού παρατηρούνται είτε σφηνοειδείς ρωγμές στα όρια των κόκκων είτε εμφάνιση κενών στις περιοχές αυτές. Θεωρείται εύκολος ο εντοπισμός των αστοχιών αυτών εξ αιτίας της τοπικής ολκιμότητας και των ρηγματώσεων περικρυσταλλικά.

1.1.10.8 Σύνθετες αστοχίες

Απαραίτητος είναι ο έλεγχος της ενδεχόμενης συνύπαρξης δύο μηχανισμών θραύσης. Η συνύπαρξη αυτή μπορεί να οδηγήσει ένα εξάρτημα σε πολύ γρήγορη αστοχία ενώ χρειάζεται μεγάλη εμπειρία από τον ερευνητή προκειμένου να αναγνωρίσει τα εμπλεκόμενα στοιχεία των δύο μηχανισμών και να καθορίσει τα είδη της θραύσης.

1.1.11 Χημική ανάλυση

Ένα βασικό εργαλείο της ανάλυσης αστοχίας αποτελεί η χημική ανάλυση του υλικού του εξαρτήματος που αστόχησε. Μέσω της διαδικασίας αυτής φαίνεται το κατά πόσο κατάλληλο είναι ένα υλικό σε μία εφαρμογή με γνώμονα την χημική του σύσταση. Κατά την χημική ανάλυση δεν επιζητούνται απόλυτα ακριβείς περιεκτικότητες σε σχέση με τις προδιαγραφές αφού μικρές διαφοροποιήσεις σε αυτές δεν είναι ικανές να προκαλέσουν αστοχία. Θεωρείται κοινώς αποδεκτό το γεγονός ότι είτε αυξανόμενης είτε μειούμενης της περιεκτικότητας σε κάποιο σημαντικό στοιχείο, αλλά σε μικρή κλίμακα, δεν αλλάζει η γενικότερη συμπεριφορά του υλικού. Σε αστοχίες όπως λόγω διάβρωσης υπό τάση η χημική ανάλυση είναι απαραίτητη και τα ευρήματά της πολύ χρήσιμα για τον ερευνητή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ερευνητής μπορεί αναλύοντας δείγμα διάβρωσης να οδηγηθεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για την πρωταρχική αιτία της αστοχίας. Στις περιπτώσεις αυτές προτείνεται επίσης η χημική ανάλυση σε δείγματα υλικών με τα οποία το αστοχηθέν εξάρτημα μπορεί να έρχεται σε επαφή. Κατά αυτόν το τρόπο ο ερευνητής είναι σε θέση να εντοπίσει αν κάποιο άλλο υλικό επηρεάζει την εξάπλωση του φαινομένου.

Ένας αστάθμητος παράγοντας που επηρεάζει πολύ τις μηχανικές ιδιότητες ενός μετάλλου είναι η περιεκτικότητα σε αέρια στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά δεν εμφανίζονται σε μία χημική ανάλυση και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στον χειρισμό του υλικού προκειμένου να μην έρθει σε επαφή με αυτά. Οι χάλυβες επηρεάζονται ιδιαίτερα από το οξυγόνο και το άζωτο όπου διευκολύνουν την γήρανση του υλικού. Ακόμη, το υδρογόνο αποφεύγεται στα περιβάλλοντα στα οποία ο χάλυβας θερμαίνεται (φούρνοι, κολλήσεις κ.α) ή καθαρίζεται (ηλεκτρολυτικά, χημικά κ.α) διότι ψαθυροποιεί την δομή του χάλυβα και μειώνει την δυσθραυστότητά του.

Παρακάτω καταγράφονται κάποιοι βασικοί τύποι χημικής ανάλυσης:

- Φασματοσκοπία εκπομπής
- Φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης
- Υπέρυθρες φασματοσκοπίες
- Υπεριώδεις φασματοσκοπίες
- Περίθλαση ακτινών x(XRD)
- Φασματοσκοπία Auger
- Φασματοσκοπία Mossbauer
- Φασματοσκοπία SIMS
- Φασματοσκοπία LEISS

Στις ανωτέρω δοκιμές δεν απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις χημείας ή εμπειρία στον χειρισμό αντιδραστηρίων. Με μόνη προϋπόθεση η μελετώμενη ουσία να μπορεί να αναμειχθεί, μπορούν να πραγματοποιούνται χημικές αναλύσεις σε εξαρτήματα που αστόχησαν, σε συνεργαζόμενα με αυτά εξαρτήματα, σε ιζήματα και σε προϊόντα διάβρωσης.

1.1.12 Αστοχίες που προκαλούνται από σχεδιαστικά λάθη

Κάποιοι πολύ σημαντικοί παράγοντες για την εν γένει συμπεριφορά και την διάρκεια ζωής ενός εξαρτήματος είναι η επιλογή του υλικού, η μηχανουργική κατεργασία, η συναρμολόγηση και ο γενικότερος σχεδιασμός του [9]. Αναρίθμητες είναι οι αστοχίες εκείνες που προκλήθηκαν από

σχεδιαστικά λάθη και εξ αιτίας αυτού δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην αποφυγή σχεδιαστικών αδυναμιών στο τελικό εξάρτημα. Η ύπαρξη ραδίων σε ένα εξάρτημα επιτρέπει την ομαλότερη κατανομή των τάσεων κατά την λειτουργία του και δίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο εξάρτημα.

1.1.13 Ανάλυση της μηχανικής της θραύσης

Η ανάλυση της μηχανικής της θραύσης είναι ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία της ανάλυσης αστοχίας, αφού μπορεί να δώσει στον ερευνητή σαφή εικόνα του τρόπου με τον οποίο ξεκίνησε η εμφάνιση των πρώτων ρηγματώσεων και εξελίχθηκε η θραύση μέχρι να καταλήξει στην αστοχία.

Κατά τη μηχανική ανάλυση της θραύσης γίνεται μελέτη σε όλες τις επιμέρους μηχανικές διεργασίες που συμβάλλουν στην αστοχία. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται με μαθηματική ανάλυση της εκάστοτε διεργασίας με απώτερο σκοπό τον χαρακτηρισμό της. Επίσης, η ανάλυση της μηχανικής της θραύσης βασίζεται σε βασικές θεωρίες, όπου δίνουν στον ερευνητή το γενικό πλαίσιο στο οποίο πρέπει να εξεταστεί μια αστοχία ανάλογα το είδος της. Οι θεωρίες αυτές βασίζονται τόσο στην εμπειρική όσο και στην θεωρητική γνώση χρόνων στο αντικείμενο της ανάλυσης αστοχίας. Η θεωρία της ελαστικότητας, αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα και η μηχανική ανάλυση της θραύσης η οποία βασίζεται σε αυτή καλείται γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική (LEFM). Σε αυτές τις περιπτώσεις, παρατηρείται στην επιφάνεια που ξεκινά η ρηγμάτωση ένα μικρό ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης. Στις περιπτώσεις όπου η πλαστική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη γίνεται χρήση της ελαστικής-πλαστικής μηχανικής της θραύσης (EPFM) ή αλλιώς της μη γραμμικής-ελαστικής μηχανικής της θραύσης (NLEFM). Μελετώντας τα δύο είδη μηχανικής της θραύσης παρατηρείται πως υπακούουν στην θεωρία της ελαστικότητας εν γένει. Η μόνη διαφορά είναι πως στην δεύτερη περίπτωση θεωρείται μη γραμμική η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού.

Η θραυστομηχανική είναι τόσο σημαντική για την ανάλυση της αστοχίας αφού, μέσω των προαναφερθέντων θεωριών γίνεται διαστασιολογική μελέτη των ρηγματώσεων και δίνει την δυνατότητα πραγματοποίησης ελέγχου θραύσης. Ακόμη, πραγματοποιείται έρευνα πάνω στα αποτυπώματα της θραύσης και εξετάζεται η συγκέντρωση τάσεων, η εφαρμογή τους στον χώρο εντός μεταλλικής δομής και ο ρυθμός παραμόρφωσης.

1.1.14 Δοκιμή εξομοίωσης της λειτουργίας

Όταν ο ερευνητής έχει καταλήξει σε συμπεράσματα σχετικά με τον μηχανισμό και την εξέλιξη της θραύσης συχνά δημιουργείται η ανάγκη για επαλήθευση της απόφασής του. Με χρήση ειδικού εξοπλισμού πραγματοποιείται εξομοίωση της λειτουργίας του αστοχούντος εξαρτήματος και όλων εκείνων των συνθηκών που ο μελετητής κρίνει ότι επηρέασαν την αστοχία περισσότερο. Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι πολύπλοκος και ιδιαίτερα εξειδικευμένος στην κάθε περίπτωση αστοχίας, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την εφαρμογή εξομοίωσης της λειτουργίας σε κάθε ανάλυση. Σύνθηες φαινόμενο αποτελεί η προσπάθεια των ερευνητών να ελαττώσουν τον χρόνο διάρκειας της εξομοίωσης λειτουργίας τροποποιώντας την δοκιμή μέσω των συνθηκών της. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και μεγάλη εμπειρία για την τεχνητή αυτή αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας αφού η δοκιμή επηρεάζεται με τρόπο συχνά απρόβλεπτο που ενδεχομένως να οδηγήσει τον ερευνητή σε αδιέξοδο. Παράγοντες που θα μπορούσαν να ελαττώσουν τον χρόνο

ζωής ενός εξαρτήματος σε μία εξομοίωση είναι ένα έντονα διαβρωτικό περιβάλλον και μία έντονη αύξηση ή μείωση στην θερμοκρασία λειτουργίας.

1.1.15 Ανάλυση των στοιχείων, διατύπωση συμπερασμάτων και σύνταξη της έκθεσης

Εξέχουσα σημασία έχει το στάδιο της συλλογής όλων των επιμέρους στοιχείων της αστοχίας που διαφάνηκαν μέσα από τις μεμονωμένες διαδικασίες. Η μελέτη των επιμέρους στοιχείων οδηγεί στην διατύπωση πρωτογενών συμπερασμάτων. Είναι κατανοητό και από τα παραπάνω ότι σε κάθε ανάλυση αστοχίας χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα «εργαλεία» (διαδικασίες), άρα η κάθε αστοχία απαιτεί διαφορετικό τρόπο χειρισμού από τον μελετητή. Μία έρευνα, θα μπορούσε να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξεταστούν σε πρώτη φάση οι πιθανότερες και συχνότερα εμφανιζόμενες αιτίες σε ένα είδος αστοχίας. Η στρατηγική αυτή μπορεί να εξασφαλίσει πολύτιμο χρόνο για την στοχευμένη μελέτη γύρω από την πραγματική αιτία που προκάλεσε την αστοχία. Στην περίπτωση όπου τα στοιχεία που αποκαλύπτονται δεν συμφωνούν με τις πρωταρχικές εντυπώσεις, η στρατηγική μπορεί να αλλάξει και η ανάλυση να πραγματοποιηθεί εκτενέστερα και καθοδηγούμενη από τα νέα δεδομένα. Γενικά, είναι σημαντικό σε μία ανάλυση να διενεργούνται οι εργαστηριακές δοκιμές που προαναφέρθηκαν (μηχανικές δοκιμές, χημικές αναλύσεις, θραυστογραφίες και μικροσκοπία) προτού διατυπωθούν προκαταρκτικά συμπεράσματα διότι το αποτέλεσμα των δοκιμών αυτών μπορεί να διαψεύσει τον μελετητή.

Κατά την διάρκεια της ανάλυσης ενδέχεται κάποιες από τις διεργασίες που εκτελέστηκαν να μην υπήρξαν τόσο πλούσιες σε πληροφορίες. Το γεγονός αυτό δεν καθιστά κάποιες διεργασίες χρήσιμες και κάποιες άχρηστες, αλλά διαφοροποιεί την συγκεκριμένη ανάλυση. Απαραίτητος είναι ο διαχωρισμός των διεργασιών ανάλογα με την αποδοτικότητα τους σε πληροφορίες. Από την άλλη, κατά την διάρκεια μίας έρευνας δεν θα πρέπει να παραλήπονται ακόμα και οι διεργασίες εκείνες οι οποίες απλά θα επιβεβαιώσουν ένα ήδη γνωστό συμπέρασμα. Με την επιβεβαίωση από μία ακόμα διεργασία, το συμπέρασμα γίνεται ατράνταχτο και το πρόβλημα εξετάζεται από μία διαφορετική σκοπιά. Οι έρευνες οφείλουν να είναι ολοκληρωμένες και εμπειρισταωμένες από κάθε οπτική γωνία.

Υπάρχει και η πιθανότητα η ανάλυση να μην καταλήξει σε συμπεράσματα. Στις περιπτώσεις αυτές, (παρόλο που δεν μπορεί να γίνει σαφής αιτιολόγηση της αστοχίας) ο ερευνητής καλείται να καταδείξει την πιθανότερη αιτία ή αιτίες της αστοχίας. Ο προσδιορισμός της πιθανότερων αιτιών πρέπει να βασίζεται στα αποτελέσματα των διεργασιών της ανάλυσης και όχι σε υποθέσεις.

Σύνταξη της έκθεσης

Σε μία ολοκληρωμένη έκθεση ανάλυσης αστοχίας θα πρέπει να παρουσιαστούν εκτενώς τα παρακάτω σημεία:

- Το αστοχηθέν εξάρτημα. Απαιτείται να γίνει παρουσίαση του εξαρτήματος που αστόχησε με λεπτομερειακή περιγραφή των χαρακτηριστικών του.
- Το περιβάλλον λειτουργίας του. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην αναγνώριση των συνθηκών μέσα στις οποίες λειτούργησε το εξάρτημα.
- Το ιστορικό που προηγήθηκε της λειτουργίας του. Αποτελεί μια προσπάθεια εντοπισμού λάθους χειρισμών πάνω στο εξάρτημα.

- Το ιστορικό κατασκευής και επεξεργασίας του εξαρτήματος. Πρόκειται για την γενικότερη ανάλυση του τρόπου κατασκευής και όλων των διαδικασιών εκείνων που του έδωσαν την τελική του μορφή και δομή.
- Η μηχανική και μεταλλουργική μελέτη της αστοχίας. Αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά μέρη της έκθεσης διότι εμπεριέχει όλη την ανάλυση του φαινομένου.
- Η μεταλλουργική αξιολόγηση της ποιότητας. Αφορά τον χαρακτηρισμό της δομής του εξαρτήματος από τον ερευνητή.
- Αναφορά και προσδιορισμός με αιτιολόγηση των μηχανισμών που προκάλεσαν την αστοχία. Ιδιαίτερη εμπειρία απαιτείται σε αυτό το μέρος της έρευνας.
- Συστάσεις του ερευνητή για πρόληψη και διόρθωση λαθών. Η έκθεση καταλήγει σε παρατηρήσεις και προτροπές για την αποφυγή παρόμοιας αστοχίας.

Κάθε έκθεση ανάλυσης αστοχίας είναι ξεχωριστή και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της γίνεται αναφορά στα παραπάνω σημεία. Σε μεγάλου μεγέθους εκθέσεις είναι απαραίτητη η παρουσίαση περίληψης. Απαιτείται η παρουσίαση ενός γλωσσαρίου όρων και ενός παραρτήματος υπολογισμών, προκειμένου να παραμείνει συμπαγές και κατανοητό το γενικότερο σώμα της έκθεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΧΑΛΥΒΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Χάλυβας καλείται το κράμα του οποίου το κλάσμα μάζας με τον σίδηρο (Fe) είναι μεγαλύτερο από κάθε άλλου στοιχείου του και η περιεκτικότητά του σε άνθρακα (C) είναι μεταξύ 0,008% κατά βάρος και 2,11% κατά βάρος. Ζωτικό ρόλο στην φύση και τις ιδιότητες ενός χάλυβα διαδραματίζει το ποσοστό του άνθρακα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η τελική σκληρότητα που μπορούμε να επιτύχουμε σε έναν χάλυβα είναι άμεσα συνδεδεμένη με την περιεκτικότητά αυτού σε άνθρακα. Ο άνθρακας αποτελεί το φθηνότερο και συνάμα το πιο αποτελεσματικό κραματοποιητικό συστατικό. Εξ αιτίας της χρησιμότητας αυτής, ένας από τους συνηθέστερους τρόπους κατηγοριοποίησης χάλυβων βασίζεται στην περιεκτικότητά σε άνθρακα. Το κριτήριο αυτό ξεχωρίζει τους χάλυβες (κοινούς ανθρακούχους) σε χάλυβες χαμηλής, μέσης, υψηλής και πολύ υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα αλλά και σε χυτοσίδηρους που θα αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω.

Πέραν της κραμάτωσης από άνθρακα, ανάλογα με τις εφαρμογές των χάλυβων πραγματοποιείται και η κραμάτωση τους από διάφορα άλλα στοιχεία όπως ο χαλκός (Cu), το μολυβδαίνιο (Mo), το ζιρκόνιο (Zr), το τιτάνιο (Ti) κλπ. [1]. Η κραμάτωση από το κάθε στοιχείο ξεχωριστά λειτουργεί σαν μία νέα αναδιοργάνωση των κρυσταλλικών πλεγμάτων των ατόμων του σιδήρου, προσδίδοντας νέες ιδιότητες στο τελικό προϊόν. Ζητούμενο των τροποποιήσεων της περιεκτικότητας των χάλυβων στα προαναφερθέντα κραματικά στοιχεία και τον άνθρακα είναι οι βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Οι ιδιότητες που επιδέχονται βελτίωσης κατά περίπτωση είναι οι ακόλουθες:

- Αύξηση της αντοχής του.
- Αύξηση της εμβαπτότητας του.
- Βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων γενικά.
- Βελτίωση της κατεργασιμότητάς του.
- Αύξηση της αντοχής σε διάβρωση.
- Βελτίωση ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του.
- Αύξηση της αντοχής στη μηχανική φθορά.
- Αποφυγή του φαινομένου της γήρανσης.

Βασικό κομμάτι της κατανόησης των χάλυβων αποτελεί η σύνδεση και η αμφίδρομη σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, η σκληρότητα είναι μία ιδιότητα αντιστρόφως ανάλογη της ολκιμότητας και της κατεργασιμότητας. Ακόμη, η αντοχή είναι εξαρτώμενη από την σκληρότητα αλλά και από την ολκιμότητα. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι οι ιδιότητες των χάλυβων λειτουργούν συνολικά προκειμένου να χαρακτηρίσουν την συμπεριφορά τους. Η προσπάθεια για βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων ενός χάλυβα, μέσω κραμάτωσης, θα επηρεάσει και τις υπόλοιπες ιδιότητες του. Για παράδειγμα, η ολκιμότητα που αποκτά ένας χάλυβας με μείωση του ποσοστού άνθρακα θα προξалаί την μείωση της αντοχής του. Αντιστρόφως, η αύξηση της

περιεκτικότητας σε άνθρακα ενός χάλυβα προκαλεί αύξηση της σκληρότητας, αρά και της αντοχής του αλλά και αύξηση της ευθραυστότητάς του.

Η κάθε εφαρμογή απαιτεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά από έναν χάλυβα και επιτρέπει συγκεκριμένα μειονεκτήματα σε αυτόν. Για παράδειγμα, η επιλογή ενός εργαλειοχάλυβα για ένα κοπτικό καλούπι, υποδεικνύει την ανάγκη της εφαρμογής για σκληρότητα προκειμένου η κοπτική ακμή να διατηρεί την αιχμηρότητά της και το καλούπι να είναι χρηστικό. Παράλληλα, ένα άλλο πολύ σημαντικό κριτήριο για την επιλογή ενός χάλυβα σε μία εφαρμογή είναι η θερμοκρασία στην οποία θα λειτουργεί (εν ψυχρώ, εν θερμώ). Το συγκεκριμένο κριτήριο είναι καθοριστικό ακόμη και για την θερμική κατεργασία που θα εφαρμοστεί στον κατάλληλο εργαλειοχάλυβα.

2.2 Γενική ταξινόμηση χαλύβων

Εξ αιτίας του πρωτεύοντα ρόλου που διαδραματίζει, στη φύση του υλικού, η χημική του σύσταση, μία βασική κατηγοριοποίηση των χαλύβων τους διαχωρίζει στους:

- ❖ Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες (plain carbon steels), όπου περιέχουν έως 1% Μαγγάνιο (Mn) και ελάχιστα, ελεγχόμενα, ποσοστά προσμείξεων θείου (S) και φωσφόρου (P), έως 0,05%. Πρόκειται για ιδιαίτερα χαμηλής σκληρότητας χάλυβες, με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (C), οι οποίοι όμως παρουσιάζουν αυξημένη συγκολλησιμότητα.
- ❖ Κραματωμένους χάλυβες (alloy steels). Ανάλογα με το ποσοστό κραμάτωσής τους χωρίζονται στους:
 - Ελαφρά κραματωμένους χάλυβες, όπου περιέχουν προσμείξεις έως 2%. Σε αυτό το είδος χαλύβων ανήκουν οι δομικοί και οι κατασκευαστικοί χάλυβες.
 - Μέτρια κραματωμένους χάλυβες, οι οποίοι περιέχουν προσμείξεις από 2% έως 10%.
 - Ισχυρά κραματωμένους χάλυβες στους οποίους περιέχονται προσμείξεις πάνω από 10%. Τέτοιοι είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρανσης (Maraging) με μεγάλα ποσοστά Βολφραμίου (W), Βαναδίου (V), Μολυβδαίνιου (Mo), Χρωμίου (Cr), Νικελίου (Ni) και Κοβάλτιου (Co)[2].

Με γνώμονα την χρήση και τις εφαρμογές τους οι χάλυβες μπορεί να διακριθούν σε:

- Χάλυβες κατασκευών. Πρόκειται για χάλυβες με χαμηλά ποσοστά κραματικών στοιχείων συνήθως μαγγανίου (Mn) και χρωμίου (Cr) και χρησιμοποιούνται σε πλήθος κατασκευών όπως λέβητες, μεταλλικούς σκελετούς αλλά και σε στοιχεία μηχανών όπως άξονες, διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια και άλλα.
- Ανοξείδωτοι χάλυβες. Είναι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr>13%). Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση (πχ. στη χημική βιομηχανία). Κατασκευές από ανοξείδωτο χάλυβα αποτελούν σωλήνες, πτερωτές, δεξαμενές, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες και οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με διαβρωτικά υγρά. Τέλος, ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται επίσης σε ιατρικά εργαλεία όπως χειρουργικά νυστέρια αλλά και σε είδη οικιακής χρήσεως, όπως μαχαιροπήρουνα.
- Εργαλειοχάλυβες. Περιέχουν συνήθως μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων (W, Mo, Cr, V) τα οποία ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και την αντίσταση σε φθορά και τριβή. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής όπως κοπτικά τόννου, φρέζας και πλάνης.

Επίσης, συναντώνται στην κατασκευή εργαλείων διαμόρφωσης όπως μήτρες, έμβολα και καλούπια χύτευσης ή διαμόρφωσης.

- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών και μονίμων μαγνητών [2].

Μία άλλη βασική κατηγοριοποίηση των χαλύβων (κυρίως των κοινών ανθρακούχων) βασίζεται στην πρώιμη επεξεργασία τους προκειμένου να καταλήξουν στο τελικό προϊόν, όπου τους διαχωρίζει σε:

- Χάλυβες διαμόρφωσης, οι οποίοι μετά την χύτευση υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία όπως έλαση και διέλαση προκειμένου να καταλήξουν σε κουλούρες (coils) επιθυμητού πάχους .
- Χυτοχάλυβες, όπου παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων (ingots). Οι χάλυβες αυτοί σε επόμενο στάδιο επαναχυτεύονται και κατεργάζονται μηχανικά για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων [3].

2.2.1 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες καλούνται τα κράματα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C), τα οποία , εκτός από τις συνήθεις ακαθαρσίες (έως 0,04% φώσφορο (P) και 0,05% θείο (S)) και ελεγχόμενα ποσοστά προσμίξεων (μικρά ποσοστά σε μαγγάνιο (Mn) και πυρίτιο (Si)), δεν περιέχουν άλλα στοιχεία κραμάτωσης. Ανάλογα με το ποσοστό του περιεχόμενου άνθρακα οι κοινοί, ανθρακούχοι χάλυβες διακρίνονται σε:

- ❖ Υποευτηκτοειδείς χάλυβες, με ποσοστό άνθρακα μικρότερο από 0,80% κ.β. Οι χάλυβες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία χωρίζονται στα 3 ακόλουθα είδη ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα.
 - Χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης σε άνθρακα με ποσοστά χαμηλότερα του 0,30% (mild carbon steels).
 - Χάλυβες μέσης κραμάτωσης με ποσοστά 0,30% <C <0,60% (medium carbon steels).
 - Χάλυβες υψηλής κραμάτωσης με ποσοστά 0,60% <C <0,8% (high carbon steels).
- ❖ Ευτηκτοειδείς, που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0,80% κατά βάρος.
- ❖ Υπερευτηκτοειδείς χάλυβες, με ποσοστό άνθρακα από 0,80% μέχρι 2,00% κ.β. Οι χάλυβες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία χωρίζονται στα 2 ακόλουθα είδη ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα. Και σε άλλα στοιχεία.
 - Χάλυβες υψηλής κραμάτωσης με ποσοστά 0,80% <C <1,00% (high carbon steels).
 - Χάλυβες πολύ υψηλής κραμάτωσης με ποσοστά 1,00% <C <2,14 (ultra-high carbon steels).
- ❖ Χυτοσίδηροι (μαντέμια) με ποσοστά κραμάτωσης 2,14% <C <6,67%. Ακόμη, διαχωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες με κριτήριο την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα (C), πυρίτιο (Si), μαγγάνιο (Mn), θείο (S) και φώσφορο (P).
 - Λευκοί, όπου λόγω της αντοχής τους σε τριβή χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μύλων ή τμήματα θραυστήρων
 - Φαιοί ή Γκρίζοι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε κατασκευές εδράνων εργαλειομηχανών λόγω της ιδιαίτερης ικανότητας απόσβεσης δονήσεων και της καλής θερμικής αγωγιμότητας.

- Μαλακτοί, όπου χρησιμοποιούνται σε κατασκευές ακτίνων τροχών και σκελετών μοτοσυκλέτας λόγω της καλής αντοχής σε θραύση και διάβρωση.
- Ελατοί ή χυτοσίδηροι σφαιροειδούς γραφίτη, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην κατασκευή γραναζιών και διακοπών λόγω της αντοχής τους σε κρουστικά φορτία.
- Ισχυρά κραματωμένοι. Οι οποίοι κατασκευάζονται για ιδιαίτερες εφαρμογές.

2.2.2 Ήπιοι και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες (mild and low carbon steels)

Οι ήπιοι χάλυβες είναι ιδιαίτερα όλκιμοι και εύπλαστοι λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Χαρακτηριστικά, περιέχουν 0,3%-0,6% άνθρακα γεγονός που συνεπάγεται σχετικά χαμηλή σκληρότητα μικρή αντοχή. Παρά ταύτα, δίνεται η δυνατότητα ενανθράκωσης ή και ψυχρής διαμόρφωσης με σκοπό την αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας. Πρόκειται για φθηνούς χάλυβες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες ποσότητες. Μία κοινή εφαρμογή τους είναι στην δόμηση. Η πυκνότητά του υλικού αυτού είναι $7,85\text{g/cm}^3$ και η αντοχή του είναι στα 500MPa.

Οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες ή μικροκραματωμένοι συνήθως περιέχουν άνθρακα 0,05% έως 3%, μαγγάνιο, έως 1,5% και νιόβιο (Nb), βανάδιο (V) ή τιτάνιο (Ti) έως 0,1%. Το όριο διαρροής τους κυμαίνεται μεταξύ 400 και 650 MPa, ενώ η αντοχή τους σε εφελκυσμό μεταξύ 500 και 850 MPa. Εξαιρετικού ενδιαφέροντος είναι το γεγονός ότι η επιμήκυνση τους μέχρι την θραύση είναι της τάξης του 14% με 27%. Η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά είναι χαμηλή, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων, ενώ η ικανότητα μορφοποίησής τους είναι εν ψυχρώ είναι μικρή.

Παρότι, οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες από τους κοινούς, η χρήση τους περιορίζεται λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής τους. Συνήθως, χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία και την κατασκευή τμημάτων για τα οποία απαιτούνται υψηλή αντοχή και δυσθραυστότητα (κιβώτια ταχυτήτων, φρένα, άξονες και άλλα).

2.2.3 Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες (Medium Carbon Steels)

Η κατηγορία αυτή, έχει πολλές ομοιότητες με την κατηγορία των ελαφρά κραματωμένων χαλύβων. Η διαφοροποίηση τους έγκειται στο γεγονός ότι τα επίπεδα του άνθρακα κυμαίνονται μεταξύ 0,3% και 0,6% κατά βάρος, ενώ η περιεκτικότητα σε μαγγάνιο κυμαίνεται μεταξύ 0,6% και 1,65% κατά βάρος. Η μικρή αυτή αύξηση στις περιεκτικότητες άνθρακα και μαγγανίου, είναι αρκετή ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη και ευκολότερη βαφή. Έτσι, η επιβελτίωση του χάλυβα είναι πιο ποιοτική, αφού στην κατηγορία αυτή παρουσιάζεται πολύ καλή σχέση αντοχής - ολκιμότητας. Οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι χάλυβες αυτοί είναι όμοιες με τους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται στην κατασκευή κιβωτίων ταχυτήτων και στροφαλοφόρων αξόνων [15].

2.2.4 Υψηλά κραματωμένοι χάλυβες (High Carbon Steels)

Οι υψηλά κραματωμένοι χάλυβες, περιέχουν ποσοστό άνθρακα μεταξύ 0,6% και 1%, ενώ μαγγάνιο μεταξύ 0,3% και 0,9%. Παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή από τις προηγούμενες κατηγορίες και εξ αιτίας αυτού χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εργαλείων.

2.2.5 Πολύ υψηλά κραματωμένοι χάλυβες (Ultra High Carbon Steels)

Οι χάλυβες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία εμπεριέχουν άνθρακα 1,00% με 2,00%. Οι πολύ υψηλά κραματωμένοι χάλυβες επιδέχονται βελτίωσης για αύξηση σκληρότητας όπως και οι προηγούμενες κατηγορίες. Η κατηγορία αυτή βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην κονιομεταλλουργία. Οι χάλυβες που περιέχουν μεγάλα ποσοστά άνθρακα παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή και αντίσταση σε φθορά και κρούση. Η εφαρμογή που βρίσκουν είναι ύστερα από εν ψυχρώ κατεργασία και χρησιμοποιούνται για την εν ψυχρώ διαμόρφωση μετάλλικών υλικών.

Γενικότερα, τα κραματοποιητικά στοιχεία που εισχωρούν στην μικροδομή ενός χάλυβα και ο συνδυασμός τους είναι αυτά που του προσδίδουν τις νέες βελτιωμένες ιδιότητες και χαρακτηριστικά, τα οποία επιζητούνται ανάλογα την εφαρμογή. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί πως η προσθήκη μαγγανίου (Mn) στους χάλυβες προσδίδει αυξημένη αντοχή (χάλυβες Hadfield) αλλά και κατεργασιμότητα σε κοπή (χάλυβες ελευθέρας κοπής).

Χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην κατασκευή αξόνων και ατράκτων. Η προσθήκη χρωμίου (Cr) στους χάλυβες προσδίδει αυξημένη εμβαπτότητα, αντοχή σε επαναφορά αλλά και αντιδιαβρωτική προστασία. Αυτής της κατηγορίας οι χάλυβες χρησιμοποιούνται σε αεροναυπηγικές κατασκευές αλλά και σε δεξαμενές υψηλής πίεσης. Η πρόσμιξη με μολυβδαίνιο (Mo) προσδίδει αύξηση της εμβαπτότητας, αντοχή σε φθορά και τριβή αλλά και αυξημένη σκληρότητα. Οι χάλυβες αυτοί εξ αιτίας της αντοχής τους βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή ατράκτων και συστημάτων τροχοπέδησης. Ακόμη, η προσθήκη πυριτίου (Si) προσδίδει στους χάλυβες μικρή αύξηση της εμβαπτότητας, προστασία από διάβρωση, ενώ εξαπλώνει την χρήση χαλύβων και σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές. Η προσθήκη βαναδίου (V), προσδίδει ιδιαίτερα μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας και τις σκληρότητας. Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη αντοχή σε φθορά και τριβή. Η προσθήκη κοβαλτίου (Co) προσδίδει μείωση της εμβαπτότητας αλλά προκαλεί σκλήρυνση με τον σχηματισμό μεσομεταλλικών ενώσεων σε ειδικές κατηγορίες χαλύβων (χάλυβες Maraging). Επίσης, με την προσθήκη βολφραμίου (W) επιτυγχάνεται αύξηση της εμβαπτότητας, της σκληρότητας, της αντοχής σε επαναφορά, φθορά και τριβή. Με προσμίξεις νικελίου (Ni) παρατηρείται αύξηση της εμβαπτοτητας, της αντοχής και της αντιδιαβρωτικής προστασίας. Ακόμη, με την προσθήκη νιόβιου (Nb) αυξάνεται η σκληρότητα με επιρροή στο μέγεθος του κόκκου, ενώ αποτελεί κύριο κραμματικό στοιχείο των μικροκραματομένων χαλύβων (micro alloyed steels).

2.2.6 Ανοξειδωτοι χάλυβες (Stainless steels)

Το κύριο στοιχείο προσθήκης των ανοξειδωτων χαλύβων είναι το χρώμιο (σε ποσοστά μεγαλύτερα του 12%), στην ύπαρξη του οποίου οφείλεται η υψηλή αντοχή σε διάβρωση, που παρουσιάζουν. Το χρώμιο σχηματίζει επιφανειακό στρώμα οξειδίου, το οποίο προστατεύει την επιφάνεια του χάλυβα (παθητικοποίηση επιφανείας). Συνήθως, εντός της δομής περιέχονται και μικρά ποσοστά ακαθαρσιών. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται θείο μέχρι 0,03%, φώσφορος έως 0,04% και πυρίτιο έως 1%. Το χρώμιο είναι κραμματικό στοιχείο που συντελεί στην διεύρυνση της φερριτικής περιοχής στο διάγραμμα φάσεων Fe-C-Cr. Ως εκ τούτου, ο μετασχηματισμός φερρίτη σε ωστενίτη εξαρτάται από το ποσοστό του χρωμίου στην δομή του χάλυβα. Ανάλογα με την μικροδομή και τις μηχανικές τους ιδιότητες οι ανοξειδωτοι χάλυβες χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ανοξείδωτοι μαρτενσιτικοί χάλυβες, οι οποίοι επιδέχονται ωστενιτοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες και αποκτούν μαρτενσιτική δομή. Οι χάλυβες αυτοί περιέχουν ποσοστό χρωμίου μικρότερο του 17% και άνθρακα έως 0,5%.
- Ανοξείδωτοι φερριτικοί, οι οποίοι δεν επιδέχονται μαρτενσιτική βαφή. Περιέχουν ποσοστό άνθρακα μικρότερο του 0,08% και χρώμιο από 12% έως 30%.
- Ανοξείδωτοι ωστενιτικοί, οι οποίοι περιέχουν χρώμιο και νικέλιο. Οι χάλυβες αυτοί παρουσιάζουν την κυβική εδροκεντρομένη δομή του ωστενίτη, ακόμη και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες αυτής του περιβάλλοντος.
- Ανοξείδωτοι ωστενιτοφερριτικοί χάλυβες, όπου ανήκουν στην προηγούμενη κατηγορία με τη διαφορά ότι αυξάνεται το ποσοστό του χρωμίου και μειώνεται το ποσοστό του νικελίου, με αποτέλεσμα την μικτή δομή τους.
- Ανοξείδωτοι χάλυβες με σκλήρυνση λόγω κατακρύμνησης, όπου πρόκειται για χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (περίπου 1%), χρώμιο περίπου 17%, νικέλιο 8% και αλουμίνιο 1%.

2.2.7 Χάλυβες κατασκευής εργαλείων

Η εργαλειοχάλυβες αποτελούν μία σπουδαία ομάδα και καλούνται να παρουσιάζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Η καταλληλότητα των εργαλειοχαλύβων έρχεται από την διακριτική τους ικανότητα να διατηρούν την σκληρότητα τους, την αντίσταση στην φθορά, την δυνατότητα να διατηρούν τις ακμές κοπής, ή ακόμα και την αντίσταση τους στην παραμόρφωση στις υψηλές θερμοκρασίες. Οι περισσότεροι εργαλειοχάλυβες κατασκευάζονται, με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,7%÷1,4% κατά βάρος και σε ελεγχόμενες συνθήκες παραγωγής για να προκύψει η επιθυμητή ποιότητα. Περιέχουν και μια ελεγχόμενη ποσότητα μαγγανίου, το οποίο αυξάνει την ευκολία σκλήρυνσης τους κατά την βαφή σε νερό. Σε γενικές γραμμές ο σκοπός για τον οποίο πραγματοποιείται μία θερμική κατεργασία στους εργαλειοχάλυβες, είναι η δημιουργία μίας ομοιογενούς δομής η οποία αποτελείται από ένα πλήρως σκληρυσμένο και επαναφερμένο κρυσταλλικό πλέγμα, όπου για τους περισσότερους τύπους εργαλειοχάλυβα αποτελείται από πρωτογενή αλλά και δευτερογενή καρβίδια. Η μορφή του σχηματιζόμενου μαρτενσίτη μπορεί να είναι είτε πλακοειδής είτε βελονοειδής, και εξαρτάται από το αν η εφαρμογή απαιτεί υψηλή σκληρότητα ή αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής.

Εργαλειοχάλυβες χωρίς θερμική κατεργασία (As delivered)

Οι χάλυβες αυτοί έχουν απαραίτητα υποστεί πλήρη ανόπτηση, εκτός αν υπάρχει διαφορετική καθοδήγηση από τον αγοραστή. Η δομή τους έχει σφαιροειδή μορφή, με το κυβικό χωροκεντρομένο φερριτικό πλέγμα να περιέχει σφαιρικά καρβίδια. Αποφεύγεται η χρήση αυτών των χαλύβων στην κατασκευή εργαλείων αμέσως μετά την μηχανουργική κατεργασία λόγω χαμηλής σκληρότητας και απαιτείται κάποια θερμική κατεργασία για βελτίωση των ιδιοτήτων τους.

Θερμικές κατεργασίες

Θερμική κατεργασία είναι σύνολο διεργασιών που περιλαμβάνει τη θέρμανση και ψύξη μεταλλικού προϊόντος σε στερεά κατάσταση και σε καθορισμένες θερμοκρασιακές και χρονικές συνθήκες. Σκοπός μιας θερμικής κατεργασίας είναι η πρόσδοση στο μεταλλικό υλικό δομικής και εντατικής κατάστασης τέτοιας, που να οδηγεί στην εξασφάλιση συγκεκριμένων αναγκών και

επιθυμητών ιδιοτήτων σ' αυτό. Οι θερμικές κατεργασίες των μεταλλικών υλικών διακρίνονται σε δυο μεγάλες ομάδες: ανοπτήσεις και βαφές.

Βαφή

Απλή βαφή είναι η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, που περιλαμβάνει ένα στάδιο θέρμανσης και παραμονής του χάλυβα (ωστενιτοποίηση) και ένα ακόλουθο στάδιο απότομης ψύξεως, με εμβάπτιση του χάλυβα σε κάποιο μέσο ψύξεως (αλατόνερο, νερό, λάδι, αέρας). Στόχος της βαφής είναι η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα (σκληρότητα, αντοχή), που απαιτούνται για τη λειτουργία του (π.χ. εργαλεία κοπής, καλούπια διαμόρφωσης, κ.λπ.).

Ωστενιτοποίηση (Austenitization)

Η επιλογή της θερμοκρασίας και του χρόνου ωστενιτοποίησης, είναι χαρακτηριστικά μεγέθη που καθορίζουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του σκληρυσμένου υλικού. Ζητούμενο αποτελεί ο ομογενής ωστενίτης, που μπορεί να δημιουργηθεί με όσο το δυνατόν υψηλότερες θερμοκρασίες (στην ωστενιτική περιοχή για να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός της διάχυσης) σε ένα σχετικά μεγάλο χρόνο παραμονής. Ειδικά διαγράμματα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Ωστενίτη (TTT) χρησιμοποιούνται για την εκλογή των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών, ενώ παράλληλα απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην μικροδομή από την οποία θα προκύψει. Σε μία επαρκώς υψηλή θερμοκρασία κάποια καρβίδια διαλύονται και ως εκ τούτου, η ποσότητα των διαλυμένων κραματικών στοιχείων και του άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα βελτιώνει την δομή. Παρόλα αυτά, τόσο ο άνθρακας όσο και τα κραματικά στοιχεία σε στερεή κατάσταση στον ωστενίτη (εκτός του αλουμινίου και του κοβαλτίου), χαμηλώνουν τις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s και M_f) και ως εκ τούτου γίνεται πιο δύσκολο να δημιουργηθεί, πλήρης μαρτενσιτική δομή κατά την ψύξη. Συχνά βελτιώνεται και η σκληρότητα μετά από την παραπάνω διαδικασία. Παρά ταύτα, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για την αποφυγή της αύξησης του μεγέθους των κόκκων που θα προκαλέσει το αντίθετο φαινόμενο.

Ψύξη (Quenching)

Η βαφή πραγματοποιείται προκειμένου να μετατραπεί ο υπάρχων ωστενίτης σε μαρτενσίτη. Ο ρυθμός απόψυξης πρέπει να είναι αρκετά υψηλός ώστε να γίνει ο μετασχηματισμός με σταθερή σύνθεση, δηλαδή χωρίς να γίνει διάχυση του άνθρακα και των κραματικών στοιχείων. Από την άλλη, ο ρυθμός αυτός πρέπει να είναι αρκετά χαμηλός έτσι ώστε να αποφευχθούν διαστασιακές μεταβολές, δημιουργία εσωτερικών τάσεων και σπασίματα λόγω του θερμικού σοκ.

Επαναφορά (Tempering)

Ο μαρτενσίτης που δημιουργήθηκε από την βαφή είναι πολύ εύθραυστος για να χρησιμοποιηθεί ως έχει και η κρυσταλλική δομή είναι εκτός ισορροπίας. Η διαδικασία κατά την οποία αλλάζει η μαρτενσιτική δομή (bct) με σκοπό την απαλλαγή από παραμένουσες τάσεις και την μετατροπή του παραμένοντα ωστενίτη (αν υπάρχει) σε φερρίτη και καρβίδια καλείται επαναφορά. Προκειμένου η επαναφορά να προκαλέσει τα επιθυμητά αποτελέσματα κατά περίπτωση ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στον υπολογισμό του χρόνου και της θερμοκρασίας. Υψηλά κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες (ταχυχάλυβες και χάλυβες λειτουργίας εν θερμώ) συχνά απαιτούν θερμοκρασίες 500 - 600°C και χρόνο παραμονής 1-3 ώρες, έτσι ώστε τα καρβίδια των κραματικών στοιχείων να

μπορούν να σχηματίζονται εντός της δομής η οποία αναδημιουργείται. Οι πιο χαμηλά κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες (χάλυβες που βάζονται στο νερό), απαιτούν πιο χαμηλές θερμοκρασίες για να αποφευχθεί μείωση της σκληρότητας. Οι εργαλειοχάλυβες εκτός των χαμηλής κραμάτωσης υπόκεινται και σε δευτερογενή σκλήρυνση, όπου αποδίδεται στην κατακρήμνιση των δευτερογενών καρβιδίων στην υπάρχουσα δομή[14].

Θερμικές κατεργασίες σε υπομηδενικές θερμοκρασίες (Cold-Cryogenic Treatment)

Η θερμική κατεργασία αυτή, αποτελεί μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες μεθόδους προκειμένου να ενισχυθούν οι ιδιότητες και η συνολική απόδοση των υλικών. Η ιδέα της θερμικής κατεργασίας σε υπομηδενικές θερμοκρασίες δεν είναι καινούργια, αλλά αν χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες διαδικασίες μπορεί να αποδώσει τεράστια οικονομικά οφέλη. Οι κατεργασίες αυτές είναι στην ουσία μία επέκταση των κοινών θερμικών κατεργασιών και όχι συμπληρωματικές αυτών. Πρόκειται για θερμικές κατεργασίες που πραγματοποιούνται μία φορά και επηρεάζουν το σύνολο της δομής του προς κατεργασία αντικειμένου. Γενικά οι θερμικές κατεργασίες αυτές χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- SCT (Shallow Cryogenic Treatment)
- DCT (Deep Cryogenic Treatment)

Μία πλήρης θερμική κατεργασία χαλύβων που επιδέχονται κρυογενούς βαφής, θα αποτελούταν από τη Βαφή, την Κρυογονική θερμική κατεργασία και τέλος την Απόταση. Πολλοί συγγραφείς έχουν αποδώσει την επίδραση της κρυογενούς θερμικής κατεργασίας στην ενεργοποίηση των μετασχηματισμών του παρθένου μαρτενσίτη λόγω του υπερκορεσμού που επιτυγχάνεται στους -196°C . Εξαιτίας αυτού, η κατακρήμνιση του καρβιδίου πραγματοποιείται με πολύ υψηλότερα επίπεδα ενέργειας, οδηγώντας έτσι σε πολύ καλύτερες ποιοτικά δομές που χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι με την κρυογονική βαφή μπορεί να επιτευχθεί έως και 10% επιπλέον διάρκεια ζωής σε χαλύβδινα δοκίμια. Τα καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν όταν πραγματοποιηθεί κρυογονική θερμική κατεργασία αμέσως μετά την βαφή. Ειδικά στις περιπτώσεις που θα ακολουθήσει μία ήπια και κλιμακωτή απόταση τα αποτελέσματα στις ιδιότητες του χάλυβα είναι εντυπωσιακά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην σταθεροποίηση του παραμένουτος ωστενίτη άρα και στην αποτροπή του μετασχηματισμού του. Ακόμη, σε ορισμένους χάλυβες η κρυογενής βαφή μπορεί να αυξήσει την αντοχή σε κρούση έως και 60% και την αντοχή σε εφελκυσμό έως και 11%.

Η κρυογονική θερμική κατεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες κάτω των -150°C . Διάφορα αέρια όπως το ήλιο(He), το Άζωτο(N), το Οξυγόνο(O), το Υδρογόνο(H) και το Νέο(Ne) μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις εφαρμογές αυτές. Σε υπομηδενικές θερμοκρασίες το σημείο βρασμού των παραπάνω αερίων βρίσκεται κάτω από τους -180°C . Τα αέρια χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές στην βιομηχανία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η αεροδιαστημική και η ηλεκτρονική. Ακόμη, τα αέρια αυτά βρίσκουν εφαρμογή στην επεξεργασία τροφίμων αλλά και στην ιατρική. Το υγρό άζωτο το οποίο χρησιμοποιείται ευρύτατα στις κρυογενείς βαφές, έχει σημείο τήξης -210°C και σημείο βρασμού -195°C . Πρόκειται για ένα αέριο που υπάρχει σε αφθονία στον πλανήτη, αφού συνθέτει το 78% κατ' όγκο της ατμόσφαιρας. Είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο και μη τοξικό.

Η κρυογονική θερμική κατεργασία είναι μία ξηρή κατεργασία. Συγκεκριμένα το υγρό άζωτο αφήνεται να εισέλθει στο θάλαμο που θα πραγματοποιηθεί η διαδικασία και έχουν τοποθετηθεί τα δοκίμια προς βαφή. Η πρώτη μείωση της θερμοκρασίας μέχρι τους -80°C πραγματοποιείται ηλεκτρικά για λόγους οικονομίας. Στη συνέχεια το υγρό άζωτο μετατρέπεται σε αέριο και εισέρχεται στον θάλαμο. Η μετατροπή σε αέριο πραγματοποιείται προκειμένου να αποφευχθούν βίαιες εναλλαγές θερμοκρασίας και πιθανές ρηγματώσεις. Γενικά, προτείνονται δύο κύκλοι κρυογονικής ψύξης με σκοπό την πλήρη κατακρήμνιση των καρβιδίων του μαρτενσίτη στην τελική δομή. Η διαδικασία αυτή βελτιώνει και σταθεροποιεί την δομή του κρυσταλλικού πλέγματος και κατανέμει ομοιόμορφα τα σωματίδια άνθρακα δημιουργώντας έτσι ένα πιο ανθεκτικό υλικό. Η δομή του χάλυβα ύστερα από μια τέτοια θερμική κατεργασία αλλάζει και το κρυσταλλικό του πλέγμα από κυβικό χωροκεντρομένο μετατρέπεται σε κυβικό εδροκεντρομένο, γεγονός που οδηγεί σε μία πολύ πιο ανθεκτική και ισχυρή δομή.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης θερμικής κατεργασίας σε σύγκριση με τις πιο συμβατικές μεθόδους είναι πολλά. Συγκεκριμένα, μετά από κρυογενή βαφή, η δομή των κόκκων είναι σχεδόν ιδανική. Ο ωστενίτης έχει μετατραπεί πλήρως σε μαρτενσίτη ενώ τα καρβίδια δημιουργούν μία ομογενή μικροδομή. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι η αύξηση της σκληρότητας και η αντοχή στην φθορά. Ακόμη έχει παρατηρηθεί πως σε τέτοιες δομές υπάρχουν καρβίδια που οι διαστάσεις τους δεν ξεπερνούν το $1\ \mu\text{m}$. Η ύπαρξη τέτοιων καρβιδίων εξυπηρετεί στην συμπλήρωση των μικροκενών και την τελική αύξηση της πυκνότητας του υλικού. Εξ αιτίας των παραπάνω παρατηρείται ακόμη εξομάλυνση των εσωτερικών τάσεων αλλά και αύξηση του τελικού χρόνου ζωής. Επίσης έχει παρατηρηθεί αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, γεγονός που επιτρέπει την χρήση χαλύβων που έχουν υποστεί κρυογενή βαφή στην κατασκευή κοπτικών εργαλείων. Έχει ακόμα αποδειχθεί πως με την βαθιά κρυογονική θερμική κατεργασία (DCT) οι παραμένουσες τάσεις στο υλικό εξαφανίζονται σχεδόν ολοκληρωτικά εξ αιτίας της πιο σωστής και πλήρους μετατροπής του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Αποτέλεσμα αυτού είναι και η αύξηση της σκληρότητας άρα και της αντοχής στη φθορά [16].

Ανόπτηση (Annealing)

Υπάρχουν δύο είδη ανοπτήσεων που μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών των χαλύβων:

- Πλήρης Ανόπτηση
- Αποτακτική Ανόπτηση

Η πλήρης ανόπτηση είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να επαναφέρει τους χάλυβες στην πιο μαλακή κατάσταση που θα μπορούσαν να έρθουν, προκειμένου να κατεργαστούν μηχανουργικά έπειτα από την σφυρηλάτηση ή και την ολική βαφή. Για τους πιο πολλούς εργαλειοχάλυβες η θερμοκρασία της ανόπτησης είναι ελαφρώς πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία (critical temperature). Γενικότερα, για να μαλακώσει το ατσάλι χρειάζεται να δημιουργηθεί μία σφαιροειδής μορφολογία δομής. Αυτή η δομή είναι πιο εύκολο να δημιουργηθεί σε μη ομογενή ωστενιτικά περιβάλλοντα παρά σε αντίστοιχα ομοιογενή. Ο χρόνος παραμονής είναι μεγάλος ενώ και ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι σχετικά αργός. Είναι πολύ σημαντικό, το ατσάλι που υπόκειται σε ανόπτηση να μην έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος θα

μπορούσε να επηρεάσει την δημιουργούμενη δομή σε κάποιους χάλυβες. Ο χρόνος παραμονής είναι συνήθως από 1 έως 4 ώρες και αυξάνεται ανάλογα με τις προσμίξεις του ατσαλιού [15].

Κατηγοριοποίηση των εργαλειοχαλύβων

Οι εργαλειοχάλυβες κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τουλάχιστον τέσσερα διαφορετικά συστήματα. Τα συστήματα αυτά, εξαρτώνται από διαφορετικές μεταβλητές, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω:

- Σύσταση
- Σκληρότητα
- Ιδιότητες
- Εφαρμογή

Η κατηγοριοποίηση των εργαλειοχαλύβων βάσει σύστασης, ενέχει τρεις ακόμη υποκατηγορίες στις οποίες εντάσσονται:

- Υπερευθηκτοειδείς (συντά αναφέρονται και ως λεδεμβουρητικοί) και ευθηκτοειδείς χάλυβες με σκληρότητα 60-65 HRC ή και μεγαλύτερη.
- Λεδεμβουρητικοί χάλυβες με σκληρότητα 45-55 HRC
- Υψηλής κραμάτωσης και χαμηλού άνθρακα χάλυβες με σκληρότητα 40-60 HRC.

Παρόλα αυτά, επειδή οι ιδιότητες εργαλειοχαλύβων από διαφορετικές κατηγορίες μπορεί να είναι παρόμοιες, η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση βρίσκει εφαρμογή μόνο σε ακαδημαϊκό επίπεδο. Η κατηγοριοποίηση βάσει της σκληρότητας δεν μπορεί να είναι επαρκής για επιλογή εργαλειοχαλύβων σε ειδικές εφαρμογές. Σύμφωνα με το σύστημα κατηγοριοποίησης που ανέπτυξε το αμερικανικό ινστιτούτο σιδήρου και χάλυβα (AISI), οι εργαλειοχάλυβες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επτά κατηγορίες με κριτήρια κάποια πιο προφανή χαρακτηριστικά τους, όπως τα κραματικά τους στοιχεία, τη θερμική κατεργασία που υποβλήθηκαν και τις εφαρμογές τους. Οι κατηγορίες είναι οι εξής:

- Χάλυβες που επιδέχονται βαφή σε νερό
- Χαμηλής κραμάτωσης χάλυβες για ειδικές εφαρμογές
- Χάλυβες καλουπιών
- Χάλυβες ανθεκτικοί σε κρουστικά φορτία (shock-resistant steels)
- Χάλυβες για εν θερμώ λειτουργία
- Χάλυβες για εν ψυχρώ λειτουργία
- Ταχυχάλυβες

Χάλυβες που επιδέχονται βαφή σε νερό

Οι χάλυβες αυτοί χαρακτηρίζονται και ως χάλυβες κατηγορίας W. Αποτελούνται ουσιαστικά από εργαλειοχάλυβες σχετικά χαμηλού άνθρακα και χαμηλής κραμάτωσης. Το κύριο κραματικό στοιχείο είναι ο άνθρακας όμως συχνά προστίθεται χρώμιο και βανάδιο προκειμένου να βελτιωθεί η δομή του κόκκου, να αυξηθεί η αντίσταση στην φθορά και να βελτιωθεί ελαφρώς η ικανότητα του χάλυβα για σκλήρυνση(Οι χάλυβες της W κατηγορίας σκληραίνονται μόνο μερικά χιλιοστά

κάτω από την επιφάνειά τους). Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με περιορισμένα δυναμικά φορτία και σε χαμηλές ταχύτητες όπως σε εργαλεία τόνου και σε εργαλεία χάραξης. Τέλος χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην ξυλουργική.

Χαμηλής κραμάτωσης χάλυβες για ειδικές εφαρμογές

Χαρακτηρίζονται ως χάλυβες κατηγορίας L. Τα κύρια κραματικά τους στοιχεία είναι το χρώμιο και το βανάδιο. Εκτός αυτών των στοιχείων περιέχουν 0,50-1,10% κ.β. άνθρακα και μικρές ποσότητες νικελίου και μολυβδαινίου. Η κατηγορία L2 αναφέρεται σε χάλυβες επιφανειακής σκλήρυνσης, οι οποίοι βάφονται σε λάδι και αποκτούν σκληρότητα περί τα 57 HRC σε βάθη περί των 13 mm. Η κατηγορία L6 αποτελείται από χάλυβες που βάφονται σε λάδι και αποκτούν επιφανειακή σκληρότητα περί τα 64 HRC, διατηρώντας σκληρότητες κάτω των 60 HRC στο εσωτερικό τους. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε τρυπάνια, κοπτικά καλούπια και εργαλεία μηχανών διάτρησης.

Χάλυβες καλουπιών

Οι χάλυβες καλουπιών ή αλλιώς οι εργαλειοχάλυβες της κατηγορίας P, περιέχουν χρώμιο και νικέλιο ως κύρια κραματικά στοιχεία ενώ περιέχουν πολύ χαμηλά ποσοστά άνθρακα (0,10-0,30% κ.β.). Οι υποκατηγορίες P4 και P6 μπορούν να πετύχουν υψηλές σκληρότητες με απόψυξη στον αέρα. Όπως προκύπτει και από το όνομά τους οι συγκεκριμένοι χάλυβες χρησιμοποιούνται ιδιαίτερος στην κατασκευή καλουπιών, όπου απαιτείται αντοχή σε υψηλή πίεση και αντίσταση στην διάβρωση (από το πλαστικό, το κεραμικό ή και το μέταλλο που διαμορφώνεται στο καλούπι). Οι χάλυβες αυτοί χαρακτηρίζονται από σκληρότητα σε επιφάνεια και καρδιά και παρουσιάζουν χαμηλή αντίσταση στην μαλακτοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες.

Χάλυβες ανθεκτικοί σε κρούση (shock-resistant steels)

Οι χάλυβες αυτοί χαρακτηρίζονται από το πρόθημα S. Τα κύρια κραματικά στοιχεία της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι ο άνθρακας, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το βολφράμιο, το χρώμιο και το μολυβδαίνιο. Ακόμη, στους εργαλειοχάλυβες αυτούς συχνά προστίθεται και βανάδιο. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι 0,50% κ.β., ενώ η σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο, που είναι χαρακτηριστική αυτής της κατηγορίας, ευθύνεται για την αυξημένη αντοχή σε κάποιες επαναφερόμενες μικροδομές. Η ικανότητα σκλήρυνσης καθώς και το βάθος της ποικίλλει ανάλογα με τον χάλυβα. Κάποιες υποκατηγορίες αποψύχονται σε νερό όπως η S2 ενώ άλλες όπως οι S1, S5 και S6 αποψύχονται σε λάδι. Οι εργαλειοχάλυβες της κατηγορίας S2 επιδέχονται επιφανειακής σκλήρυνσης ενώ οι χάλυβες της κατηγορίας S7 σκληραίνουν και εσωτερικά.

Γενικά η κατηγορία S αποτελείται από χάλυβες υψηλής αντοχής, που παρουσιάζουν αντίσταση στην φθορά και αξιοσημείωτα υψηλή σκληρότητα. Είναι ανθεκτικοί σε επαναλαμβανόμενα, υψηλά φορτία και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σφυρηλάτησης.

Χάλυβες για εν θερμό κατεργασία

Οι χάλυβες για λειτουργία εν θερμό παρουσιάζουν εξαιρετική θερμική αντίσταση ενάντια στην μαλακτοποίηση (softening), είτε κατά την διάρκεια μίας θερμικής κατεργασίας είτε κατά την γενικότερη λειτουργία τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Όλοι οι χάλυβες για λειτουργία εν θερμό

χαρακτηρίζονται από το πρόθημα H στην ονοματολογία του AISI. Ακόμη, οι χάλυβες αυτοί τυπικά περιέχουν σχετικά χαμηλό άνθρακα με ποσοστά 0,30%-0,40% κ.β. Η κατηγορία H των εργαλειοχαλύβων θα μπορούσε να χωριστεί σε τρεις υποκατηγορίες, με γνώμονα το κύριο κραματικό στοιχείο τους που προκαλεί την σταθερότητα της μικροδομής τους ακόμη και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (red hardness). Κάποιοι από τους υψηλά κραματωμένους εργαλειοχάλυβες της κατηγορίας αυτής μοιάζουν με ταχυχάλυβες που απλά χαρακτηρίζονται από χαμηλά ποσοστά άνθρακα όπως επίσης και χαμηλά ποσοστά κραμάτωσης. Οι υποκατηγορίες αναλύονται παρακάτω:

- Χρωμιούχοι χάλυβες εν θερμώ

Οι χάλυβες αυτοί περιγράφονται από τα πρότυπα H10-H19 σύμφωνα με το AISI, ενώ οι περιεκτικότητές τους σε χρώμιο κυμαίνονται μεταξύ 3%-5%. Τα υπόλοιπα βασικά κραματικά στοιχεία είναι ο άνθρακας, το βολφράμιο και σε κάποιες περιπτώσεις το βανάδιο. Η σχετικά χαμηλή κραματική περιεκτικότητα προάγει ιδιαίτερα την σκληρότητα. Χαρακτηριστική είναι η συνήθης σκληρότητα λειτουργίας των 40-55 HRC. Οι εργαλειοχάλυβες αυτοί έχουν σχετικά υψηλές θερμοκρασίες μετασχηματισμού (M_s, M_f) του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, ενώ μπορούν να βαφτούν με απόψυξη στον αέρα στις χαρακτηριστικές τους σκληρότητες εάν τα κομμάτια που βάφονται έχουν πάχος μικρότερο των 300 mm. Οι εργαλειοχάλυβες αυτοί αποτελούν τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους χάλυβες σε εφαρμογές σφυρηλάτησης και χύτευσης.

- Βολφραμιούχοι χάλυβες εν θερμώ

Οι εργαλειοχάλυβες αυτοί περιγράφονται από τα πρότυπα H21-H26, σύμφωνα με το AISI. Έχουν ποιοτικά και ποσοτικά, σχεδόν τα ίδια κραματικά στοιχεία με τους ταχυχάλυβες με μόνη διαφορά ότι περιέχουν λιγότερο άνθρακα. Σε σύγκριση με τους ταχυχάλυβες οι βολφραμιούχοι χάλυβες εν θερμώ παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά με υψηλότερες σκληρότητες. Στην πραγματικότητα, οι χάλυβες τύπου H26 αποτελούν μία άλλη εκδοχή, με χαμηλότερα ποσοστά άνθρακα των χαλύβων T15. Η σχετικά υψηλή κραμάτωση των χαλύβων αυτών προκαλεί αυξημένη θερμική σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και τους κάνει πιο επιρρεπείς στην ευθραυστότητα στις συνηθισμένες σκληρότητές τους των 40-55 HRC σε σχέση με τους χρωμιούχους χάλυβες εν θερμώ. Οι χάλυβες αυτοί βάφονται σε λάδι ή και σε μάνια άλατος για να αποφευχθεί η δημιουργία παραμενουσών τάσεων μα υπάρχει και η δυνατότητα απόψυξης στον αέρα. Εφαρμογές που χρησιμοποιούνται οι χάλυβες αυτοί είναι σε μήτρες εξώθησης για χαλκό και ορείχαλκο, όπως επίσης σε μηχανές διάτρησης.

- Μολυβδαινιούχοι χάλυβες εν θερμώ

Στην κατηγορία αυτή προς το παρόν ανήκουν μόνο οι χάλυβες των προτύπων H42 και H43. Τα κύρια κραματικά τους στοιχεία είναι ο άνθρακας, το μολυβδαίνιο το χρώμιο και το βανάδιο. Οι κατηγορίες M και T των ταχυχάλυβων (HSS) παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τους μολυβδαινιούχους και τους βολφραμιούχους χάλυβες εν θερμώ στις ίδιες τιμές W_{eq} . Σε σύγκριση με τους βολφραμιούχους εν θερμώ χάλυβες, το αρχικό κόστος είναι χαμηλό, αλλά το κόστος προφυλάξεων για την πραγματοποίηση των θερμικών κατεργασιών είναι μεγάλο. Εξ αιτίας αυτού οι βολφραμιούχοι εν θερμώ χάλυβες χρησιμοποιούνται ευρέως αντί αυτών.

Χάλυβες για εν ψυχρώ κατεργασία

Οι χάλυβες αυτοί δεν είναι σχεδιασμένοι για να αντιστέκονται στην μαλακτοποίηση (softening) σε αυξημένες θερμοκρασίες και ως εκ τούτου δεν χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες που ξεπερνούντα 200-260°C. Χωρίζονται σε τρεις ομάδες στις οποίες διαφέρουν τα κύρια κραματικά στοιχεία αλλά τα συνολικά ποσοστά κραμάτωσης είναι τόσο μικρά που δεν μπορούν να παραχθούν χάλυβες που παρουσιάζουν αντίσταση σε θερμικές μεταβολές. Ακόμη και για κομμάτια μεγάλων δ'ιαστάσεων οι χάλυβες αυτοί φημίζονται για την ιδιότητά τους να μην παραμορφώνονται κατά την απόψυξη και θεωρούνται κατάλληλοι για κατασκευές προϊόντων που απαιτείται διαστασιακή σταθερότητα μετά τη βαφή. Οι τρεις υποκατηγορίες είναι οι εξής:

- Οι εργαλειοχάλυβες της ομάδας A

Οι χάλυβες της ομάδας αυτής περιέχουν επαρκείς ποσότητες κραματικών στοιχείων για να πετύχουν πλήρη σκληρότητα με απόψυξη στον αέρα. Επιτυγχάνονται σκληρότητες 59-60 HRC σε κομμάτια 100-120 mm. Έχουν ιδιαίτερα υψηλό βαθμό διαστασιακής σταθερότητας κατά την βαφή και η κατανομή των καρβιδίων στη δομή τους είναι ουσιαστικά ομογενής. Τα κύρια κραματικά τους στοιχεία είναι ο άνθρακας, το μολυβδαίνιο, το χρώμιο και το μαγνήσιο και κάποιες φορές μάλιστα ανάλογα τις περιεκτικότητές τους οι χάλυβες αυτοί διακρίνονται σε μαγγανιούχους και χρωμιούχους. Η σύγκριση των δύο παραπάνω υποκατηγοριών δείχνει πως οι χρωμιούχοι χάλυβες έχουν αυξημένη αντίσταση κατά της μαλακτοποίησης (softening) σε αυξημένες θερμοκρασίες ενώ οι μαγγανιούχοι χάλυβες μπορούν να σκληρυνθούν σε θερμοκρασίες περί των 110 °C ή χαμηλότερες. Οι εργαλειοχάλυβες της ομάδας A χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εξαρτημάτων ακριβείας εξ αιτίας της εξαιρετικής διαστασιακής σταθερότητάς τους κατά την βαφή.

- Οι εργαλειοχάλυβες της ομάδας D

Τα κύρια κραματικά στοιχεία της ομάδας D είναι ο άνθρακας και το χρώμιο με ποσοστά 1,50-2,35% κ.β. και 12% κ.β. αντίστοιχα. Τα υψηλά ποσοστά χρωμίου προκαλούν σταθερότητα της μικροδομής σε υψηλές θερμοκρασίες, άρα και διατήρηση της σκληρότητας (red hardness). Χαρακτηριστικό γνώρισμα της δομής των χαλύβων αυτών με υψηλότερα ποσοστά άνθρακα είναι τα μεγάλα κλάσματα (fractions) άνθρακα που ευνοούν την αντίσταση κατά της φθοράς από τριβή. Η ομάδα αυτή συγκρινόμενη με την ομάδα A, αποτελείται από πιο λειτουργικά ευπαθείς χάλυβες στην παραμόρφωση και στην ευθραυστότητα, ενώ μεγάλη πιθανότητα σπασιμάτων και παραμορφώσεων υπάρχει και κατά την βαφή. Χρησιμοποιούνται ευρέως ως μήτρες ποιοτικών κοπτικών καλουπιών (blanking) και καλουπιών διαμόρφωσης και βαθιάς κοίλανσης (forming, deep drawing).

- Οι εργαλειοχάλυβες της ομάδας O

Οι χάλυβες της ομάδας O είναι κυρίως χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα με μια σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία. Συνεπώς η ικανότητα τους για σκλήρυνση (hardenability) είναι χειρότερη από τους χάλυβες της ομάδας A. Γενικά, οι χάλυβες της ομάδας αυτής σκληραίνονται με απόψυξη σε λάδι. Εξ αιτίας της χαμηλής κραμάτωσης, μόνο η περιεκτικότητα σε άνθρακα (με τα καρβίδια σιδήρου) προκαλεί αύξηση της σκληρότητας και αντίσταση κατά της φθοράς από τριβή. Συνεπώς η αντίσταση κατά της φθοράς από τριβή δεν είναι

τόσο υψηλή όσο στις ομάδες A και D. Σε συνδιασμό με το σχετικά χαμηλό τους κόστος οι χάλυβες της ομάδας αυτής χρησιμοποιούνται ευρέως για βραχύβιες και μη ποιοτικές εφαρμογές στην κατασκευή κοπτικών και διαμορφωτικών καλουπιών.

Ταχυχάλυβες (High-Speed Steels)

Εξ ορισμού ένας ταχυχάλυβας χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα, τέτοια ώστε να επιτρέπει την μηχανουργική κατεργασία (κοπή) υλικών σε υψηλές ταχύτητες. Συνεπώς, οι εργαλειοχάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται πρωτίστως στα κοπτικά εργαλεία που προορίζονται για μηχανουργικές κατεργασίες. Επιπροσθέτως, κάποια είδη ταχυχαλύβων χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ως χάλυβες για εν ψυχρώ λειτουργία.

Οι ταχυχάλυβες αποτελούνται από 20% κ.β. κραματικά στοιχεία, ενώ τα κύρια αυτών είναι το μολυβδαίνιο, το βολφράμιο, το χρώμιο, το βανάδιο, το κοβάλτιο και ο άνθρακας. Κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες, βάσει της περιεκτικότητάς τους σε μολυβδαίνιο και βολφράμιο. Κατά αυτόν τον τρόπο, διαχωρίζονται στις ομάδες T (Tungsten) και M (Molybdenum). Σε γενικές γραμμές δύο ταχυχάλυβες που περιέχουν τα ίδια γραμμομοριακά κλάσματα κραματικών στοιχείων, μα με τη μόνη διαφορά ότι ο ένας περιέχει μολυβδαίνιο και ο άλλος βολφράμιο είθισται να είναι παρόμοιοι στην απόδοση. Επίσης, έχουν πολλές άλλες ομοιότητες, όπως η ικανότητα σκλήρυνσης (hardenability). Συνεπώς, η τελική περιεκτικότητα σε μολυβδαίνιο και/ή βολφράμιο, συχνά περιγράφεται από το λεγόμενο «Ισοδύναμο Βολφραμίου (Tungsten Equivalent)» που συμβολίζεται με W_{eq} % κατά βάρος. Το ισοδύναμο βολφραμίου ποικίλλει μεταξύ 17% και 20%. Κάποιοι χάλυβες της ομάδας M περιέχουν 10% κ.β. βολφράμιο, ενώ χάλυβες της ομάδας T περιέχουν μόνο 1% κ.β. μολυβδαίνιο. Ταυτόχρονα, και για τις δύο ομάδες δεδομένη είναι η περιεκτικότητα 1% βαναδίου κ.β.

Η ατομική μάζα του βολφραμίου είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη του μολυβδαινίου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάγκη για την μισή ποσότητα μολυβδαινίου σε % κ.β. προκειμένου να επιτευχθεί η ίδια ατομική αναλογία. Για οικονομικούς λόγους το μεγαλύτερο ποσοστό των ταχυχαλύβων που παράγονται στην Αμερική είναι της ομάδας M.

Οι ταχυχάλυβες μπορούν να σκληρύνουν μέχρι και 65-70 HRC, ενώ παρουσιάζουν εξαιρετική αντίσταση κατά της φθοράς. Η υψηλή σκληρότητα της κατηγορίας αυτής των χαλύβων σε συνδυασμό με την εξαιρετική σταθερότητα της μοριακής δομής τους ακόμη και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (red hardness) εξηγεί το γεγονός ότι οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε κοπτικά εργαλεία.

Το χαρακτηριστικό αυτό των συγκεκριμένων χαλύβων, να διατηρούν μοριακή σταθερότητα και να μην μαλακτοποιούνται (softening) ακόμη και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες κατά τις οποίες οι χάλυβες εκπέμπουν έντονο κόκκινο χρώμα (red hardness), αποδίδεται στην κατακρύμνηση δευτερευόντων καρβιδίων, κραματικών στοιχείων.

Υπάρχουν πολλές ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των χαλύβων της ομάδας M και της ομάδας T. Η ομάδα M αποτελείται από χάλυβες που παρουσιάζουν καλύτερη δυσθραυστότητα (toughness) σε σύγκριση με την ομάδα T για κοινές σκληρότητες. Επιπροσθέτως, οι εργαλειοχάλυβες της ομάδας M έχουν μέγιστη σκληρότητα που μπορούν να αποκτήσουν τα 70 HRC που μπορεί να

επιτευχθεί στους, πιο υψηλά κραματωμένους με άνθρακα και κοβάλτιο, χάλυβες M41, M42, M43, M44 και M47. Παρά ταύτα είναι πολύ λίγες οι εφαρμογές εκείνες που απαιτούν τέτοιες σκληρότητες. Ακόμη, οι χάλυβες της ομάδας M επιδέχονται ωστενιτοποίησης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τους χάλυβες της ομάδας T, παρά το γεγονός ότι η ικανότητα σκλήρυνσης (hardenability) της ομάδας T είναι καλύτερη από την ομάδα M. Οι χάλυβες που ανήκουν στην ομάδα T, επιδέχονται σκλήρυνσης από 64,5 HRC τουλάχιστον ενώ μπορούν να φτάσουν και τα 67 HRC σε χάλυβες με σκληρά καρβίδια και υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, όπως ο T15 [14].

Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΣΥΛΛΟΓΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η εταιρία ΚΑΡΔΟΥΛΙΑΣ Ε.Π.Ε. δραστηριοποιείται περίπου 25 χρόνια στον χώρο της ανακύκλωσης δομικών υλικών. Εξειδικεύεται στην ανακύκλωση στύλων ηλεκτροδότησης της ΔΕΗ από οπλισμένο σκυρόδεμα, αποτελώντας έναν από τους πιο παλιούς εξωτερικούς συνεργάτες της. Εδράζεται στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη Ρέντη στην Αττική.

Το ακριβές αντικείμενο της εταιρίας αυτής είναι, η μεταπώληση με σκοπό την ανακύκλωση, των απαλλαγμένων από το σκυρόδεμα ράβδων οπλισμού. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένα μηχάνημα (Εικ.3.1), το οποίο σε πρώτη φάση καταστρέφει το σκυρόδεμα και σε επόμενο στάδιο κόβει τις ράβδους οπλισμού σκυροδέματος. Η κοπή των ράβδων γίνεται χωρίς ακρίβεια μήκους των τελικών τμημάτων με μόνο σκοπό την εύκολη μεταφορά τους. Το προαναφερθέν μηχάνημα έχει κατασκευαστεί από την εταιρία JCB και είναι τύπου 3CX. Στον οπίσθιο μονό βραχίονά του συγκεκριμένου μηχανήματος, έχει τοποθετηθεί υδραυλικό κοπτικό εργαλείο τύπου RS 500. Πρόκειται για μια κατάλληλη διάταξη, η οποία ανήκει σε μια ειδική κατηγορία εργαλείων για εκσκαφείς που ονομάζονται εργαλεία κατεδαφίσεων (excavator demolition tools). Τα συγκεκριμένα εργαλεία αποτελούνται από δύο ραμφοειδείς σιαγόνες, οι οποίες εφαρμόζουν αντίρροπες δυνάμεις ανάμεσά τους. Ο κατασκευαστής έχει προβλέψει και σχεδιάσει στο εσωτερικό των σιαγόνων συγκεκριμένου τύπου γεωμετρίες (slots), μέσα στις οποίες πακτώνονται με βίδες ένθετα και εναλλάξιμα εξαρτήματα.



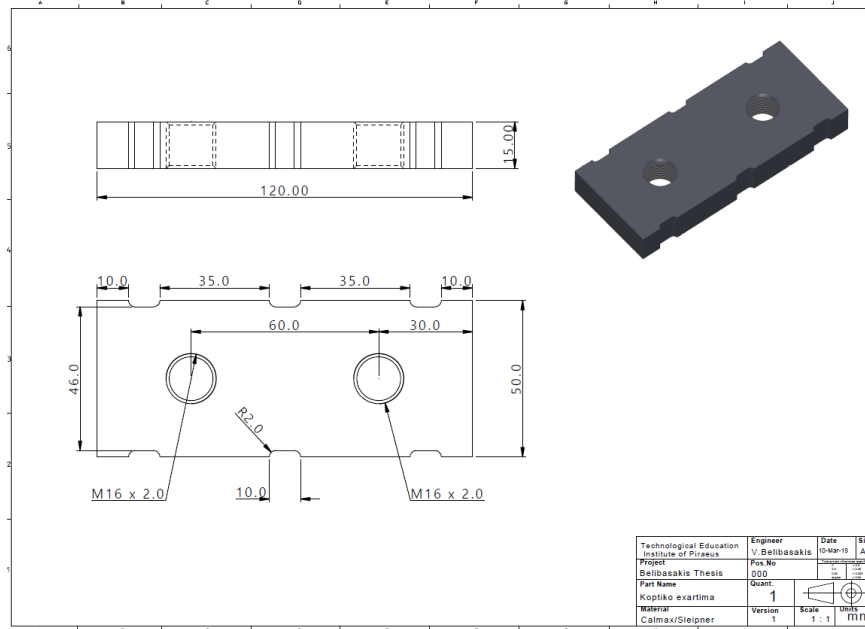
Εικόνα 3.1 Γενική άποψη του μηχανήματος

Τα ένθετα αυτά εξαρτήματα που είναι προσαρμοσμένα στην διάταξη είναι δύο ειδών:

- **Εξαρτήματα κωνικής γεωμετρίας**, που εφαρμόζουν θλιπτικά φορτία, τα οποία βρίσκονται μακριά από τον άξονα περιστροφής των σιαγόνων, στο εμπρόσθιο μέρος της διάταξης, και προκαλούν τον θρυμματισμό του σκυροδέματος από τις κολώνες. Υπάρχουν δύο τέτοιου τύπου εξαρτήματα πάνω σε κάθε σιαγόνα, ενώ η πάκτωσή τους στην διάταξη γίνεται μέσω σύσφιξης με κοχλίες M16 και περικόχλια. Η γεωμετρία που έχουν εξυπηρετεί ιδιαίτερος στην λειτουργία τους, αφού μέσω της κωνικής κατάληξης επιτυγχάνεται εφαρμογή πολύ μεγάλων θλιπτικών δυνάμεων σε πολύ μικρή επιφάνεια. Ο συνδυασμός ισοδυναμεί με εφαρμογή μεγάλων πιέσεων πάνω στο σκυρόδεμα. Ο θρυμματισμός των κολώνων αποτελεί την πρώτη φάση της συνολικής διαδικασίας.
- **Εξαρτήματα γεωμετρίας ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου**, που εφαρμόζουν διατμητικές τάσεις, τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά στον άξονα περιστροφής των σιαγόνων. Η πάκτωσή τους, στην ακριβή θέση τους, γίνεται με 2 κοχλίες M16 για το κάθε ένα κοπτικό εξάρτημα (Εικ.3.4). Τα συγκεκριμένα κοπτικά, χρησιμοποιούνται σε δεύτερη φάση για την κοπή μέσω διάτμησης των ράβδων οπλισμού, όπου έχουν αποκαλυφθεί μέσα από το σκυρόδεμα. Υπάρχει ένα τέτοιου τύπου εξάρτημα πάνω σε κάθε σιαγόνα, ενώ αξίζει να αναφερθεί πως τα συγκεκριμένα κοπτικά και ο τρόπος που ανταποκρίνονται στις φορτίσεις αποτελούν πολύ σημαντικό κομμάτι της επιτυχίας της συνολικής διαδικασίας. Η συγκεκριμένη έρευνα, μελετά την αστοχία που επήλθε σε αυτού του είδους τα ένθετα ζεύγη κοπτικών εξαρτημάτων.



Εικόνα 3.2 Γενική άποψη της διάταξης, όπου a τα κωνικά εξαρτήματα και b τα εξαρτήματα γεωμετρίας ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.



Εικόνα 3.3 Μηχανολογικό σχέδιο κοπτικού εξαρτήματος



Εικόνα 3.4 Γενική άποψη ζεύγους κοπτικών εξαρτημάτων με κοχλίες συγκράτησης

Η διαδικασία ανακύκλωσης των κολώνων ξεκινά με την μεταφορά τους από την ΔΕΗ στο χώρο της εταιρίας. Ύστερα, από επίσκεψη και εκτενή οπτική επιθεώρηση εντοπίστηκε μόνο ένας τύπος κολώνας, κωνικής γεωμετρίας από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου παρουσιάζεται παρακάτω (Εικ.3.5,Εικ.3.6).



Εικόνα 3.5 Εμπρόσθια άποψη κολώνων



Εικόνα 3.6 Πίσω άποψη κολώνων

Η λειτουργία του μηχανήματος ξεκινά με την πρώτη φάση της διαδικασίας και τον θρυμματισμό των κολώνων ανά 0,5m κάνοντας χρήση του εμπρόσθιου μέρους της διάταξης με τα 4, κωνικής γεωμετρίας, εξαρτήματα. Έπειτα, οι αποκολλημένες από το σκυρόδεμα ράβδοι οπλισμού μεταφέρονται μέσω του εκσκαφέα σε άλλο χώρο, στον οποίο στοιβάζονται. Εν συνεχεία, κατά τη δεύτερη φάση της διαδικασίας οι χαλύβδινες βέργες κόβονται σε κομμάτια μήκους 1,5m και αποθηκεύονται σε κατάλληλο χώρο, όπου θα φυλαχθούν μέχρι την μεταφορά τους σε εξωτερικό συνεργάτη της εταιρίας προς ανακύκλωση. Το συγκεκριμένο εργαλείο χρησιμοποιείται περίπου 15 με 20 μέρες το μήνα και για 8 περίπου ώρες την ημέρα, ενώ το αναμενόμενο χρονικό διάστημα συνεχόμενης λειτουργίας είναι 8 με 9 μήνες. Το διάστημα αυτό προκύπτει από την εμπειρία του χειριστή σε συνδυασμό με τις εκτιμήσεις του κατασκευαστή των κοπτικών εξαρτημάτων αλλά και του κατασκευαστή της διάταξης γενικότερα.

Κατά τη λειτουργία της μηχανής παρατηρήθηκαν πολλές περιπτώσεις στις οποίες, ο χειριστής προέβη σε ανορθόδοξους χειρισμούς της διάταξης των κοπτικών εξαρτημάτων, προκειμένου να επιταχύνει την εργασία του και να την ολοκληρώσει εντός χρονοδιαγράμματος.

Από την μορφή και μόνο του εργαλείου φαίνεται πως η τάση θα πρέπει να εφαρμόζεται μόνο στο εσωτερικό των σιαγόνων καθώς κλείνουν, αφού είναι ενισχυμένες με πάχος υλικού. Αντίθετα, το εξωτερικό μέρος της συγκεκριμένης διάταξης δεν είναι ενισχυμένο, άρα δεν προορίζεται για φορτίσεις στην πλαϊνή-εξωτερική επιφάνεια. Παρατηρήθηκε αρκετές φορές πιάσιμο της κολώνας, περιστροφή 90 μοιρών και επί της ουσίας παλινδρομική κίνηση πάνω και κάτω με σκοπό να

θρυμματιστεί κάνοντας χρήση της βαρύτητας (κόπωση). Ακόμη, σε πολλές περιπτώσεις ο χειριστής προσπαθώντας να μετακινήσει τις κολώνες στο χώρο, εντοπίστηκε να τις ωθεί με τις πλευρικές επιφάνειες της διάταξης. Οι φορτίσεις αυτές φαίνεται να ενεργούν στο εργαλείο με τρόπο που ο κατασκευαστής ποτέ δεν προέβλεψε, άρα είναι πολύ πιθανό να προκύψει αστοχία σε αυτό συνολικά, όπως επίσης και στα ένθετα εξαρτήματα που φέρει.

Εξ αιτίας του περιέργου αυτού τρόπου φόρτισης είναι πιθανόν να υπέστη ζημιά και ο άξονας περιστροφής του εργαλείου αφού ο χειριστής τόνισε πως έχει αλλαχθεί κατόπιν της αγοράς της διάταξης από μη εξουσιοδοτημένο συνεργείο. Το προαναφερθέν γεγονός, αυτό καθ' αυτό, θα μπορούσε να δικαιολογήσει την μη προβλεπόμενη λειτουργία της διάταξης η οποία ενδέχεται να οδήγησε σε αστοχία των κοπτικών εξαρτημάτων που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, προκύπτει πως εφόσον η αλλαγή του άξονα περιστροφής έγινε από μη εξουσιοδοτημένο συνεργείο, η λειτουργία του δεν μπορεί να είναι εγγυημένη.

Κατά το σπάσιμο των κολώνων παρατηρήθηκε επίσης μεταφορά των θραυσμάτων με την πλαϊνή επιφάνεια του ράμφους. Πρόκειται για μία ακόμη φόρτιση που ο κατασκευαστής δεν έχει προβλέψει αφού πραγματοποιείται κάθετα στο πλαϊνό μέρος των κοπτικών. Ακόμη, παρατηρήθηκε πως μετά το σπάσιμο των κολώνων πολλές φορές ο χειριστής, βύθιζε το εργαλείο μέσα στα θραύσματα του σκυροδέματος προκειμένου να κόψει τον χαλύβδινο οπλισμό. Κατά αυτόν τον τρόπο τα κοπτικά εργαλεία καταπονούνται ανεξέλεγκτα και απρόβλεπτα. Οι φορτίσεις δεν εφαρμόζονται στις κοπτικές αιχμές των κοπτικών εξαρτημάτων αλλά μπορούν να εφαρμοστούν οπουδήποτε και με απρόβλεπτη φορά. Ως εκ τούτου τα κοπτικά εξαρτήματα που φτιάχνονται για κοπή χάλυβα, καταπονούνται από κρουστικά φορτία πάνω στο σκυρόδεμα. Ο άξονας εφαρμογής του φορτίου δεν μπορεί να προβλεφθεί. Ακόμη, έχει εντοπιστεί, κατά καιρούς, να σπάνε και οι βίδες σύσφιξης ή να παραβιάζονται και τα σπειρώματα, γεγονός που ενισχύει τον ισχυρισμό πως οι φορτίσεις πάνω στα κοπτικά εφαρμόζονται μη επαναλαμβανόμενα και με άγνωστη κατεύθυνση εφαρμογής.

Τέλος, παρατηρήθηκε πως επανειλημμένα ο χειριστής της μηχανής, προκειμένου να επιταχύνει την δεύτερη φάση της κοπής των ράβδων οπλισμού, έθετε προς κοπή περισσότερες από μια ράβδους οπλισμού, οι οποίες πολλές φορές δεν είχαν καθαριστεί επιμελώς από το σκυρόδεμα. Αποτέλεσμα τούτου είναι η καταπόνηση των κοπτικών εξαρτημάτων με μεγαλύτερα φορτία, που ποτέ δεν είχαν υπολογιστεί. Η κοπή θα έπρεπε να πραγματοποιείται σε μεμονωμένες βέργες και όχι στο σύνολο τους προκειμένου η λειτουργία της διάταξης να είναι σύμφωνη με την ενδεδειγμένη από τον κατασκευαστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Παραλήφθηκαν 8 τεμάχια κοπτικών εργαλείων όπου είχαν αστοχήσει, συνοδευόμενα από έναν κοχλία M16 x 25 προκείμενου να καταδειχθεί ο τρόπος συγκράτησής τους πάνω στην υδραυλική διάταξη. Η αστοχία επήλθε και στις 4 ακμές τους, αφού λόγω γεωμετρίας, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης των εργαλείων αυτών, με 4 διαφορετικούς τρόπους κατόπιν περιστροφής. Παρακάτω, (Εικ. 4.1) φαίνεται η ονομασία που δόθηκε στο κάθε ένα από αυτά.



Εικόνα 4.1 Αστοχούντα κοπτικά εργαλεία που παραλήφθηκαν.

Η ονομασία όπως φαίνεται παραπάνω προέκυψε, με την παραλαβή των αστοχούντων κοπτικών εργαλείων, κατά την οποία ήταν χωρισμένα σε 3 ομάδες στις οποίες δόθηκαν, συμβατικά, τα ονόματα Α, Β και Γ. Η ομάδα Α αποτελείται από 4 κοπτικά εργαλεία, η ομάδα Β από 3 και η ομάδα Γ από 1. Στα κοπτικά εργαλεία Α1 και Α2 πραγματοποιήθηκαν σκληρομετρήσεις με την μέθοδο HRC κατά την παραλαβή τους, γεγονός που έδωσε στο όνομα τους ένα επιπλέον χαρακτηριστικό. Κατά αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν τα ονόματα Α1 56 και Α2 53. Τέλος στο κοπτικό Α2 53 το όνομα άλλαξε σε Α2 SL 53, λόγω του υλικού από το οποίο κατασκευάστηκε. Πρόκειται για το υλικό SLEIPNER UDDEHOLM, όπου γνωστοποιήθηκε στους μελετητές άμεσα,

κατά την παραλαβή των εξαρτημάτων. Από τα 8 τεμάχια η μελέτη εστιάστηκε στα 4 από αυτά και συγκεκριμένα στο A1 56, A2 SL 53, A3 και Γ, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω (Εικ. 4.2).



Εικόνα 4.2 Επιλεγμένα προς ανάλυση αστοχία κοπτικά εργαλεία. a) Τεμάχιο A156, b) Τεμάχιο A2SL53
c) Τεμάχιο A3 d) Τεμάχιο Γ

Κατόπιν μίας σύντομης μακροσκοπικής οπτικής εξέτασης φαίνεται πως τα δείγματα A1 56 και A2 SL 53 παρουσιάζουν το ίδιο μοτίβο θραύσης, όπου τμήμα των εκατέρωθεν λειτουργικών επιφανειών του κοπτικού έχει αποκολληθεί. Τα δύο άλλα δείγματα παρουσιάζουν ολική θραύση, ενώ στο σύνολό τους τα κοπτικά εξαρτήματα που μελετώνται φαίνεται να έχουν χάσει τη λειτουργικότητά τους σε πολύ μεγάλο βαθμό. Παρά ταύτα, ο χειριστής της διάταξης των κοπτικών φαίνεται πως συνέχισε να χρησιμοποιεί τα συγκεκριμένα κοπτικά, παρόλη την κατάσταση στην οποία βρίσκονταν.

4.1 Χημική Ανάλυση

Σε πρώτη φάση, τα αστοχούντα κοπτικά εξαρτήματα στάλθηκαν για χημική ανάλυση στην εταιρία SPECTRUMLABS A.E. όπου με χρήση φασματογράφου γνωστοποιήθηκε η χημική σύσταση τους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu
Avg. (%)	0.55	0.81	0.005	0.015	0.364	0.201	4.52	0.106
	FE	Ti	Co	As	W	Al	Sn	V
Avg. (%)	92.3	0.0027	0.033	0.0043	0.098	0.036	0.011	0.269

Πίνακας 4.1 Χημική ανάλυση εξαρτήματος A1 56

	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu
Avg. (%)	0.92	0.52	0.0052	0.017	0.87	0.203	7.86	0.099
	FE	Ti	Co	As	W	Al	Sn	V
Avg. (%)	86.3	0.0048	0.036	0.0070	0.076	0.027	0.0063	0.55

Πίνακας 4.2 Χημική ανάλυση εξαρτήματος A2 SL 53

	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu
Avg. (%)	0.57	0.80	0.0052	0.015	0.364	0.210	4.52	0.106
	FE	Ti	Co	As	W	Al	Sn	V
Avg. (%)	92.3	0.0027	0.031	0.0043	0.098	0.035	0.011	0.269

Πίνακας 4.3 Χημική ανάλυση εξαρτήματος A3

	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu
Avg. (%)	0.55	0.812	0.005	0.014	0.364	0.201	4.52	0.106
	FE	Ti	Co	As	W	Al	Sn	V
Avg. (%)	92.3	0.0027	0.034	0.0043	0.098	0.035	0.011	0.268

Πίνακας 4.4 Χημική ανάλυση εξαρτήματος Γ

Από τα παραπάνω προκύπτει πως τα αστοχούντα κοπτικά εξαρτήματα A1 56, A3 και Γ είναι κατασκευασμένα από τον χάλυβα CALMAX UDDEHOLM. Το εξάρτημα Γ προκύπτει πως κατασκευάστηκε από χάλυβα SLEIPNER UDDEHOLM. Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες ταυτοποίησης των υλικών που αποδεικνύουν τον παραπάνω ισχυρισμό.

	Χημικά στοιχεία (%)					
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
Χημική Ανάλυση Υλικού	0.55	0.364	0.81	4.52	0.51	0.269
Calmax (Uddeholm)	0.6	0.35	0.8	4.5	0.5	0.2

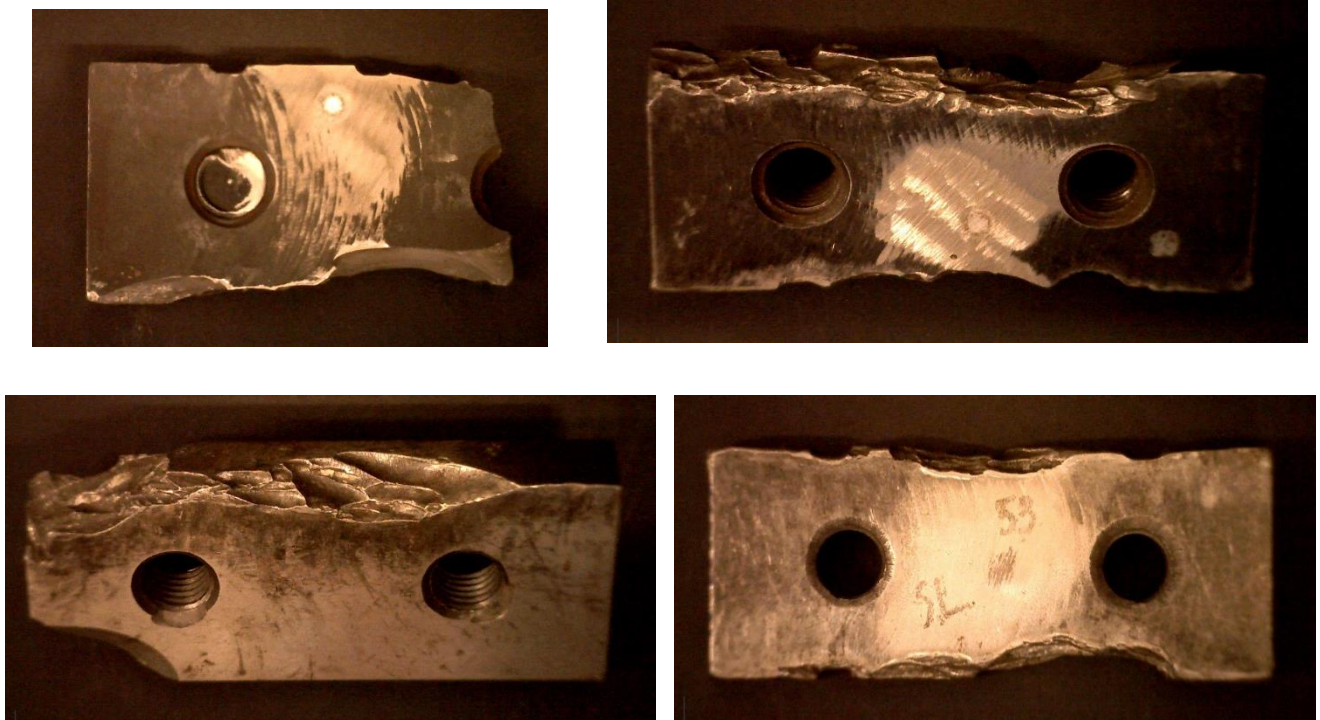
Πίνακας 4.5 Ταυτοποίηση χημικής ανάλυσης Calmax (%)

	Χημικά στοιχεία (%)					
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
Χημική Ανάλυση Υλικού	0.92	0.87	0.52	7.86	2.51	0.55
Sleipner (Uddeholm)	0.9	0.9	0.5	7.8	2.5	0.5

Πίνακας 4.6 Ταυτοποίηση χημικής ανάλυσης Sleipner (%)

4.2 Προετοιμασία και Προκαταρκτικός οπτικός έλεγχος

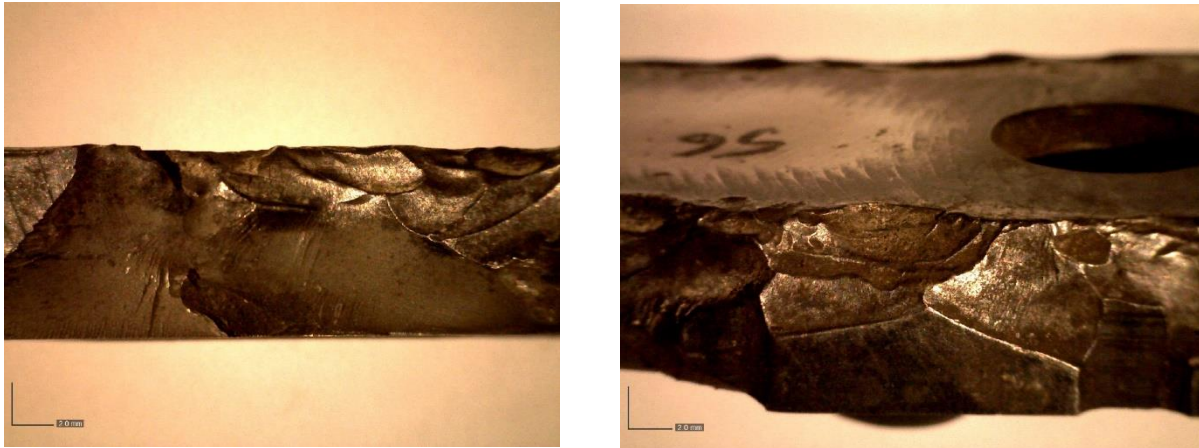
Στα κοπτικά εργαλεία, κατά την παραλαβή τους, εντοπίστηκαν ίχνη από λάδια, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πως κατά πάσα πιθανότητα υπήρξε διαρροή λαδιού από τον εκσκαφέα. Ακόμη, εντοπίστηκαν ίχνη σκυροδέματος μέσα στις ρηγματώσεις που προέκυψαν από την θραύση. Προκειμένου να απομακρυνθούν από τις επιφάνειες θραύσης τα ίχνη λαδιού και σκυροδέματος, όπως επίσης και τα ίχνη επιφανειακής διάβρωσης, τα κοπτικά εργαλεία καθαρίστηκαν επιμελώς με βούρτσα και καθαρή αιθανόλη. Έπειτα, μετά την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους των υλικών αυτών πραγματοποιήθηκε επιμελής καθαρισμός των επιφανειών με καθαρή αιθανόλη και πανί με μικροίνες. Εν συνεχεία, τα κοπτικά τοποθετήθηκαν σε αεροστεγείς σακούλες τυλιγμένα σε διηθητικά χαρτιά για 1 ημέρα προκειμένου να εξαφανιστεί κάθε ίχνος υγρασίας που θα μπορούσε να επηρεάσει την εικόνα των επιφανειών θραύσης.



Εικόνα 4.3 Άποψη των καθαρισμένων προς μελέτη εξαρτημάτων

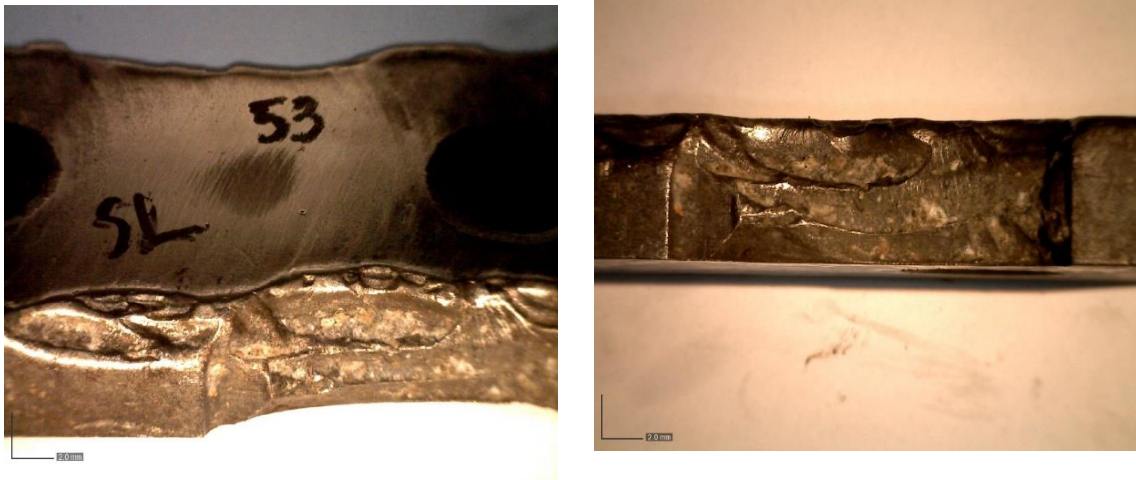
4.3 Έλεγχος με στερεοσκόπιο

Ύστερα, με καθαρές πλέον επιφάνειες θραύσης, η διαδικασία προχώρησε στο στάδιο της στερεοσκοπίας. Σε αυτή τη φάση πραγματοποιήθηκε έλεγχος των επιφανειών θραύσης με χρήση στερεοσκοπίου του εργαστηρίου του ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες των επιφανειών θραύσης.



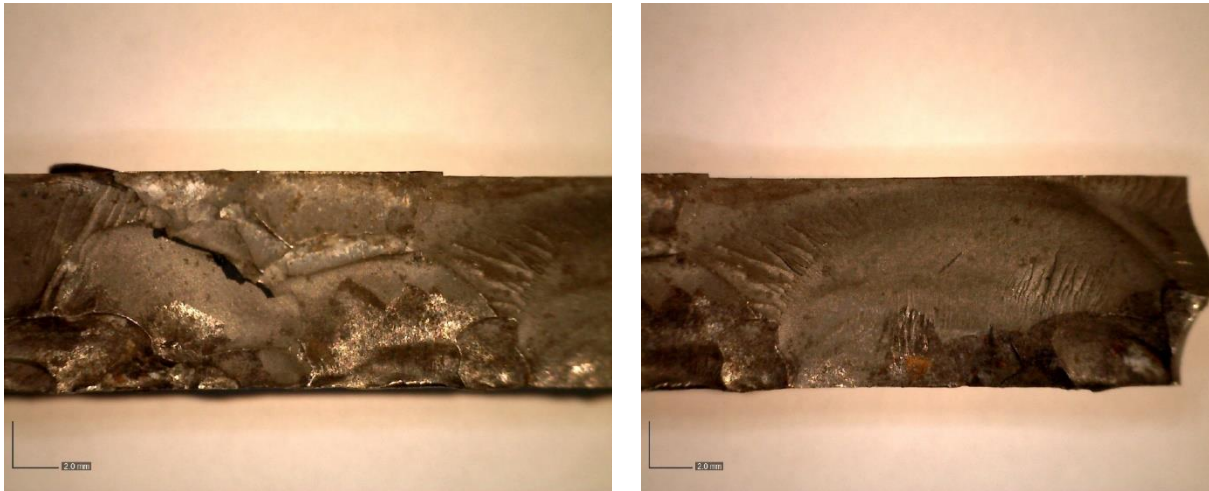
Εικόνα 4.4 Επιφάνειες θραύσεις A1 56

Στην λειτουργική πλευρά του κοπτικού, παρατηρούνται επιφάνειες που χαρακτηρίζονται από διαδοχικές αποκολλήσεις υλικού. Οι περισσότερες από αυτές, χαρακτηρίζονται από σχεδόν ομόκεντρες αλλά και αυξανόμενες ως προς την έκτασή τους, επιφάνειες θραύσης οι οποίες είναι ενδεικτικές του γεγονότος ότι στα ίδια σημεία το υλικό δεχόταν διαδοχικά κρουστικά φορτία. Η επιφάνεια θραύσης, με τη μικρότερη έκταση ήταν αυτή που προηγούταν χρονικά. Ψαθυρές θραύσεις όπως αναμενόταν έχουν προκύψει από απόσχιση, ενώ δεν υπάρχουν ενδείξεις επιφανειακής σκλήρυνσης του υλικού. Τα υλικά είναι ολικά βαμμένα, όπως αναμενόταν ένεκα της εφαρμογής. Η εξωτερική επιφάνεια του εργαλείου, φαίνεται να είναι προϊόν κατεργασίας φρέζας γεγονός που αυξάνει τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις τριβής.



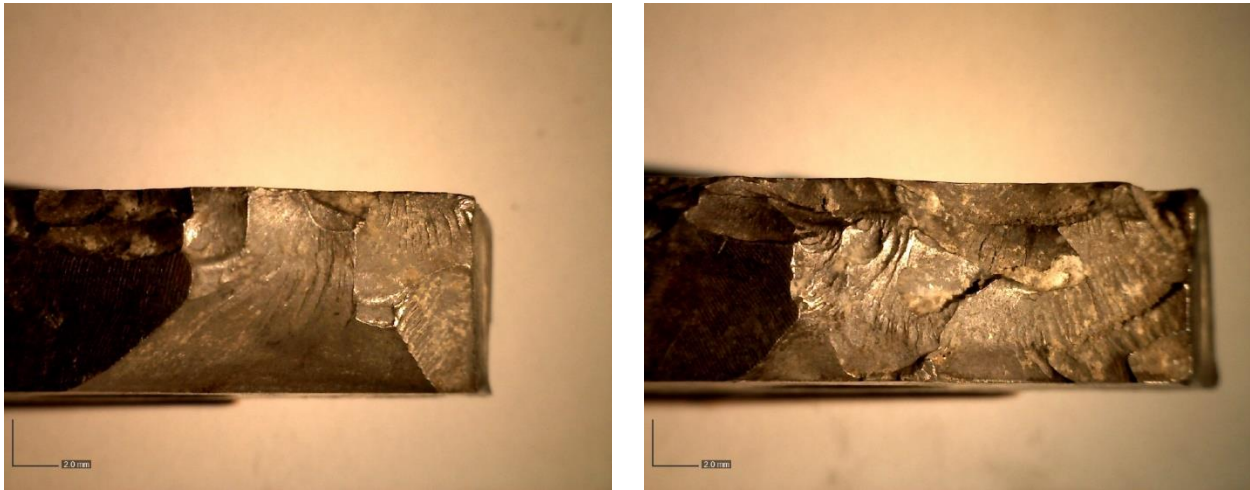
Εικόνα 4.5 Επιφάνειες θραύσεις A2 SL 53

Παρόμοια με το δείγμα A1 παρατηρείται διαδοχική απομάκρυνση υλικού από το ίδιο σημείο της λειτουργικής επιφάνειας του μαχαιριού. Σε αντίθεση με το δείγμα A1 οι επιφάνειες αποκοπής παρουσιάζουν έντονη πλαστική παραμόρφωση. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η σκληρότητα του υλικού κρίνεται στα κάτω όρια. Σημαντικό είναι ότι δεν επήλθε ολική θραύση του κοπτικού κατά την λειτουργία του. Η μηχανουργική κατεργασία των σπειρωμάτων για την συγκράτηση του κοπτικού έχει γίνει με χειροκίνητο τρόπο (πιθανότατα με λίμα). Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι η κακή συγκράτηση του εξαρτήματος η οποία εν δυνάμει δημιουργεί ανομοιόμορφες σημειακές φορτίσεις διάτμησης, οι οποίες λειτουργούν εις βάρος της μακροζωίας του κοπτικού.



Εικόνα 4.6 Επιφάνειες θραύσεις A3

Το ίδιο μοτίβο παρατηρείται και στην συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή σημεία στα οποία έχουν γίνει διαδοχικές αποκολλήσεις υλικού, χαρακτηριστικό χαμηλής δυσθραυστότητας σε σχέση με την απαίτηση της συγκεκριμένης εφαρμογής. Δεν παρατηρούνται περιοχές πλαστικής παραμόρφωσης πέριξ των επιφανειών θραύσης.



Εικόνα 4.7 Επιφάνειες θραύσεις Γ

Σε γενικές γραμμές οι ίδιες παρατηρήσεις προκύπτουν και σε αυτό το τεμάχιο, σχετικά με τις επιφάνειες θραύσης. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται σημεία στα οποία έχουν γίνει διαδοχικές αποκολλήσεις υλικού, χαρακτηριστικό χαμηλής δυσθραυστότητας σε σχέση με την απαίτηση της συγκεκριμένης εφαρμογής. Ακόμη, δεν φαίνεται να υπάρχουν σημάδια προϊούσας πλαστικής παραμόρφωσης.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται, ότι το δείγμα A2 SL 53 παρουσιάζει εκτενείς πλαστικές παραμορφώσεις σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κοπτικά εξαρτήματα. Ως εκ τούτου, το συγκεκριμένο δείγμα δεν παρουσίασε ολική θραύση, επιτρέποντας κατ' αυτόν τον τρόπο στο χειριστή να μην διακόψει την εργασία του. Σχετικά με τα υπόλοιπα κοπτικά, προκύπτει πως οι επιφάνειες θραύσης είναι αποτέλεσμα συνεχόμενων αποκολλήσεων υλικού, λόγω εργοσκλήρυνσης. Ακόμη, φαίνεται πως δεν παρουσιάζουν καθόλου πλαστική παραμόρφωση. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της μελέτης μέχρι το στάδιο αυτό καταδεικνύουν πως η δυσθραυστότητα που παρουσιάζουν τα υλικά των δειγμάτων δεν είναι αρκετή.

4.4 Μέτρηση Σκληρότητας

Οι μετρήσεις σκληρότητας των κοπτικών εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου Π.Ε.Τ.ΥΛ. του ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ. Έγινε χρήση του εξοπλισμού του εργαστηρίου και πιο συγκεκριμένα σκληρόμετρου τύπου INNOVATEST 600A Series (Serial no: 13154). Για τις μετρήσεις εφαρμόστηκε το πρότυπο ASTM E18-07.



Εικόνα 4.8 Σκληρόμετρο INNOVATEST 600A Series.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν τρεις σε κάθε κοπτικό εργαλείο, ενώ έγιναν σε επιφάνειες όπου δεν επηρεάστηκαν καθόλου από την θραύση, προκειμένου να μετρηθεί με τον ενδεικνύμενο, από το πρότυπο, τρόπο η σκληρότητα του υλικού κατασκευής των κοπτικών εξαρτημάτων. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας παρουσιάζονται ακολούθως στον Πίνακα 1.

ΚΟΠΤΙΚΟ ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΜΕΤΡΗΣΗ 1 ^η (HRC)	ΜΕΤΡΗΣΗ 2 ^η (HRC)	ΜΕΤΡΗΣΗ 3 ^η (HRC)
A1 56	55	55	55
A2 SL 53	52	53	53
A3	54	55	55
A4 56	56	56	56
B1	56	56	56
B2	56	56	56
Γ	57	57	55
Δείγμα	48	49	49

Πίνακας 4.7 Τιμές σκληρότητας κατά HRC.

Οι τιμές της σκληρότητας, στην μεγάλη πλειοψηφία των προς μελέτη δοκιμίων από τον χάλυβα UDDEHOLM CALMAX βρέθηκε μεταξύ 55 και 56 HRC. Μέσα σε αυτά, τη μεγαλύτερη σκληρότητα παρουσίασε, κοπτικό εξάρτημα, όπου είχε εμφανή σημάδια πλημμελούς αποπεράτωσης για την τελική διάσταση (grinding), σε συνδυασμό με επιφανειακή αποκόλληση υλικού (ξεφλούδισμα) στα σημεία συναρμογής με κοχλίες συγκράτησης (σπειρώματα).



Εικόνα 4.9. Αποψη του κοπτικού Γ.

Συμπεραίνεται ότι η τελική, αυτή μηχανουργική κατεργασία, έχει δημιουργήσει ένα επαναβαμμένο επιφανειακό στρώμα. Στο στρώμα αυτό, έχει δημιουργηθεί μια πολύ ιδιαίτερη δομή, σίγουρα διαφορετική από αυτήν της καρδιάς του κοπτικού. Η διαφορά αυτή μεταξύ της δομής της καρδιάς από αυτήν της επιφάνειας ξεσπά ανεξέλεγκτα με φαινόμενα αποκόλλησης στρωμάτων υλικού σε περιοχές που δέχονται καταπονήσεις. Τα χαρακτηριστικά της δομής της επιφάνειας μένει να μελετηθούν εκτενώς κατά τη διαδικασία της οπτικής μεταλλογραφίας.

Το κοπτικό που είναι κατασκευασμένο από τον χάλυβα UDDEHOLM SLEIPNER, το οποίο είναι μόνο ένα, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζει χαμηλότερη σκληρότητα και συγκεκριμένα της τάξης των 52 με 53 HRC. Φαίνεται πως η σκληρότητα αυτή επιτρέπει την δημιουργία πλαστικών παραμορφώσεων, η οποία είναι εμφανής μόνο στις επιφάνειες θραύσης του κοπτικού αυτού.

Το υλικό του κοπτικού εργαλείου που δόθηκε ως Δείγμα και συγκεκριμένα ο χάλυβας 38CHN3MFA ® παρουσίασε σκληρότητα αρκετά χαμηλότερη, που κυμάνθηκε μεταξύ 48 και 49 HRC. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις τα εύρη σκληροτήτων κυμάνθηκαν στο 1 HRC, γεγονός που καταδεικνύει υψηλή ομοιογένεια μετά τη θερμική κατεργασία. Παρόλα αυτά, είναι εμφανές πως στην συγκεκριμένη εφαρμογή επιτάσσεται η χρήση χάλυβα χαμηλότερης σκληρότητας. Τα 52 με 56 HRC των ανωτέρω υλικών, φαίνεται πως κατεβάζουν τα επίπεδα δυσθραυστότητάς τους και δεν επιτρέπουν την λειτουργία τους όπως επιτάσσει η εφαρμογή. Προκύπτει πως για την συγκεκριμένη εφαρμογή ζητούμενο αποτελεί η μεγάλη δυσθραυστότητα, σε συνδυασμό με επιφάνειες θραύσης αποτελούμενες από πλαστικές παραμορφώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

5.1 Κοπές

Σε επόμενο στάδιο, τα αστοχούντα κοπτικά εργαλεία τεμαχίστηκαν σε τρία μέρη, κατά την μεγαλύτερη τους διάσταση σε μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος (EDM) Makino Asia PTE LTD (Serial No: W140397.2017) της εταιρίας N.BAZIGOS S.A. στην Μάνδρα Αττικής.



Εικόνα 5.1 Makino Asia PTE LTD (Serial No: W140397.2017) στην εταιρία N. BAZIGOS S.A

Οι κοπές έγιναν παράλληλα στις κοπτικές ακμές των προς μελέτη εργαλείων, προκειμένου να ξεχωριστούν από τα κοπτικά εξαρτήματα οι επιφάνειες θραύσης και παρουσιάζονται παρακάτω στην Εικόνα 5.



A1 56

A2 SL 53

A3

Γ

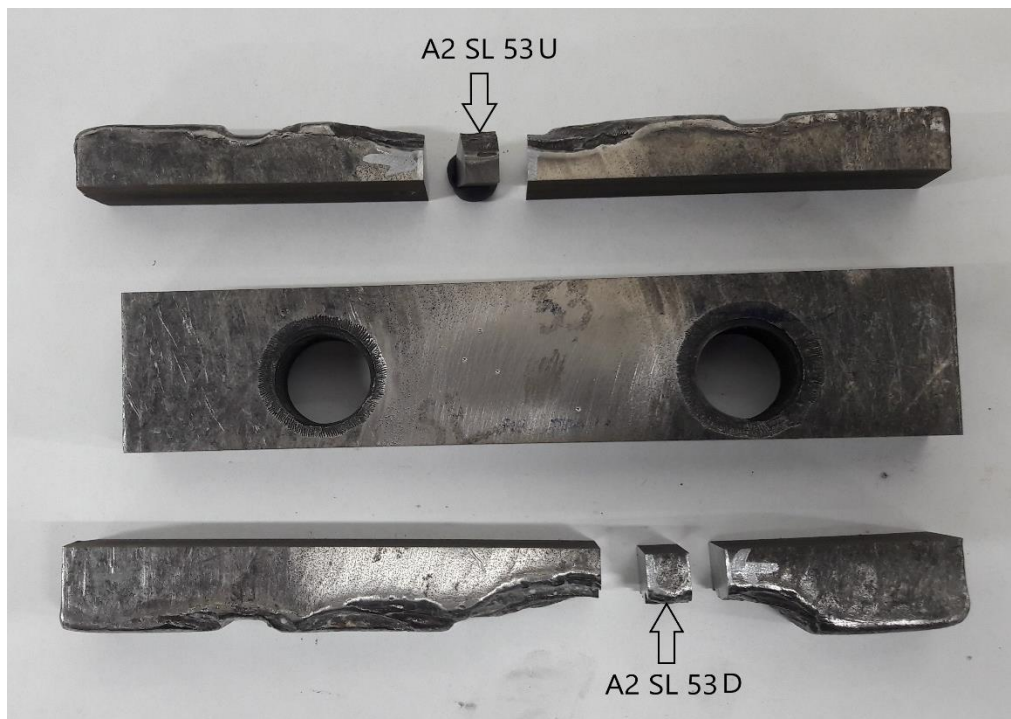
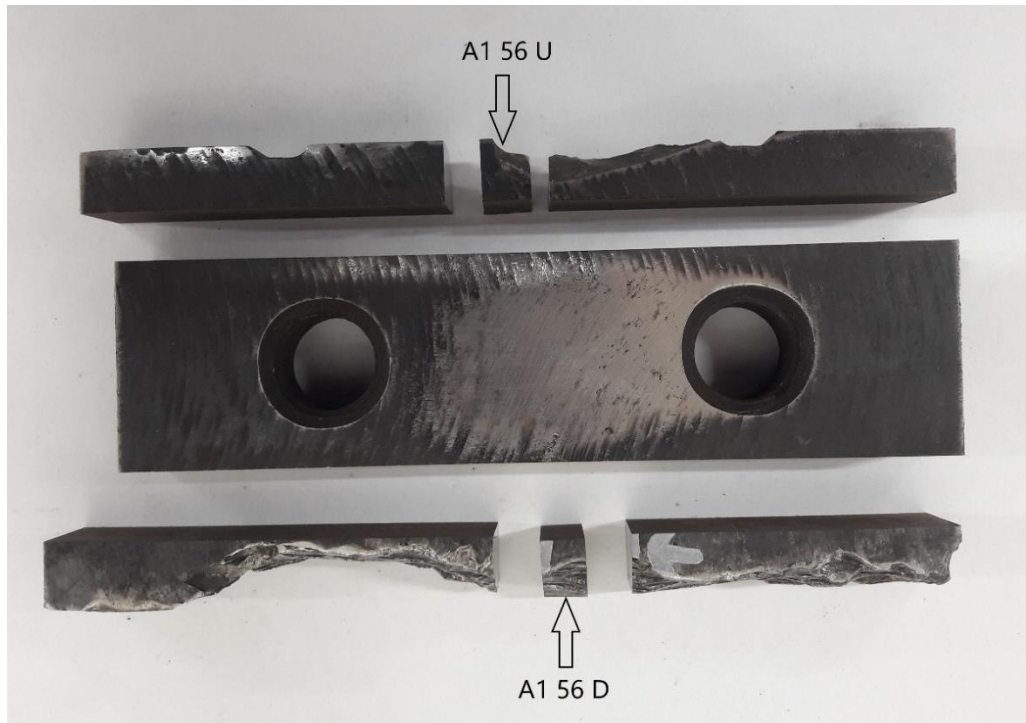
Εικόνα 5.2 Επιλεγμένα κοπτικά εργαλεία ύστερα από EDM κοπές

Εν συνεχεία, στα δύο εξωτερικά τμήματα που προέκυψαν, πραγματοποιήθηκαν ακόμη δυο επιμέρους κοπές. Έγιναν κάθετα στην κατεύθυνση των προηγούμενων κοπών, σε κοπτικό παραγωγή δειγμάτων της εταιρίας Struers Copenhagen Denmark και τύπου Labotom-3 (Type: 05326146/Serial No: 5321698), με μοτέρ: ABB MOTORS (No: 80709 893/6, Classification:F) και ψύξη από διάλυμα νερού με ψυκτικό μέσο. Το συγκεκριμένο μηχάνημα, ανήκει στο εργαστήριο Π.Ε.Τ.ΥΛ. του ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

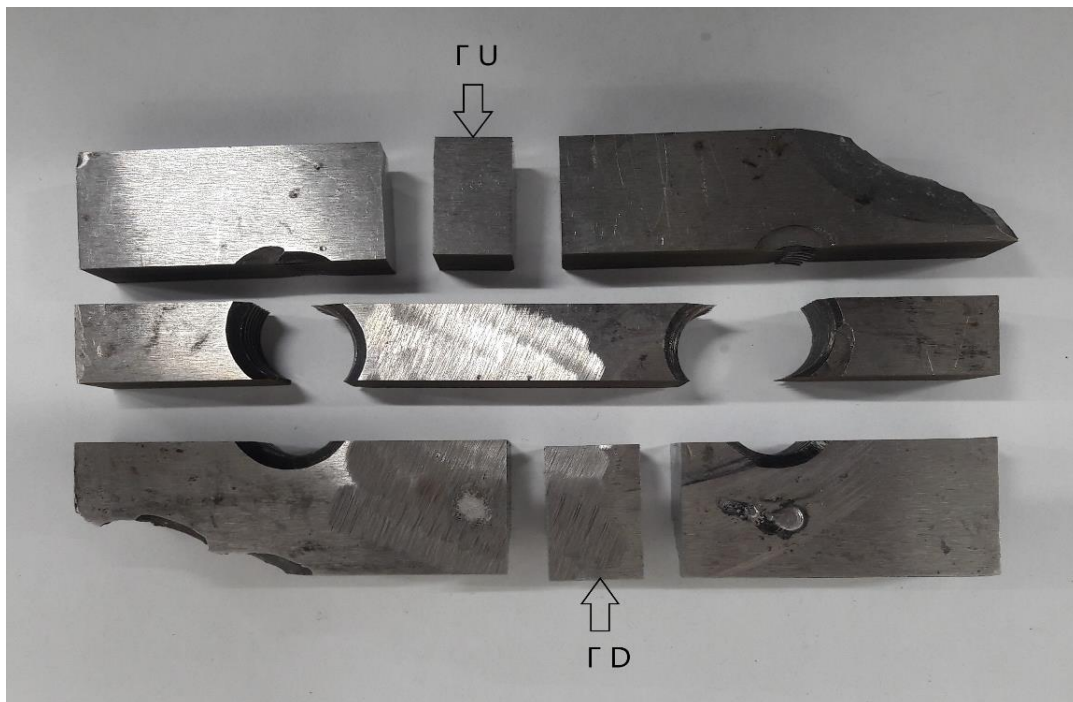
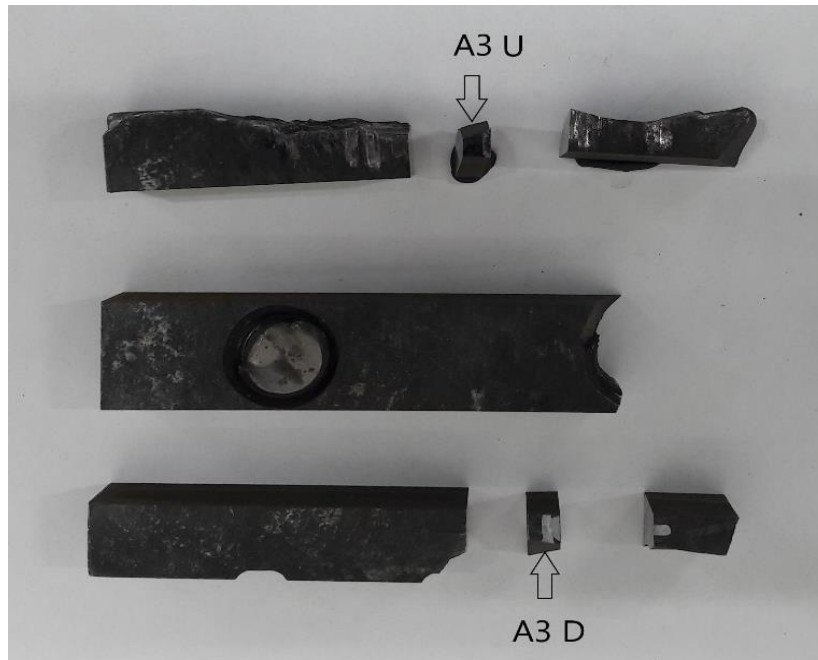


Εικόνα 5.3 Μικροτόμος Struers Copenhagen/Denmark Labotom-3.

Μετά τις κοπές στον μικροτόμο, προέκυψαν τα τελικά δοκίμια προς εγκιβωτισμό. Τα δοκίμια αυτά, κόπηκαν σε τέτοιες διαστάσεις που να επιτρέπουν το επόμενο στάδιο του εγκιβωτισμού, ενώ επιλέχθηκαν, βάσει της μορφολογίας των επιφανειών τους, και αποτελούν χαρακτηριστικά δείγματα της φθοράς των κοπτικών εργαλείων που τέθηκαν προς μελέτη. Παρακάτω, παρατίθενται οι Εικόνες 5.4 και 5.5, στις οποίες φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα των κοπών πάνω στα κοπτικά εργαλεία καθώς επίσης και τα τελικά προς εγκιβωτισμό δοκίμια, όπως αυτά προέκυψαν.



Εικόνα 5.4 Τελικά δοκίμια προς εγκιβωτισμό από τα κοπτικά A1 56 και A2 SL 53.



Εικόνα 5.5. Τελικά δοκίμια προς εγκιβωτισμό από τα κοπτικά Α3 και Γ.

5.2 Εγκιβωτισμοί

Τα τελικά δοκίμια προς οπτική μικροσκοπία, αποφασίστηκε να εγκιβωτιστούν σε ζεύγη. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια των κοπτικών A1 56, A2 SL 53 και A3 εγκιβωτίστηκαν ανά ζεύγη, ενώ τα δοκίμια που προέκυψαν από το κοπτικό Γ εγκιβωτίστηκαν ξεχωριστά εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους τους. Αυτός είναι και ο λόγος όπου παρακάτω εμφανίζεται ο χαρακτηρισμός D και U, που υποδηλώνει το Άνω (Up) και το Κάτω (Down) τμήμα της κοπής από την μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος .

Τα δοκίμια, που προέκυψαν, εγκιβωτίστηκαν στη μηχανή Struers Copenhagen/ Denmark CITOPRESS 1, Category Name: 05776127, Serial No: 5770313. Η συγκεκριμένη μηχανή, ανήκει στο εργαστήριο Π.Ε.Τ.ΥΛ. του ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ και φαίνεται στην Εικόνα 5.6.

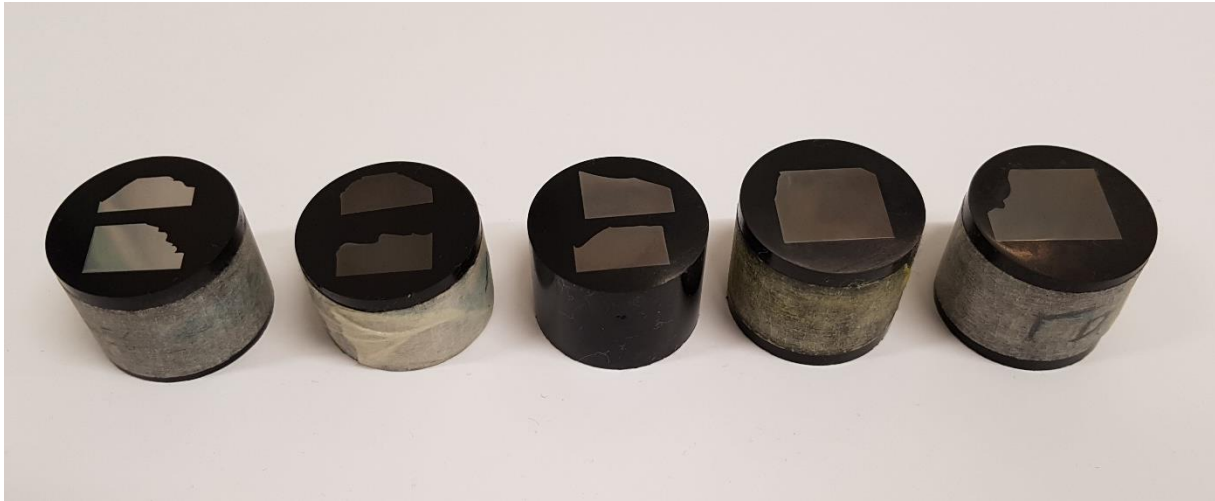


Εικόνα 5.6 Μηχανή εγκιβωτισμού Struers Copenhagen CITOPRESS 1.

Τα συστατικά που χρησιμοποιήθηκαν για τον εγκιβωτισμό ήταν:

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

Ακολούθως στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζονται τα εγκιβωτισμένα δοκίμια όπως κατέληγαν μετά τον εγκιβωτισμό.



Εικόνα 5.7. Απεικόνιση των τελικών δοκιμίων μετά τον εγκιβωτισμό.

5.3 Λειάνσεις- Στίλβώσεις

Σε επόμενο στάδιο, τα δοκίμια υφίστανται λείανση και στίλβωση. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Π.Ε.Τ.ΥΛ. του ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ και στη μηχανή PRESI-TAVERNOLLES τύπου MECAPOL P 262, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 5.8. Για τη λείανση χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά της εταιρίας PRESI από P180 έως P2400. Τα συνολικά πάσο για τα 5 δοκίμια κυμάνθηκαν μεταξύ 20 και 27. Για την στίλβωση χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά:

- Δίσκοι στίλβωσης με πανί και με βελούδο.
- Διαμανταλοιφή DP-Paste M 6μm.
- Διαμανταλοιφή DP-Paste M 3μm.
- AP-A Suspension 1μm (Αιώρημα αλουμίνας).
- AP-A Suspension 0.3μm (Αιώρημα αλουμίνας).
- Λιπαντικό DP-Lubricant Blue.
- Απιονισμένο νερό.
- Μεθανόλη.



Εικόνα 5.8 Μηχανή PRESI-TAVERNOLLES MECAPOL P 262.

5.4 Μικροσκληρομετρήσεις

Μέσω των μικροσκληρομετρήσεων, στόχος ήταν να εντοπιστεί το επίπεδο της ομοιογένειας σκληρότητας του καθενός από τα κοπτικά εργαλεία. Στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

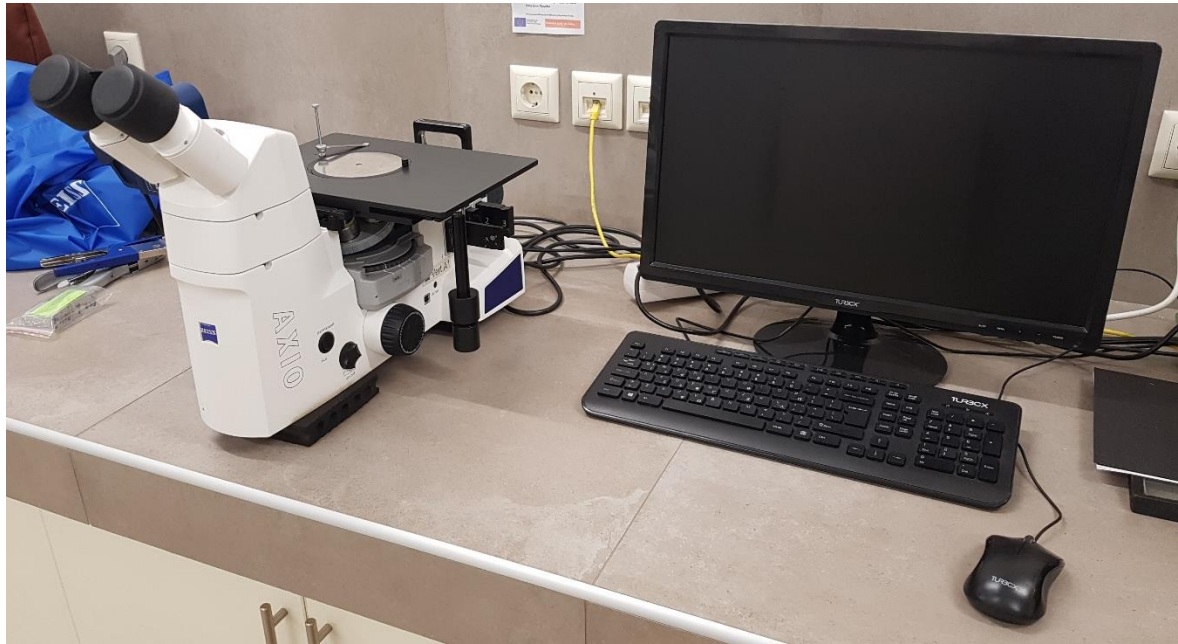
ΓD	ΓU	A156 D	A156 U	A3 U	A3 D	A2SL53 D	A2SL553 U
619.8	622.1	597.7	613.1	602.1	602.1	392.9	564.8
613.1	615.3	602.1	608.6	606.4	597.7	397.5	578.9
613.1	617.5	599.9	606.4	617.5	636	564.8	560.9
613.1	629	604.2	606.4	604.2	622.1	576.8	576.8
624.4	662.7	606.4	595.6	619.8	604.2	574.8	564.8
629	626.7	610.8	589.3	613.1	606.4	566.8	566.8
613.1	629	606.4	602.1	610.8	606.4	495.1	572.8
670.3	619.8	606.4	602.1	599.9	629	572.8	564.8
633.6	633.6	602.1	597.7	617.5	595.6	562.9	595.6
680.6	626.7	278.5	610.8	606.4	617.5	599.9	576.8
672.8	643.1	397.5	595.6	633.6	624.4	576.8	578.9

Πίνακας 5.1 Τιμές μικροσκληρότητας με μέθοδο HV1.

Προκύπτει πως η ομοιογένεια του δοκίμιου Γ παρουσιάζει ένα σχετικά μεγάλο εύρος σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προς εξέταση δοκίμια, όπου διαφαίνεται εύρος σκληρότητας της τάξης του 1 HRC. Το εύρος αυτό θα χαρακτηριζόταν πολύ μικρό και σίγουρα όχι ικανό να δημιουργήσει προδιάθεση για αστοχία. Σχετικά με το δοκίμιο Γ συμπεραίνεται πως η πλημμελής αποπεράτωση που αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να συνέβαλλε στις αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων. Φαίνεται λοιπόν πως η επαναβαμμένη επιφάνεια του κοπτικού παρουσιάζει αποκλίσεις στην μικροσκληρότητα σε σύγκριση με την μαλακότερη καρδιά, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αποκόλληση υλικού. Κάτι τέτοιο, σίγουρα επηρεάζει την λειτουργικότητα του εργαλείου σε βάθος χρόνου.

5.5 Οπτική Μικροσκοπία

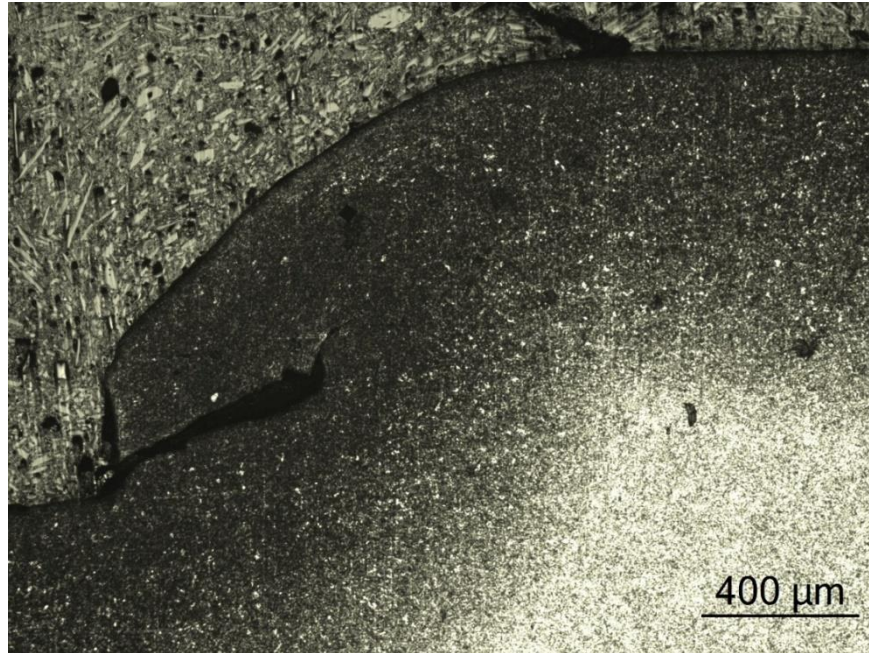
Τέλος, για την ανάλυση αστοχίας πραγματοποιήθηκε δοκιμή οπτικής μικροσκοπίας στο εργαστήριο Π.Ε.Τ.ΥΛ. του ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ. Για την εξέταση τα δοκίμια προσβλήθηκαν χημικά με Picral (διάλυμα πικρικού οξέος 7%) και χρησιμοποιήθηκε το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο μάρκας Carl Zeiss Microscopy GmbH και τύπου Vert A1, για να γίνει η οπτική μικροσκοπία.



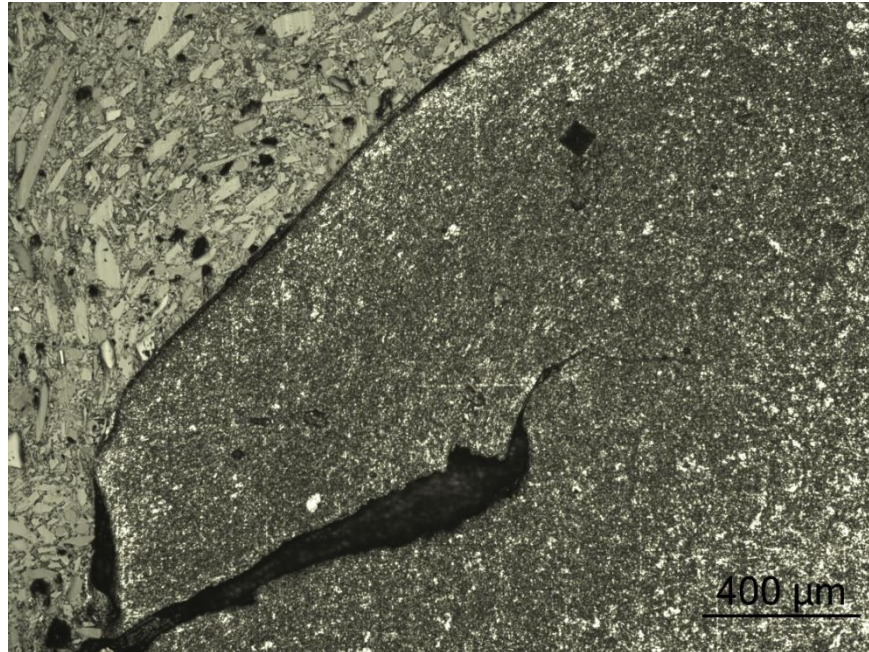
Εικόνα 5.9 Μικροσκόπιο μάρκας Carl Zeiss Microscopy GmbH, τύπου Vert A1.

Το αντιδραστήριο Picral, εκ φύσεως, έχει την τάση να προσβάλλει ιδιαίτερα περιοχές, όπου έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση και να τις αποδίδει στο μικροσκόπιο με σκουρότερες αποχρώσεις. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, όπου υπήρξε πλαστική παραμόρφωση το Picral χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να καταδείξει τα σημεία ενδιαφέροντος. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες που αποτυπώνουν την μικροδομή των δοκιμίων.

Το εγκιβωτισμένο δοκίμιο A1 56D, υπέστη χημική προσβολή σε Picral για 23 δευτερόλεπτα. Η γενικότερη απεικόνιση του δοκιμίου, που έχει προσβληθεί χαρακτηρίζεται από σκούρες περιοχές, όπου καταδεικνύουν έντονη, πλαστική παραμόρφωση και άσπρα στρώματα, όπου καταδεικνύουν τον τρόπο που εξελίσσεται η παραμόρφωση αυτή. Παρακάτω, παρατίθενται φωτογραφίες στις οποίες φαίνονται οι περιοχές αυτές.

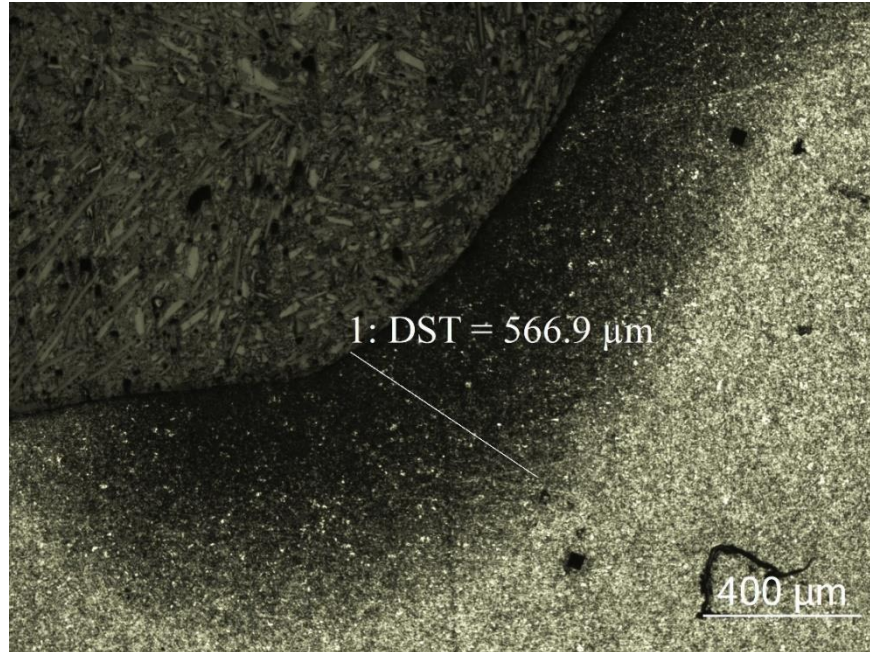


Εικόνα 5.10 Έντονη πλαστική παραμόρφωση A1 56 D_ x 50_ Picral

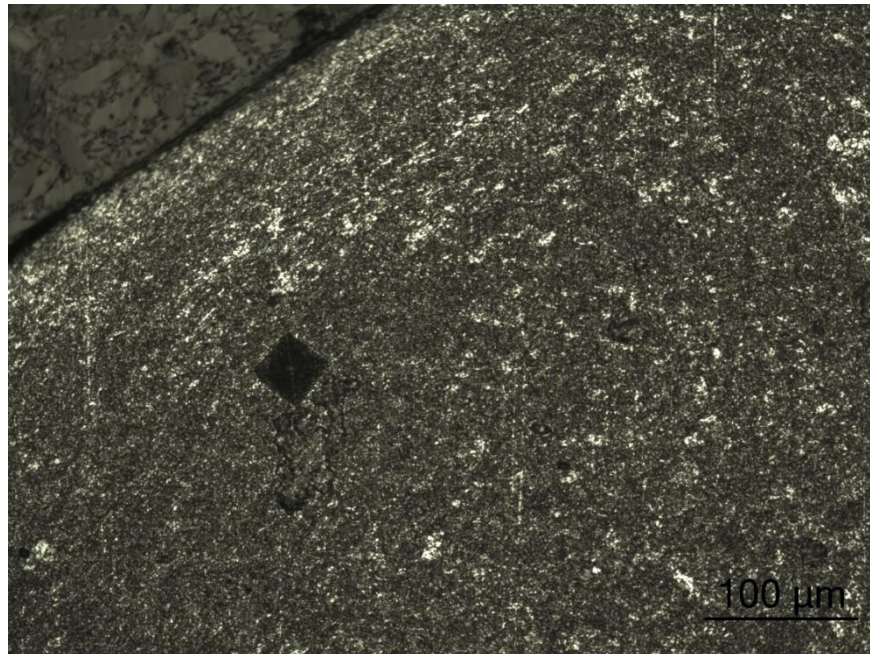


Εικόνα 5.11. Έντονη πλαστική παραμόρφωση και μικροσκληρομέτρηση εντός της πλαστικής περιοχής A1 56 D_ x 100_ Picral

Η ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης στην πάνω πλευρά μετρήθηκε περίπου 0.5 mm. Η σκληρότητα των 56 HRC που είχαν τα κοπτικά εργαλεία, δικαιολογεί την ύπαρξη της πλαστικής, αυτής, παραμόρφωσης. Ακόμη, φαίνεται πως στη σκληρότητα αυτή το Calmax επιτρέπει την δημιουργία περιοχών όπου μπορούν να υποστούν πλαστικές παραμορφώσεις ύστερα από έντονες φορτίσεις. Ένας τρόπος να περιοριστούν οι περιοχές που είναι δεκτικές σε πλαστικές παραμορφώσεις είναι η αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Στις φωτογραφίες παρακάτω φαίνεται, επίσης η ύπαρξη μίας ρωγμής, όπου είναι αποτέλεσμα εκτενούς παραμόρφωσης. Στη συγκεκριμένη περιοχή εφαρμόστηκαν έντονες και συνεχείς δυνάμεις συμπίεσης, γεγονός που οδήγησε στην έναρξη θραύσης.



Εικόνα 5.12. Μέτρηση ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης Al 56 D_x 50_Pical

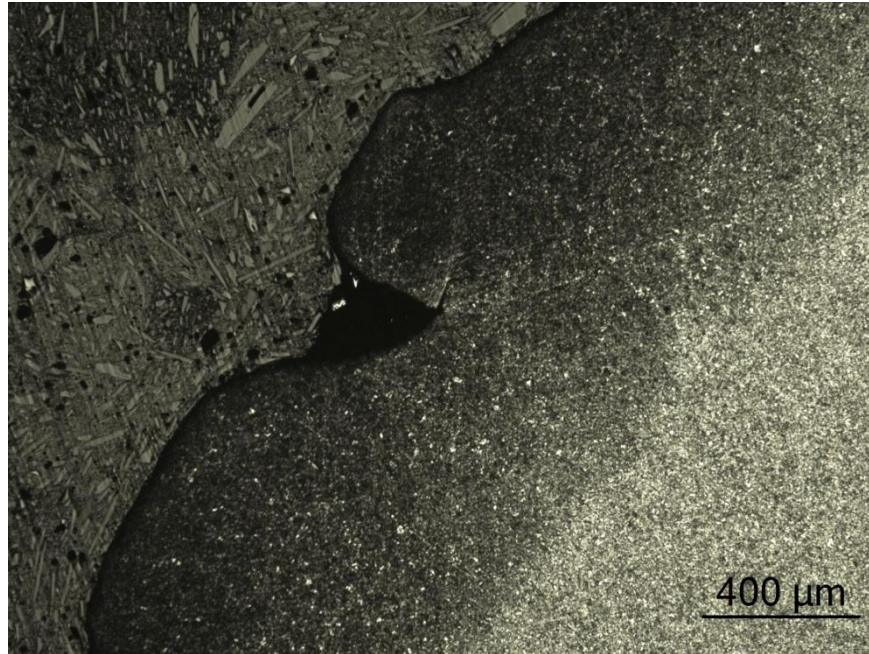


Εικόνα 5.13. Απεικόνιση μικροσκληρομέτρησης εντός πλαστικής περιοχής Al 56 D_x 200_Pical



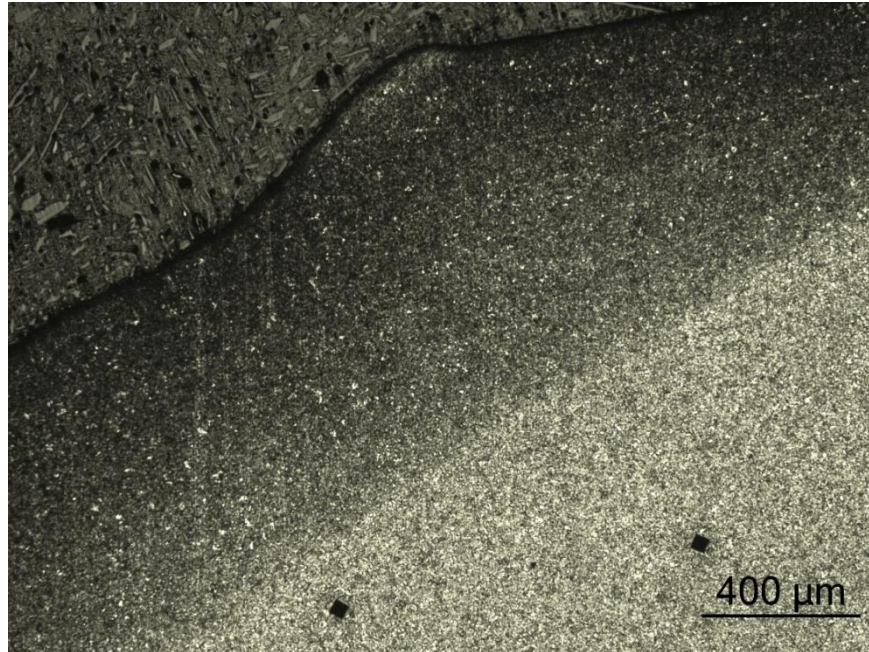
Εικόνα 5.14 Έντονη πλαστική παραμόρφωση και ρηγμάτωση Al 56 D_x 200_Pical

Το εγκιβωτισμένο δοκίμιο A1 56 U χαρακτηρίζεται από περισσότερη ομοιογένεια στην δομή και ομοιομορφία στην παραμόρφωση, συγκριτικά με το δοκίμιο A1 56 D. Το συγκεκριμένο γεγονός οφείλεται στον τρόπο εξέλιξης της ενδοτράχυνσης της επιφάνειας στην συγκεκριμένη πλευρά του κοπτικού εργαλείου. Πραγματοποιήθηκε, μικροσκληρομέτρηση εντός της πλαστικής περιοχής, όπου φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5.15. Απεικόνιση πλαστικής παραμόρφωσης και έναρξη ρωγμών λόγω υπέρβασης του ορίου αντοχής σε θλίψη A1_56_U_x50_Picral.

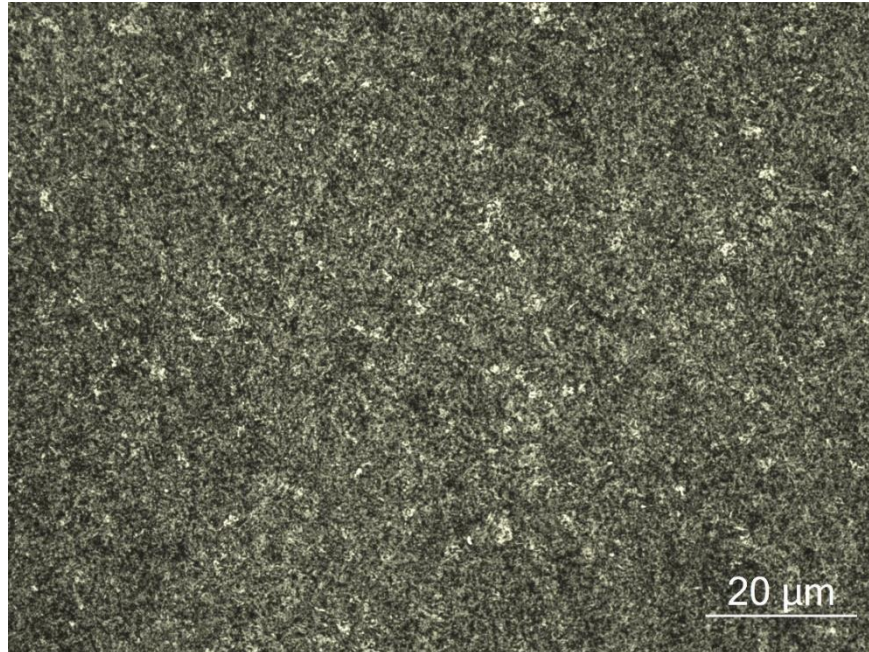
Παρατηρήθηκε πως στην πλαστική περιοχή, η παραμόρφωση έχει δημιουργήσει ένα δίκτυο ρηγμάτων το οποίο εξελίσσεται μόνο εντός της. Προκύπτει πως η σκληρότητα των 58-59 HRC του Calmax δεν ανταπεξήλθε σωστά στα χτυπήματα με αποτέλεσμα την δημιουργία και εξάπλωση των ρηγματώσεων.



Εικόνα 5.16. Απεικόνιση πλαστικής παραμόρφωσης και μικροσκληρομετρήσεων στην μη πλαστικά παραμορφωμένη ζώνη A1_56_U_x50_Pical.

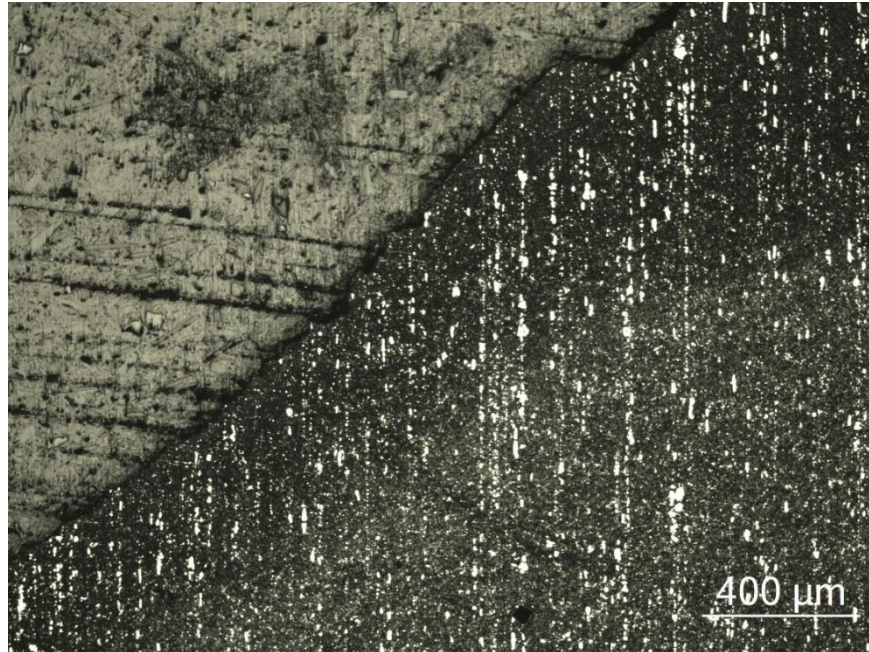
Παρατηρείται εκτενής διασπορά καρβιδίων διαμέτρου κάτω του 1μm, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε 3 παράγοντες:

- 1) Η πλαστική παραμόρφωση να οδηγεί σε κατακρήμνιση καρβιδίων όχι μόνο λόγω μετασχηματισμού, αλλά και λόγω εργοσκλήρυνσης, ένεκα θερμικής ακολουθίας από την οποία απουσιάζει η επαναφορά στην θερμοκρασία κατακρήμνισης. Αυτό έχει ως συνέπεια την κατακρήμνιση των καρβιδίων λόγω των εφαρμοζόμενων μηχανικών τάσεων.
- 2) Το υλικό να έχει υποστεί κρυογενή σκλήρυνση.
- 3) Η πλαστική παραμόρφωση να έχει επιφέρει συμπίεση στην ζώνη επηρεασμού η οποία οδηγεί φαινομενικά στην αποτύπωση μεγαλύτερης πυκνότητας καρβιδίων από το συνηθισμένο.



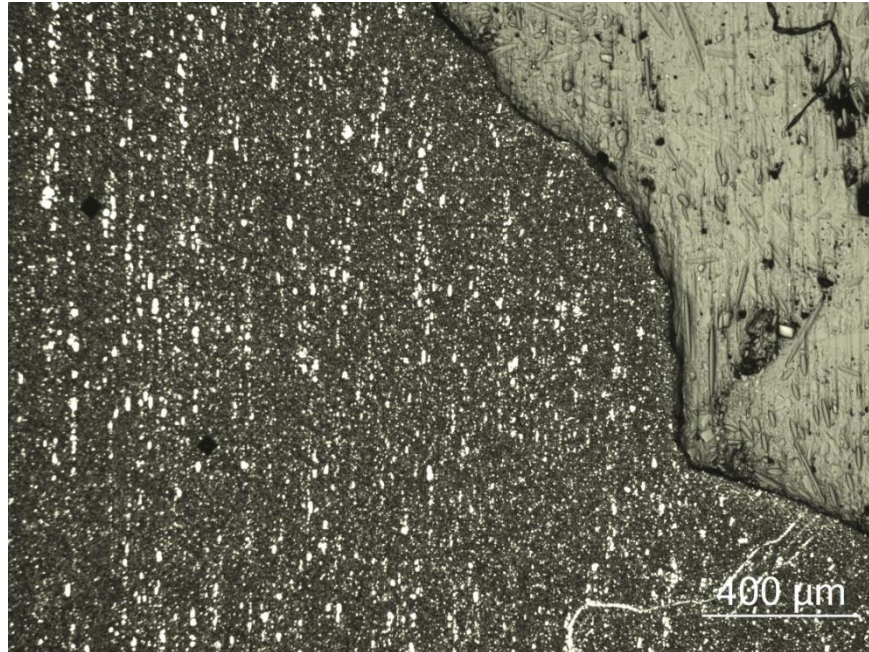
Εικόνα 5.17. Απεικόνιση επαναφερμένου μαρτενσίτη καθώς επίσης και καρβιδίων χρωμίου(Cr), μολυβδαινίου(Mo), βαναδίου(V) A1_56_U_x200_Picral.

Το δοκίμιο A2 SL 53, υπέστη χημική προσβολή σε Picral για 21 δευτερόλεπτα. Απεικονίζεται η ανάπτυξη πρωτογενών καρβιδίων κατά τη φορά της έλασης. Με βάση το υλικό από το οποίο είχε κατασκευαστεί το κοπτικό (UDDEHOLM SLEIPNER), δεν αναμένεται να παρουσιάσει αυτές τις ζώνες καρβιδίων. Το μέγεθος τους, που απεικονίζεται ως συσσωμάτωμα παρουσιάζει περιορισμένη αντοχή σε λυγισμό, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι κύριες φορτίσεις είναι κάθετες στη φορά της έλασης. Στους συμβατικά κατασκευασμένους εργαλειογάλυβες όπως ο συγκεκριμένος, επιδιώκεται η κατεύθυνση των κύριων φορτίσεων να είναι κάθετα στην φορά της έλασης.



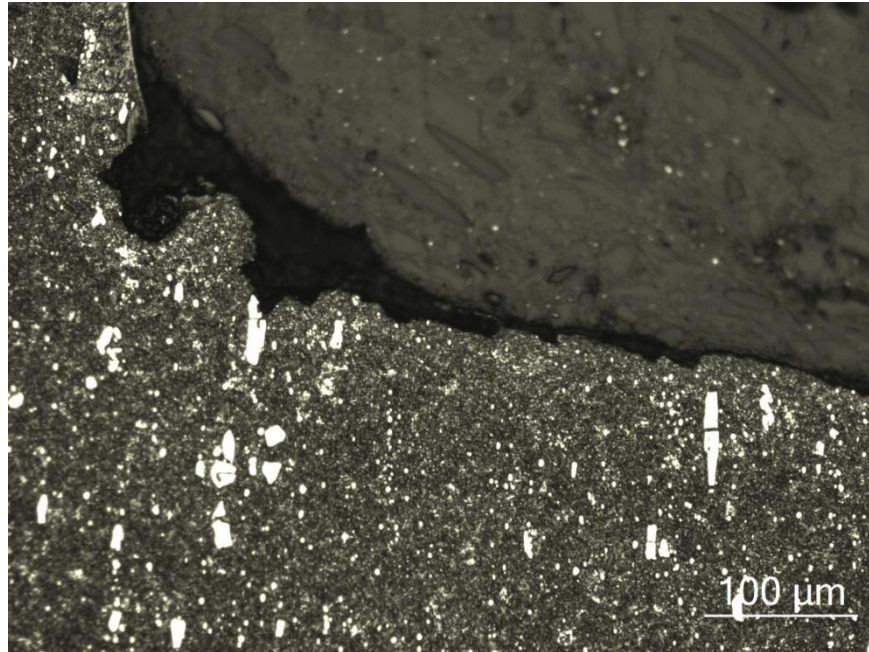
Εικόνα 5.18. Απεικόνιση πρωτογενών καρβιδίων προερχόμενα από θερμή έλαση κατά την παρασκευή του χάλυβα. Φορά των καρβιδίων κάθετα στις εφαρμοζόμενες τάσεις A2_SL53D_x50_picral.

Το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει εμφανή πλαστική παραμόρφωση στις επιφάνειες θραύσης, η οποία είναι ομοιογενής. Η ζώνη αυτή είναι ομοιογενής, καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας θραύσης. Οι ζώνες αυτές είναι αποτέλεσμα της υψηλής δυσθραυστότητας του υλικού. Όταν η εργοσκήρυση ξεπεράσει το όριο αντοχής σε διάτμηση του υλικού, η επιφάνεια υφίσταται αποφλοιώσεις καθώς και αποκολλήσεις όπου δημιουργούν το νέο μέτωπο της επιφάνειας θραύσης.

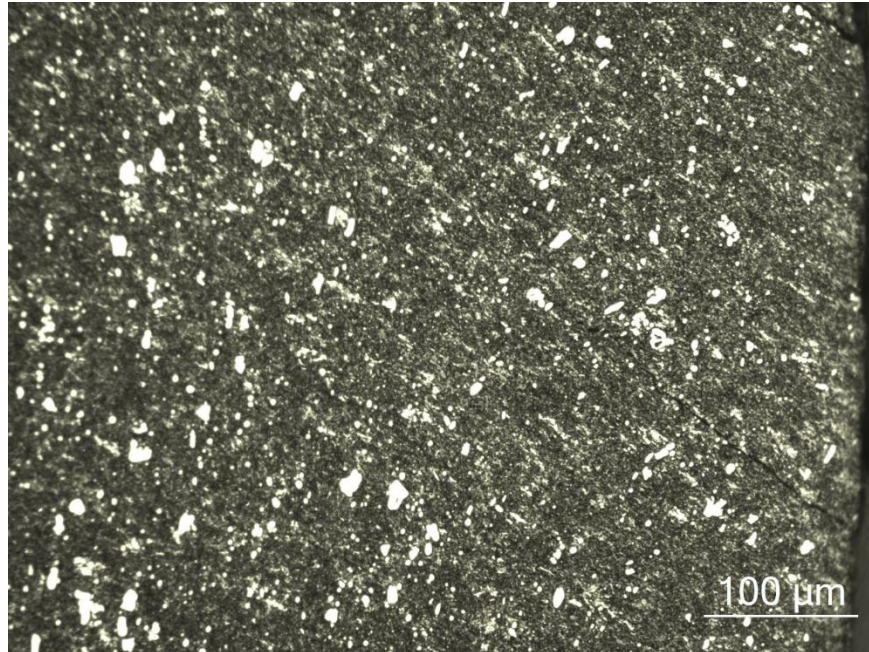


Εικόνα 5.19. Απεικόνιση πρωτογενών και δευτερογενών καρβιδίων και μικροσκληρομετρήσεις. Επιφάνεια θραύσης με εμφανή σημεία πλαστικής παραμόρφωσης A2_SL53D_x50_pical.

Στην παρακάτω εικόνα, πλησίον της επιφάνειας θραύσης, απεικονίζονται πλαταία καρβίδια Χρωμίου (Cr), τα οποία έχουν υποστεί σε πρώτη φάση λυγισμό και ύστερα θραύση. Σε συνεχείς θλιπτικές καταπονήσεις, τα καρβίδια αυτά αποτελούν εν δυνάμει σημεία έναρξης θραύσης.

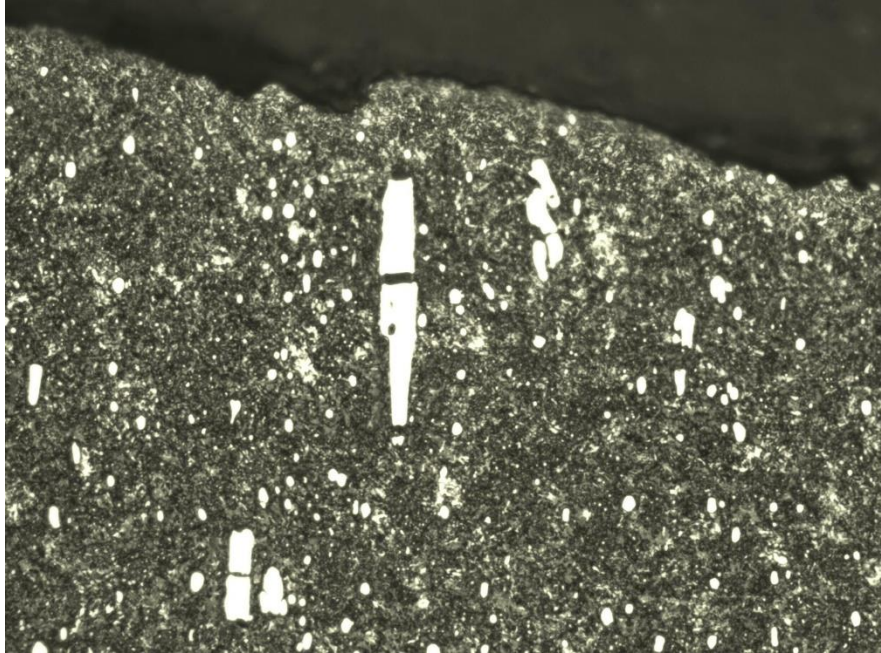


***Εικόνα 5.20.** Απεικόνιση επιφάνειας θραύσης, με απουσία πλαστικής παραμόρφωσης. Μεγάλη πυκνότητα δευτερογενών καρβιδίων και μεγάλη πυκνότητα καρβιδίων σε υπομικροσκοπική κλίμακα. Πιθανή κρυογενή βαφή A2_SL53D_x200_picral.*

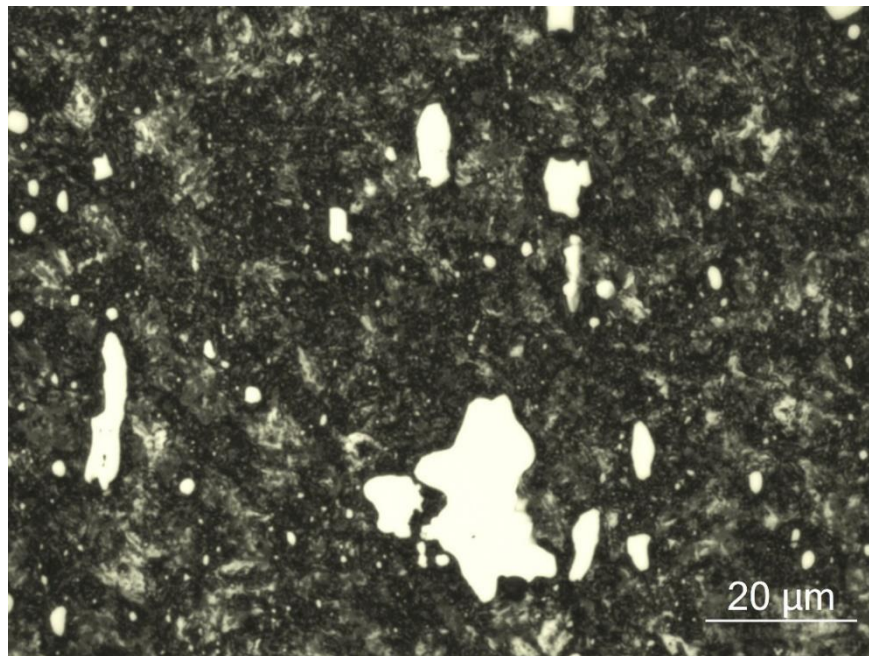


Εικόνα 5.21. Έντονη πλαστική παραμόρφωση στο μέτωπο κοπής του μαχαιριού η οποία χαρακτηρίζεται από προσανατολισμό της μικροδομής. A2_SL53D_x200_picral_005.

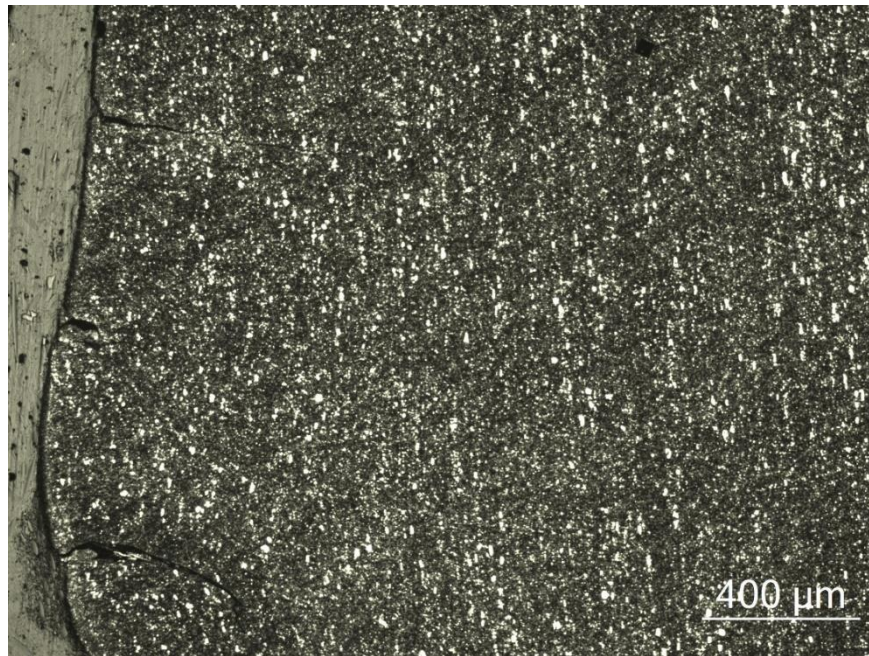
Συμπερασματικά, προκύπτει πως η παρατεταμένη εργοσκλήρυνση λόγω των διαδοχικών κρούσεων, ειδικά επαναλαμβανόμενα στο ίδιο σημείο, αλλά και οι μικροαποκολλήσεις των καρβιδίων δημιουργούν τις συνθήκες για την περαιτέρω θραύση των μετώπων κοπής των κοπτικών εργαλείων.



Εικόνα 5.22. Πλαστική παραμόρφωση στο μέτωπο της θραύσης A2_SL53D_x500



Εικόνα 5.23. Απεικόνιση πλατέων καρβιδίων A2_SL53D_x1000.



Εικόνα 5.24. Απεικόνιση ρηγματώσεων και σχετικά μικρό στρώμα πλαστικής παραμόρφωσης. Οι περιοχές έντονης πλαστικής παραμόρφωσης συνοδεύονται από ρηγματώσεις στο μέτωπο της κοπής λόγω υπέρβασης του ορίου αντοχής σε θλίψη A2_SL53U_x50.

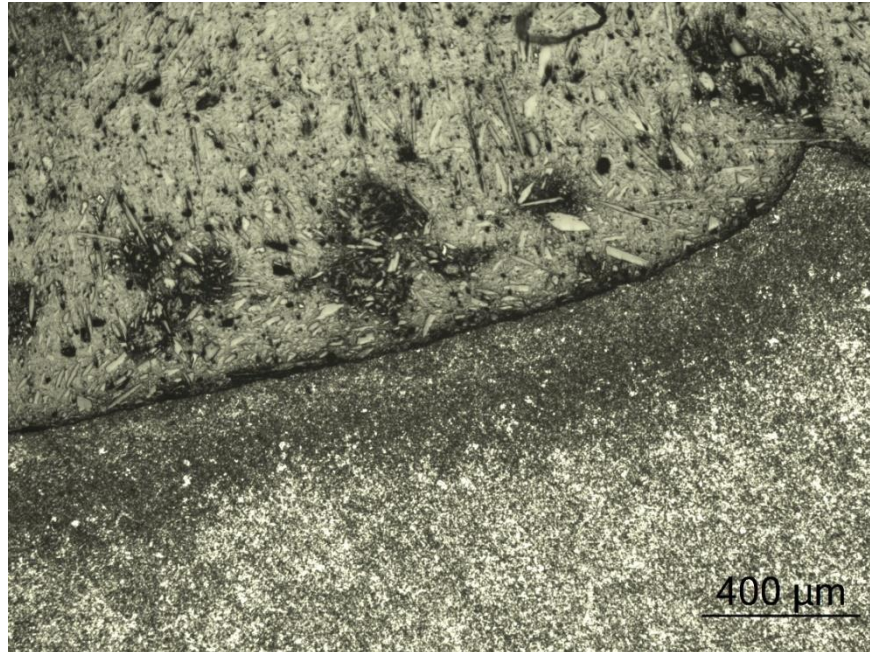
Στη σκληρότητα των 53HRC παρατηρείται μακροσκοπικά περιοχή έντονης πλαστικής παραμόρφωσης η οποία επιβεβαιώνεται μικροσκοπικά. Απεικονίζονται ρηγματώσεις στην περιοχή αυτή, όπου το όριο αντοχής στη θλίψη έχει ξεπεραστεί. Τα σημεία αυτά είναι εν δυνάμει σημεία έναρξης ρηγματώσεων. Λόγω της φύσης της εφαρμογής, είναι πολύ πιθανή η εξέλιξή τους με συνέπεια την ολική θραύση του κοπτικού εργαλείου.

Στο δοκίμιο A3D πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή με Picral για 24 δευτερόλεπτα.

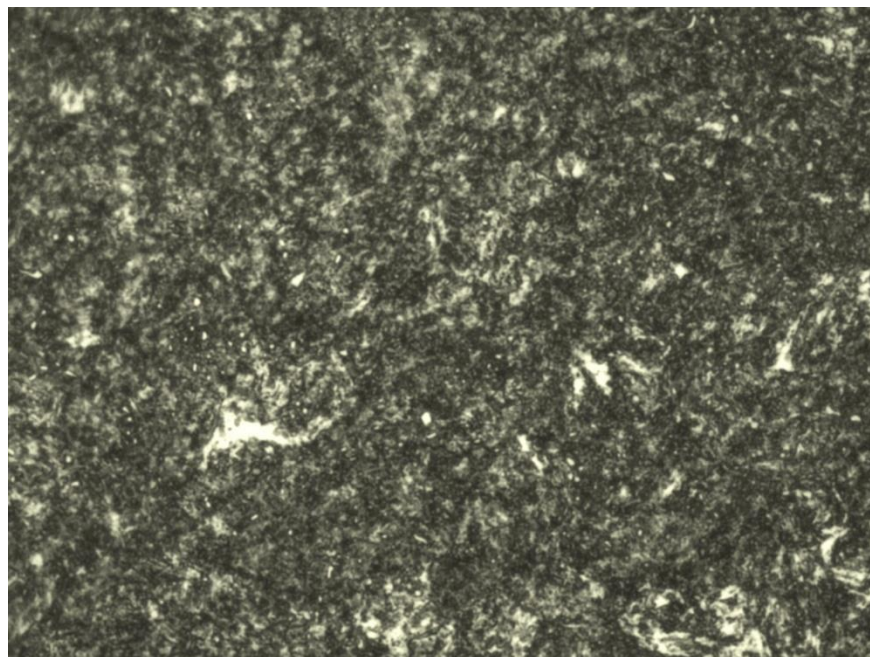


Εικόνα 5.25. Επιφάνεια θραύσης η οποία δεν παρουσιάζει πλαστική παραμόρφωση A3_x50_picral.

Παρακάτω παρουσιάζεται επιφάνεια θραύσης χωρίς όμως σημάδια πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτό σημαίνει ότι η θραύση προήλθε κατά κύριο λόγο από έλλειψη δυσθραυστότητας στη συγκεκριμένη σκληρότητα.

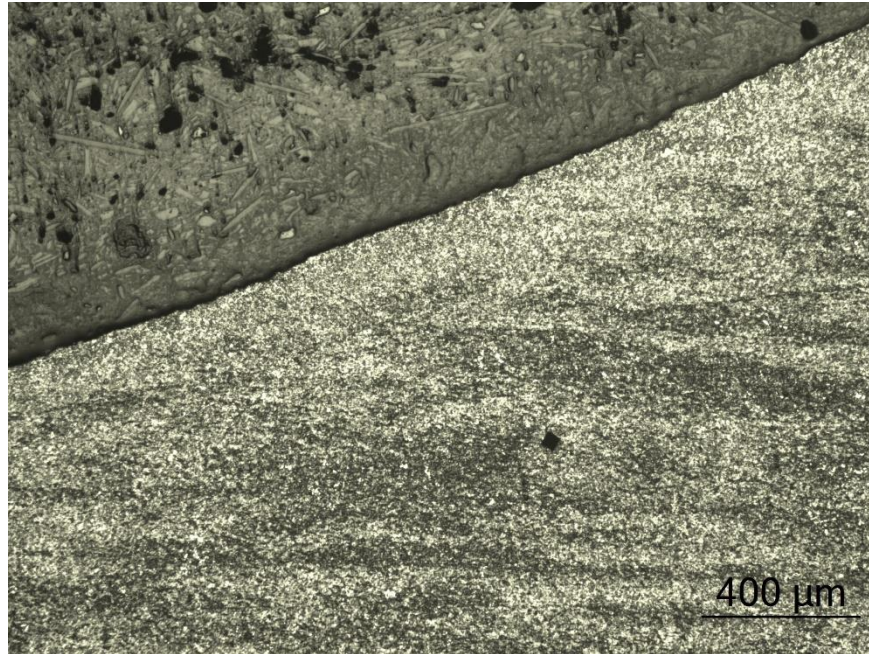


Εικόνα 5.26 Επιφάνεια θραύσης χωρίς ενδείξεις πλαστικής παραμόρφωσης A3_x50_picral.



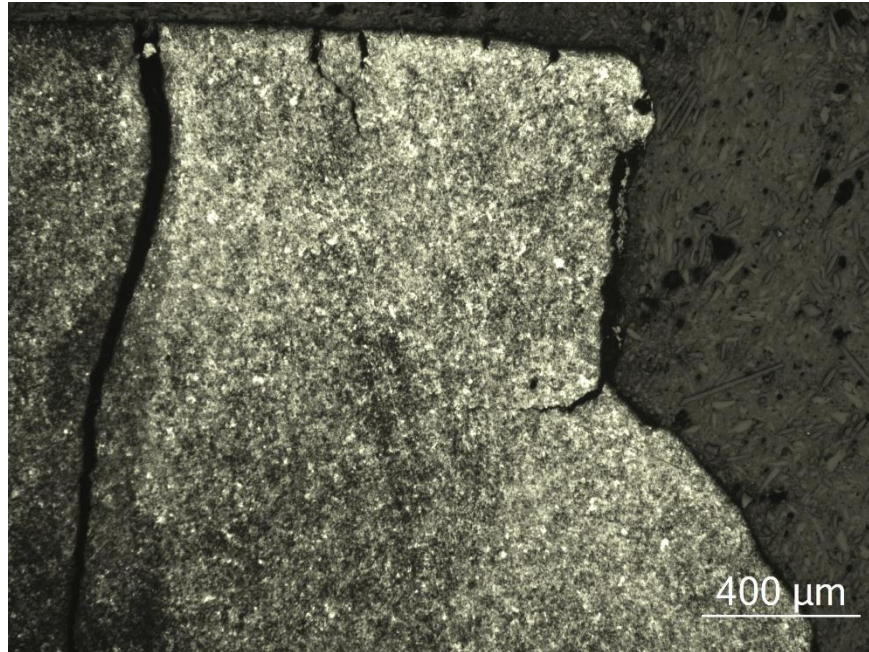
Εικόνα 5.27. Επαναφερμένος μαρτενσίτης και πολύ μεγάλη πυκνότητα καρβιδίων A3_x1000_picral.

Η σκληρότητα του εργαλείου είναι αρκετά μεγαλύτερη ώστε να ανταπεξέλθει στις διατμητικές δυνάμεις της κοπής του χάλυβα οπλισμού. Προκύπτει πως χρησιμοποιήθηκε χάλυβας αρκετά μεγαλύτερης δυσθραυστότητας από τον ζητούμενο της εφαρμογής. Η σκληρότητα του εργαλείου είναι αρκετά μεγαλύτερη ώστε να ανταπεξέλθει στις διατμητικές δυνάμεις της κοπής του χάλυβα οπλισμού.



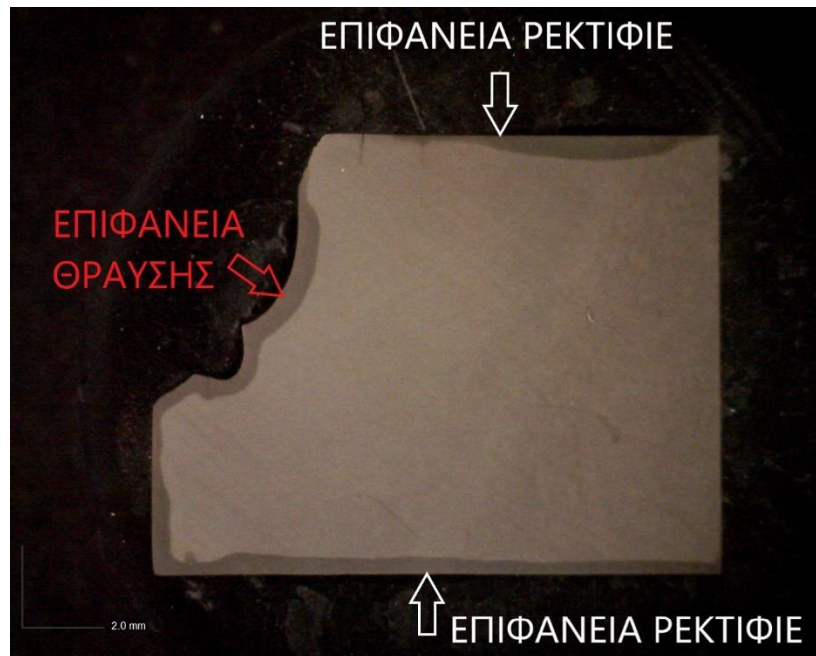
*Εικόνα 5.28. Επιφάνεια θραύσης η οποία δεν παρουσιάζει πλαστική παραμόρφωση
A3*50_picral_fracture_1(d)*

Το δοκίμιο ΓD αποτέλεσε ιδιάζουσα περίπτωση μεταξύ των κοπτικών εργαλείων που αστόχησαν, αφού παρατηρήθηκε πως κατασκευάστηκε με τελείως διαφορετικό τρόπο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κοπτικά. Συγκεκριμένα, ενώ σε όλα τα υπόλοιπα εργαλεία για την αποπεράτωση της τελικής διάστασης μεταξύ των δυο μεγάλων επιφανειών που δίνουν το τελικό πάχος του κοπτικού χρησιμοποιήθηκε φρέζα, στο συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε ρεκτιφιέ. Η διαφοροποίηση αυτή εντάσσει νέες μεταβλητές στην αστοχία που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες που αναδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο το ρεκτιφιέ, σαν είδος μηχανουργικής κατεργασίας, αλλάζει επιφανειακά την δομή του υλικού προς το χειρότερο.

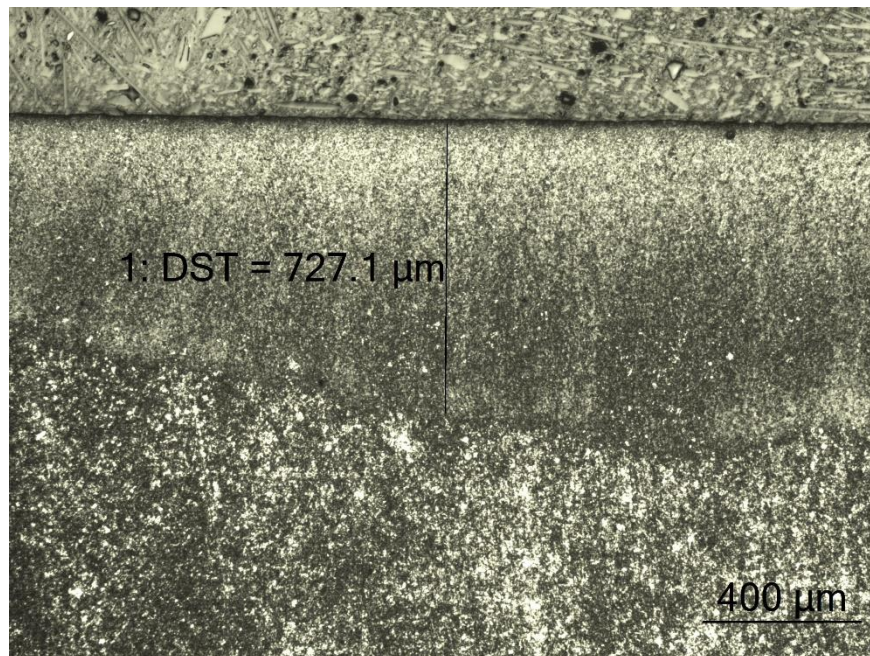


*Εικόνα 5.30. Απεικόνιση επιφανειών με έντονη πλαστική παραμόρφωση GU *_50_picral*

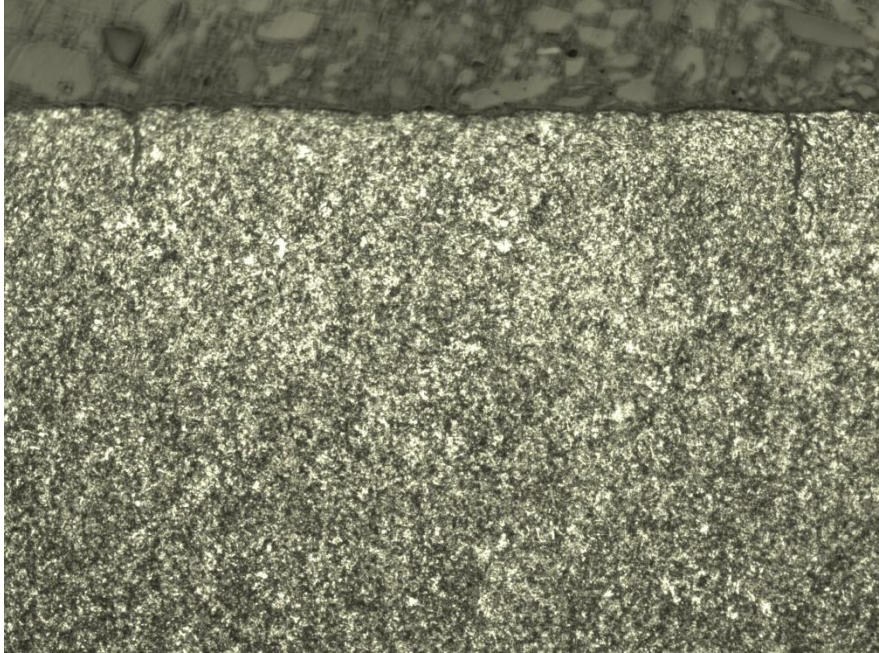
Στο δοκίμιο ΓU πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή σε Picral για 7min. Εμφανίζεται, θραύση της ακμής του κοπτικού ένεκα υψηλών διατμητικών τάσεων ενώ, ταυτόχρονα υπάρχει έντονη πλαστική παραμόρφωση. Το κομμάτι που λείπει δηλώνει την έλλειψη ολκιμότητας ικανής για να ανταπεξέλθει σε αυτές τις φορτίσεις με δεδομένη σκληρότητα. Το υλικό φαίνεται να παρουσιάζει αρκετά υψηλότερη σκληρότητα από την αποδεκτή για τις συγκεκριμένες συνθήκες εργασίας. Παρακάτω, απεικονίζεται το πάχος του επηρεαζόμενου στρώματος λόγω ρεκτιφιέ, το οποίο θα έπρεπε να έχει αφαιρεθεί. Το στρώμα αυτό φαίνεται πως είναι ανομοιογενές. Το βάθος της επηρεαζόμενης ζώνης του ρεκτιφιέ είναι πολύ μεγάλο. Ουσιαστικά πρόκειται για μία κατεστραμμένη επιφάνεια που δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του υλικού και συνεπώς αναμένεται να απομακρυνθεί πολύ γρήγορα κατά την εργασία. Το συγκεκριμένο δοκίμιο προέρχεται από ένα κοπτικό το οποίο δούλεψε ελάχιστα, λόγω ολικής θραύσης. Ενδεικτικό του πολύ κακού ρεκτιφιέ είναι τα σπασίματα στις ακμές των σπειρωμάτων συγκράτησης.



Εικόνα 5.29. Απεικόνιση επιφανειών με έντονη πλαστική παραμόρφωση, ύστερα από προσβολή σε Nitral.



Εικόνα 5.31 Απεικόνιση επιφανειών με έντονη πλαστική παραμόρφωση GU_*50_picral



Εικόνα 5.32. Απεικόνιση μικρορηγματώσεων και μεγάλης πυκνότητας καρβιδίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ

Η συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί την χρήση χάλυβα εργαλείων υψηλής δυσθραυστότητας, αντοχής στην κρούση, αλλά και ικανοποιητικής αντοχής στην τριβή. Δικαίως επιλέχθηκε ένας χάλυβας εργαλείων, ο οποίος ανήκει στην συνομοταξία των “shock resistant” εργαλειοχαλύβων καλύπτοντας κατ’ αυτόν τον τρόπο την απαίτηση της εφαρμογής σε αντοχή κρούσης. Ταυτόχρονα, ο CALMAX UDDEHOLM παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή στην τριβή. Παρά ταύτα, εμφανίζει περιορισμένη δυσθραυστότητα στη σκληρότητα στην οποία βάφτηκε, σε σύγκριση πάντα με αυτή που επιζητείται από την εφαρμογή. Καλύτερα αποτελέσματα θα υπήρχαν σε χαμηλότερες σκληρότητες, μεταξύ 48 και 50 HRC. Στις τιμές σκληρότητας αυτές, ο προαναφερθής χάλυβας θα παρουσιάζει σχεδόν την διπλάσια δυσθραυστότητα, ενώ ταυτοχρόνως θα εμφανίζει πολύ ικανοποιητική αντοχή στην φθορά λόγω τριβής.

Εν τούτοις, λαμβάνοντας υπόψιν την καταστροφή της επιφανείας κατά την αποπεράτωση για την τελική διάσταση, αλλά και την δημιουργία ρηγματώσεων όπως φάνηκε κατά την οπτική μεταλλογραφία, κρίνεται πως δεν μπορεί να αξιολογηθεί απόλυτα η επίδοση του υλικού. Η ύπαρξη στη μικροδομή ασυνήθιστα μεγάλου ποσοστού καρβιδίων, αφήνει την εντύπωση ότι πρόκειται για εξάρτημα κρυογενικά σκληρωμένο. Η μικροδομή είναι φυσιολογική για το συγκεκριμένο υλικό απαρτιζόμενη από επαναφερμένο μαρτενσίτη, ενώ η μηχανουργική κατεργασία που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή, εισήγαγε στην μελέτη αστάθμητους παράγοντες που δυνητικά επηρεάζουν με απρόβλεπτους τρόπους.

Η επιλογή του υλικού SLEIPNER UDDEHOLM φαίνεται να έγινε με μόνο γνώμονα την ιδιαίτερα καλή του δυσθραυστότητα σε συνδυασμό με την μεγάλη αντοχή που παρουσιάζει στην φθορά λόγω τριβής. Το γεγονός αυτό επεξηγεί την πολύ χαμηλή σκληρότητα στην οποία λειτούργησε το υλικό στην εφαρμογή αυτή, αφού για την φύση του η σκληρότητα των 53 HRC είναι αρκετά χαμηλή. Το εν λόγω υλικό παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή σε κρούση και δυσθραυστότητα, ενώ παράλληλα χαρακτηρίζεται από μια ικανοποιητική αντοχή στην φθορά λόγω τριβής. Το βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου υλικού είναι ότι δεν παρουσίασε ολική θραύση με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν νεκροί χρόνοι κατά την λειτουργία του μηχανήματος. Η μικροδομή του υλικού μοιάζει περισσότερο με ποιότητα χάλυβα υψηλού Cr- υψηλού άνθρακα με χαρακτηριστική την ύπαρξη πρωτογενών καρβιδίων κατά τη διεύθυνση της έλασης. Η ύπαρξη των καρβιδίων αυτών και του μεγέθους τους, λειτουργεί ενισχύοντας την πιθανότητα έναρξης ρωγμής, σε συνδυασμό με την κακή αντοχή τους σε λυγισμό. Είναι γεγονός, πως η αδιάκοπη λειτουργία του μηχανήματος αποτελεί ουσιαστική προτεραιότητα των τεχνικών της εταιρίας, προκειμένου η παραγωγή να καθιστά την εταιρία ανταγωνιστική.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα πως στη συγκεκριμένη εφαρμογή, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν χάλυβες όπως ο GRANE UDDEHOLM, ή και για ακόμη μεγαλύτερη ομοιογένεια μηχανικών ιδιοτήτων, ένας χάλυβας υψηλής δυσθραυστότητας όπως ο UNIMAX UDDEHOLM. Το προτεινόμενο εύρος σκληροτήτων λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 49 και 51 HRC. Οι δύο προτεινόμενοι για την εφαρμογή χάλυβες παρουσιάζουν πολύ

υψηλές τιμές δυσθραυστότητας σε συνδυασμό με μεγάλη αντοχή στην φθορά λόγω τριβής, στις συγκεκριμένες τιμές σκληρότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ASM Handbook: “Failure analysis and prevention”, Volume 11, edited by ASM Handbook Committee (2002).
- [2] Practical Engineering Failure Analysis Copyrights, 2004 by Marcel Dekker, Inc.
- [3] ASTM E709-2008 Standard Guide for Magnetic Particle Testing.
- [4] ASM Handbook Volume 11: Practices in Failure Analysis and Prevention edited by W.T. Becker and R.J. Shipley.
- [5] Εργασία ΕΜΠ με θέμα: «Μη καταστροφικοί έλεγχοι υλικών» (Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Μελέτη Ευαγγελία).
- [6] ASTM E 165- 95 “Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination”.
- [7] <http://admes.gr/service/non-destructive-testing/>
- [8] <https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf>
- [9] <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5735/1/Διπλωματική%20του%20Παππού%20Ιωάννη.pdf>
- [10] ASM Handbook: “Fractography”, vol 12, Modes of Fracture edited by ASM Handbook Committee (2002).
- [11] A.J. Mc Evilly: ”Metal Failure Mechanisms, Analysis Prevention”, chapter 6, “Brittle and Ductile Fractures”, Wiley- Interscience.
- [12] F.K. Nauman, ”Failure Analysis case Histories and Methodology”, chapter 3, ”Failure caused by planning errors”, American Society for Metals, Metals park, Ohio, 1983.
- [13] www.wiswgeek.com/what-is-medium-carbon-steel.htm(16/2/14)
- [14] “Tool Steels” by Christian Hojerslev (Riso National Laboratory, Roskilde, January 2001).
- [15] “TOOL STEELS - 4th Edition” by George A. Roberts and Robert A. Cary(American Society for Metals)
- [16] Cryogenic Treatment of Tool Materials (Nirmal S. Kalsi, Rakesh Sehgal and Vishal S. Sharma).