

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΤΑ
ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΛΑΓΩΝ ΚΟΥΛΟΥΡΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ
ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ**

Ραχούτης Ιωάννης

Επιβλέπων: Μέντρεα Κάρμεν
Δρ. Μεταλλειολόγος-Μεταλλουργός Μηχανικός
Συνεπιβλέπων: Παπαγεωργίου Γ. Δημήτριος
Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ, Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος, 2020

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

BSc THESIS

FAILURE ANALYSIS OF SEAMING TOOL USED FOR THE
PRODUCTION OF MILD STEEL SHEET SPOOLED COILS

Rachoutis Ioannis

Supervisor: Medrea Carmen
Dr. Mining-Metallurgical Engineer
Co-Supervisor: Papageorgiou G. Dimitrios
Mechanical Engineer NTUA, PhD Cand. NTUA

Athens, September, 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της επανειλημμένης αστοχίας σε εργαλείο εν ψυχρώ διαμόρφωσης χαλύβδινου ελάσματος. Το εξάρτημα αποτελεί μέρος συναρμολογήματος που χρησιμοποιείται στην μηχανή περιίδεσης κατά την παραγωγή ελάσματος σε κουλούρες. Η διερεύνηση και η μελέτη διενεργήθηκε σύμφωνα με την διαδικασία ανάλυσης αστοχίας μηχανολογικών εξαρτημάτων που προτείνεται στο τεχνικό εγχειρίδιο «Failure Analysis and Prevention» του εκδοτικού οίκου ASM. Η διαδικασία αυτή προβλέπει την εύρεση των κυρίων αιτιών που οδήγησαν στην πρόωρη αστοχία του εξαρτήματος μέσα από την ανάλυση των διαθέσιμων ιστορικών στοιχείων καθώς και τη μακροσκοπική και μικροσκοπική μελέτη των αστοχημένων εξαρτημάτων. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές όπως αυτές ορίζονται από τα αντίστοιχα πρότυπα προδιαγραφών. Συγκεκριμένα εκτελεστήκαν καταστροφικές και μη καταστροφικές μέθοδοι (σκληρομέτρηση, μικροσκληρομέτρηση, οπτική μικροσκοπία για μεταλλογραφική ανάλυση, χημική ανάλυση) καθώς και ανάλυση θραύσεων. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων που αντλήθηκαν κατά την διαδικασία και προτείνονται διορθωτικές ενέργειες με σκοπό την επίλυση του προβλήματος στο πεδίο και την αποφυγή παρομοίων στο μέλλον.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση αστοχίας, Εναζώτωση, Μικροσκληρότητα, Οπτική Μικροσκοπία

ABSTRACT

The main purpose of the present thesis is the study of the precocious failure of a seaming tool. This tool is part of a device used for the stabilization and the assembly of mild steel sheet coils during the production process.

The research and study was conducted in accordance to the procedure of engineering failure analysis mentioned by ASM organization. The objective of this research is the investigation and finding of the causes and the factors contribute to the premature failure of the component as well as to understand the sequence of mechanisms which were used.

For the extraction of correct results all the techniques described in the process were followed step by step. Destructive testing (such as hardness testing, chemical analysis, macroscopic evaluation, scanning and light microscopy) as well as analysis of the fracture surfaces (macroscopic and microscopic) were carried out. The conclusion of the study includes the analysis and processing of the results which extracted at the time of testing, in addition some suggestions concerning the solution of the problem and the prevention of it in the future, are given.

Key Words: Failure Analysis, Nitriding, Microhardness, Microscopic Examination

Ευχαριστίες

Για την προσφερόμενη βοήθεια τους στην εκπόνηση της δεδομένης πτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Την επιβλέπουσα καθηγήτρια Μέντρεα Κάρμεν Δρ. Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό του Πολυτεχνείου Cluj-Napoca, για την πολύτιμη καθοδήγηση της με την πτυχιακή καθώς και την βοήθεια που προσέφερε όλα τα έτη των σπουδών μου.

Τον Κο, Παπαγεωργίου Δημήτριο, Μηχανολόγο Μηχανικό, Υποψήφιο Διδάκτωρ τεχνολογίας κατεργασιών του Ε.Μ.Π. και επιστημονικό συνεργάτη του εργαστήριου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Ε.Π.Τ.Υ.Λ.) του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.) για την πολύτιμη βοήθεια του και καθοδήγηση του.

Την εταιρία SPECTRUMLABS S.A. και ιδιαίτερα την Κα. Κουκούλη Μαριάννα, Μηχανολόγο Μηχανικό MSc. IWE για την πολύτιμη βοήθεια της στην προετοιμασία των δοκιμών καθώς και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλη την διάρκεια της πτυχιακής εργασίας μου.

Τους συμφοιτητές μου, Δραγάτση Αρσένιο και Δημόπουλο Ιωάννη για την βοήθεια τους στην προετοιμασία των δοκιμών καθώς και στην διεκπεραίωση του πειραματικού μέρους της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Γεώργιο και Γεωργία για την στήριξη και υπομονή που έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της επανειλημμένης αστοχίας σε εργαλείο εν ψυχρώ διαμόρφωσης χαλύβδινου ελάσματος. Το εργαλείο λειτουργεί με σκοπό την διαμόρφωση μεταλλικού ελάσματος προκειμένου τη στερέωση και τη συνάρμωση κατά την συσκευασία, ελάσματος σε κουλούρες. Κατά την λειτουργία του εξαρτήματος αυτού παρατηρήθηκε η πρόωρη αστοχία του, με αποτέλεσμα να δοθούν κάποιες προτάσεις πάνω στο ζήτημα. Οι προτάσεις αυτές αστόχησαν σε σύντομο χρονικό διάστημα οπότε κρίθηκε επιτακτική η ανάγκη της μελέτης αστοχίας του, προκειμένου να διαπιστωθεί η αιτία του προβλήματος και η εξάλειψη αυτής. Η μελέτη αυτή λειτουργεί μέσα στα πλαίσια της ανάλυσης αστοχίας που πραγματεύεται η συγκεκριμένη πτυχιακή.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται αναφορά στην έννοια της ανάλυσης αστοχίας τους μηχανισμούς και τους τρόπους με τους οποίους αυτή πραγματοποιείται με επιτυχία. Γίνεται επίσης αναφορά στα είδη των χαλύβων την ονοματολογία και την ταξινόμηση τους. Τέλος αναφέρονται οι θερμικές κατεργασίες μάζας και επιφάνειας.

Εμβαθύνοντας, στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται μεγάλη σημασία στην αναφορά των τεχνικών και ενεργειών βάση των οποίων κάποιος μπορεί να οδηγηθεί στην αιτία που προκάλεσε την αστοχία. Είναι απαραίτητο κάποιος να κατανοήσει ότι η ανάλυση της αστοχίας ενός εξαρτήματος απαιτεί την συνεργασία πολλών κλάδων της μηχανικής και της επιστήμης των υλικών. Μεγάλο ρόλο παίζει και ο αναλυτής, ο οποίος θα πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνει τους μηχανισμούς αστοχίας αναλύοντας τυχόν ευρήματα, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει, να μπορεί να απαντήσει ερωτήματα όπως το τι συνέβη ή ποιος είναι ο τόπος και ο τρόπος που συνέβη. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση στην ταξινόμηση χαλύβων με βάση την χημική τους σύσταση, τον προορισμό τους και την χρήση τους. Γίνεται αναφορά στην ονοματολογία τους με βάση τα διαφορά πρότυπα (AISI, EN), ενώ στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα είδη των θερμικών κατεργασιών και η ταξινόμηση τους σε αυτές που αφορούν όλη την μάζα του υλικού όπως είναι η βαφή, η επαναφορά κ.α. και σε αυτές που αφορούν μόνο την επιφάνεια, όπως για παράδειγμα σκλήρυνση με εναζώτωση ή ενανθράκωση.

Το δεύτερο μέρος περιγράφει όλη την πειραματική διαδικασία ξεκινώντας από τον σχεδιασμό και τα ιστορικά δεδομένα των εξαρτημάτων. Κατά το πέρας του αρχικού ελέγχου των στοιχείων, ακολουθεί η οπτική επιθεώρηση των εξαρτημάτων. Στο έβδομο

κεφάλαιο γίνεται ο έλεγχος των επιφανειών θραύσης των εξαρτημάτων του κάθε συναρμολογήματος μέσω της στερεοσκοπικής ανάλυσής τους. Η στερεοσκοπία έγινε εντός του εργαστηρίου «Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών» του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α). Στο ένατο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση των εξαρτημάτων προκειμένου να διαπιστωθεί και να εξακριβωθεί αν η χημική σύσταση του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα, συμπίπτει με εκείνη της αρχικής πληροφορίας. Η χημική ανάλυση έγινε εντός της εταιρίας Spectrum Labs με την χρήση φασματογράφου ατομικής εκπομπής (Atomic Emission Spectroscopy) τύπου GNR MetaLAB 75-80J AES. Στο ενδέκατο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μικροσκληρομέτρηση για την εξακρίβωση της ύπαρξης θερμικών κατεργασιών μάζας αλλά και την δημιουργία προφίλ σκληρότητας ώστε να διαπιστωθεί αν τα εξαρτήματα είχαν υποβληθεί σε σκλήρυνση της επιφάνειάς τους. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με την χρήση Μικροσκληρομέτρου Shimadzu Type M, στο εργαστήριο «Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών» του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α). Στο δωδέκατο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε δοκιμή οπτικής μικροσκοπίας με σκοπό να υπάρξει σαφής εικόνα της μικροδομής των υλικών. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με την χρήση μεταλλογραφικού μικροσκοπίου της εταιρίας CARL ZEISS, Axio A1 με ανεστραμμένους αντικειμενικούς φακούς, στο εργαστήριο «Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών» του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α).

Στο προτελευταίο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των συγκεντρωτικών συμπερασμάτων, δίνοντας έμφαση στους λόγους για τους οποίους δεν λειτούργησαν και αστόχησαν οι προτάσεις που δοθήκαν. Εν κατακλείδι σχολιάζεται η τελική πρόταση που δόθηκε και η οποία λειτουργεί επιτυχώς, χωρίς κάποιο πρόβλημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT.....	4
Ευχαριστίες	5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	8
1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	14
1.1 Σκοπός της ανάλυσης Αστοχίας.....	14
1.2 Απαιτήσεις για αναλυτή	17
1.3 Διεξαγωγή	17
1.4 Στάδια μια ανάλυσης αστοχίας	18
1.4.1 Συλλογή ιστορικού και επιλογή δειγμάτων	19
1.4.2 Προκαταρκτικός έλεγχος.....	21
1.4.3 Μη Καταστρεπτικές Δοκιμές	22
1.4.4 Μηχανικές Δοκιμές	31
1.4.5 Επιλογή Διατήρηση Καθαρισμός	33
1.4.6 Θραύσεις.....	35
1.4.7 Προετοιμασία για μεταλλογραφικό έλεγχο.....	41
1.4.8 Χημική Ανάλυση	44
1.4.9 Έκθεση ανάλυσης αστοχίας	46
2. ΧΑΛΥΒΕΣ.....	48
2.1 Ορισμός Χάλυβα.....	48
2.2 Ονοματολογία του Χάλυβα.....	50
2.2.1 Ονοματολογία Χαλύβων κατά το Αμερικανικό σύστημα AISI-SAE	50
2.2.2 Ονοματολογία χαλύβων κατά το γερμανικό σύστημα DIN	52
2.2.3 Ονοματολογία Χαλύβων κατά το αγγλικό σύστημα BS	54
2.3 Ταξινόμηση Χαλύβων.....	54

2.3.1 Ταξινόμηση χαλύβων με βάση την χημική τους σύσταση	55
2.3.2 Ταξινόμηση χαλύβων με βάση τον προορισμό τους	57
2.3.3 Ταξινόμηση των χαλύβων με βάση την χρήση τους	58
3. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ	68
3.1 Ορισμός, σημασία και είδη θερμικών κατεργασιών	68
3.2 Ανοπήσεις Χαλύβων.....	68
3.2.1 Πλήρης ανόπτηση.....	69
3.2.2 Εξομάλυνση δομής.....	71
3.2.3 Ανόπτηση σφαιροποίησης του σεμεντίτη.	71
3.2.4 Ανόπτηση για ανακρυστάλλωση.....	72
3.2.5 Αποτακική ανόπτηση.....	72
3.3 Βαφή.....	72
3.3.1 Ωστενιτοποίηση.....	73
3.3.2 Απόψυξη του χάλυβα	73
3.3.3 Μέσα βαφής και Δραστικότητα	75
3.3.4 Φαινόμενο μάζας	76
3.3.5 Εμβαπτότητα	76
3.3.6 Αστοχίες κατά την βαφή.....	77
3.3.7 Κλιμακωτή βαφή	78
3.4 Επαναφορά.....	79
3.4.1 Μηχανικές ιδιότητες μετά από επαναφορά	81
3.5 Επιφανειακές κατεργασίες χαλύβων	82
3.5.1 Ενανθράκωση	83
3.5.2 Εναζώτωση	85
3.5.3 Φλογοβαφή.....	93
3.5.4 Βαφή με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή	93
4. ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ	94

4.1 Εισαγωγή.....	94
4.2 Μηχανές Συσκευασίας.....	94
4.2.1 Μηχανές Συσκευασίας με την χρήση μεταλλικού ελάσματος.....	95
4.3 Είδη μεταλλικής Συνάρμωσης.....	97
4.3.1 Σύνδεση με την χρήση προστατευτικής κάλυψης.....	97
4.3.2 Σύνδεση με την χρήση προστατευτικής κάλυψης με την μέθοδο της τσάκισης.....	98
4.3.3 Σύνδεση χωρίς την χρήση προστατευτικής σφραγίδας.....	99
5. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΙΣΤΟΡΙΚΟ.....	101
5.1 Εισαγωγή.....	101
5.2 Μελετόμενα εξαρτήματα αστοχίας.....	103
5.2.1 Parent Assembly.....	104
5.2.2 1 st Attempt.....	104
5.2.3 N.....	105
5.2.4 QT+N1.....	106
5.2.5 QT+N2.....	106
6. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ.....	108
6.1 Οπτική επιθεώρηση και φωτογραφικό αρχείο.....	108
6.1.1 Parent Assembly.....	108
6.1.2 1 st Attempt.....	111
6.1.3 N.....	114
6.1.4 QT+N1.....	116
6.1.5 QT+N2.....	118
7. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΑ.....	120
7.1 Μακροσκοπική εξέταση επιφανειών θραύσης.....	120
7.1.1 Parent Assembly.....	120
7.1.2 1 st Attempt.....	125

7.1.3 N	132
7.1.4 QT+N1	135
7.1.5 QT+N2.....	139
7.2 Συμπερασματικά	144
8 Προετοιμασία δοκιμών για κοπή	145
8.1 Επιλογή δειγμάτων.....	145
8.1.1 Parent Assembly	147
8.1.2 1 st attempt	148
8.1.3 N	148
8.1.4 QT+N1	149
8.1.4 QT+N2.....	149
9. ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ	151
9.1 Ταυτοποίηση του υλικού με βάση την χημική ανάλυση.....	152
9.1.1 Parent Assembly (5).	152
9.1.2 1 st Attempt (1).....	152
9.1.3 Δείγμα N (3), QT+N1 (7), QT+N2 (9).	153
9.1.4 Μεταλλικά ελάσματα A, B, Γ.....	155
10. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟ, ΛΕΙΑΝΣΗ, ΣΤΙΛΒΩΣΗ	157
10.1 Εγκιβωτισμός Δοκιμίων	157
10.1.1 Φωτογραφίες δοκιμίων μετά τον εγκιβωτισμό.....	158
10.2 Λείανση και στίλβωση Δοκιμίων	160
11. ΔΟΚΙΜΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ	162
11.1 Γενικές Πληροφορίες	162
11.2 Επαλήθευση Μικροσκληρομέτρου	163
11.3 Μετρήσεις Σκληρότητας	165
11.3.1 Parent Assembly	165

11.3.2 1 st Attempt	167
11.3.3 N	168
11.3.4 QT+N1	171
11.3.5 QT+N2.....	173
11.5.6 Μεταλλικά Ελάσματα.....	176
11.4 Συμπεράσματα	178
12. ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ	181
12.1 Parent Assembly.....	182
12.2 1 st Attempt.....	185
12.3 N	188
12.4 QT+N1	191
12.5 QT+N2	192
13. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	195
Α. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	195
Β. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	198
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	199

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

1.1 Σκοπός της ανάλυσης Αστοχίας

Η ανάλυση αστοχίας συνδέεται με ένα σύνολο συγκεκριμένων και άρτια δεμένων τεχνικών και ενεργειών βάση των οποίων, σε συνδυασμό με την συλλογή και την συγκέντρωση των απαιτούμενων στοιχείων μπορεί κάποιος να καταλήξει στην αιτία έναρξης την αποτυχίας.

Ένα κομμάτι ή ένας μηχανισμός θεωρείται ότι έχει αστοχήσει όταν ισχύει μια από τις παρακάτω συνθήκες: όταν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθόλου, όταν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλλά δεν είναι σε θέση να εκτελέσει την συγκεκριμένη λειτουργία του, όταν έχει γίνει αναξιόπιστο να εκτελέσει μια λειτουργία λόγω εκτενής χειροτέρευσης της κατάστασης του και κρίνεται αναγκαία η άμεση απομάκρυνση του, με σκοπό την επισκευή του ή την αντικατάσταση του. [1]

Οι θεμελιώδεις αιτίες μια αστοχίας πολλές φορές προέρχονται από τον σχεδιασμό του προϊόντος, την επιλογή υλικών, διάφορες ατέλειες που υπάρχουν σε υλικά, την κατασκευή και κατεργασία, τον ποιοτικό έλεγχο, την αποθήκευση και την μεταφορά, την συντήρηση και τέλος την απρόσμενη έκθεση σε τεράστια φορτία και μηχανικές ή χημικές ζημιές κατά την λειτουργία του. Πολλές φορές μια αστοχία συμβαίνει από την συμβολή ενός ή παραπάνω λόγων από αυτούς που αναφέρθηκαν. [1]

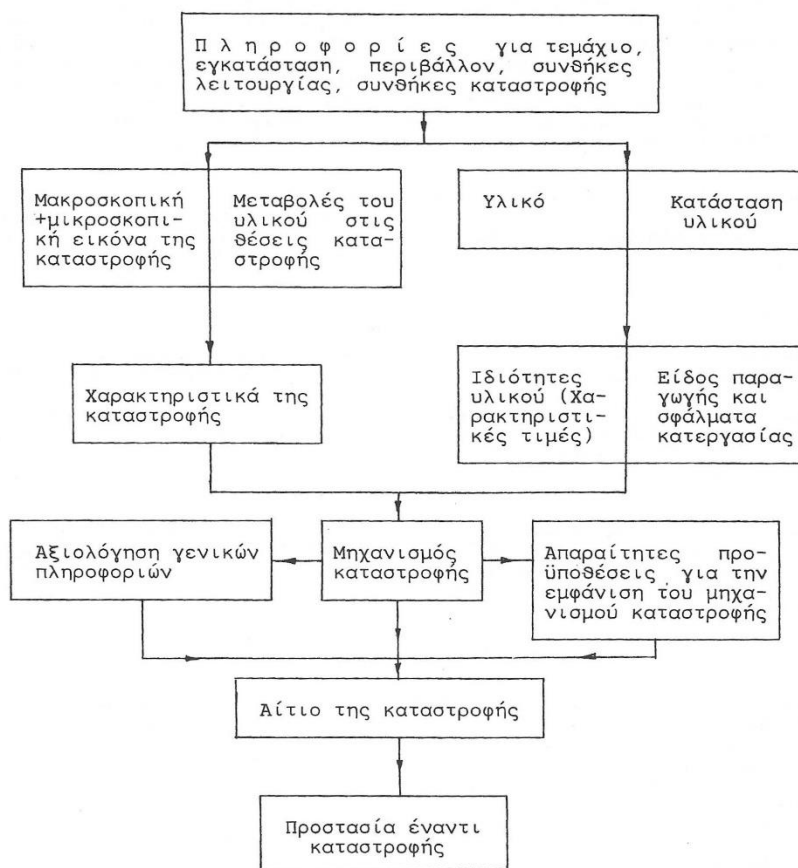
Εφόσον η ανάλυση αστοχίας έχει ολοκληρωθεί όλα τα ευρήματα καταγράφονται σε μια έκθεση όπου μελλοντικά μπορεί να βοηθήσει σε μια αντίστοιχη έρευνα. Τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης αστοχίας είναι εξαιρετικά χρήσιμα για τους σχεδιαστές ενός προϊόντος. Η γνώση προηγούμενων αστοχιών και οι αιτίες αυτών βοηθούν τους αναλυτές και σχεδιαστές να αναπτύξουν ένα προϊόν μεγαλύτερης εμπιστοσύνης και ανθεκτικότητας. Έτσι λοιπόν ένας λόγος για τον οποίο εκτελείται μια ανάλυση αστοχίας είναι η αποφυγή παρομοίων ελαττωμάτων στο μέλλον.

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος δεν αρκεί μόνο η ανάλυση φυσικών αποδείξεων. Πολλές φορές απαιτείται μια εις βάθος έρευνα ώστε να διαπιστωθεί αυτό το αίτιο που προκάλεσε την αστοχία (Root Cause Analysis). Πρέπει να γίνει ανάλυση των πρωταρχικών αιτιών ώστε να προταθούν και οι κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες. Έτσι λοιπόν για παράδειγμα μια μεταλλουργική αξιολόγηση μπορεί να δώσει λύση στο ζήτημα του μεταλλουργικού τομέα αλλά δεν μπορεί να δώσει απάντηση στο ερώτημα

εύρεσης της πρωταρχικής αιτίας του προβλήματος. Για αυτόν τον λόγο αποτελεί μόνο ένα στάδιο της ευρύτερης εννοίας της ανάλυσης αστοχίας.

Αφού λοιπόν ο πρωταρχικός στόχος μια ανάλυσης αστοχίας είναι η αποφυγή μελλοντικών ατυχημάτων και παρόμοιων καταστάσεων είναι σημαντικό η ερευνά να έχει σχεδιαστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Αν από την αρχή της έρευνας υπάρχει ένα συγκεκριμένο πλάνο σχεδιασμένο από τον αναλυτή, τότε το αποτέλεσμα θα μπορέσει να δοθεί γρηγορότερα. Το προς εξέταση πρόβλημα θα πρέπει να διευκρινιστεί από τον αναλυτή από την αρχή της έρευνας και να εξετασθούν όλες του οι πτυχές. Επειδή η ανάλυση αστοχίας είναι μια διαδικασία που απαιτεί ευρεία γνώση πολλών μηχανολογικών κλάδων συμπεριλαμβανομένων, τον κλάδο καταστροφικών δοκιμών, των μη καταστροφικών, της ανάλυσης τάσεων, του μηχανισμού των θραύσεων, των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και τον σχεδιασμό, δεν είναι δυνατόν κάποιος να είναι ειδικός σε όλους αυτούς. Για αυτό λοιπόν είναι σημαντικό ο αναλυτής να είναι σε θέση να συνεργαστεί με άλλους ανθρώπους προκειμένου να υπάρξει μια σωστή και καλύτερη δυνατή λύση.

Πολύ συχνά οι αστοχίες μηχανισμών ή εξαρτημάτων αποκαλύπτουν μια αλυσιδωτή αντίδραση αιτίας και αποτελέσματος. Το τέλος της αλυσίδας είναι συνήθως μια ατέλεια στην απόδοση του εξαρτήματος που πολλές φορές αναφέρεται ως σύμπτωμα ή δυσκολία ή εν τέλη “ως πρόβλημα”. Η ανάλυση αστοχίας λειτουργεί με μια αντίστροφη πορεία ώστε να διασαφηνίσει τα στοιχεία αυτής της αντίδρασης και να τα συνδέσει με τον πιο πιθανό τρόπο σύμφωνα με τον οποίο αυτά αστόχησαν (Εικόνα 1.1). [3]



Εικόνα 1.1: Διαδικασία αναζήτησης του κύριου αίτιου που προκάλεσε την αστοχία του εξαρτήματος. [4]

Για να επιτύχει ο αναλυτής την καλύτερη δυνατή οργάνωση της έρευνας θα πρέπει να είναι σε θέση να καταλάβει και να έχει γνώση πάνω στους δυο βασικούς τομείς των υλικών: της εφαρμοσμένης μηχανικής και της επιστήμης των υλικών. Ανάλογα την κλίμακα που εξετάζεται η συμπεριφορά ενός υλικού διακρίνουμε αυτούς τους δυο τομείς. [2]

Η εφαρμοσμένη μηχανική ή μηχανολογία εξετάζει την συμπεριφορά των υλικών (στερεων ή υγρών) όταν σε αυτά ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις. Έτσι λοιπόν η ανάλυση τάσεων και οι μηχανισμοί θραύσης αποτελούν παρακλάδι της εφαρμοσμένης μηχανικής και έχει αποδειχτεί ότι είναι πολύ σημαντικό στην ανάλυση αστοχίας. Μέσα στις γνώσεις του αναλυτή θα πρέπει να βρίσκονται και οι κλάδοι της κατεργασίας και επεξεργασίας των υλικών.

Αντίθετα τώρα η επιστήμη των υλικών ασχολείται και μελετά την συμπεριφορά των υλικών και την σχέση που έχει αυτή με την εσωτερική δομή τους. Έτσι λοιπόν για να κατανοήσει κάποιος την σχέση αυτή θα πρέπει να εξετάσει το υλικό σε μικροσκοπική κλίμακα. Επειδή η εσωτερική δομή των υλικών έχει άμεση σχέση με την απόδοσή τους

ο αναλυτής θα πρέπει να έχει μια βασική γνώση των εργαλείων της επιστήμης των υλικών.

Συμπερασματικά επειδή η ανάλυση αστοχίας απαιτεί και συνδυάζει γνώσεις από πολλά αντικείμενα και κλάδους της μηχανολογίας θα πρέπει ο αναλυτής να έχει βασικές γνώσεις πάνω σε αυτούς καθώς και να είναι σε θέση μέσω της συνεργασίας του με άλλους ανθρώπους, να οργανώσει την καλύτερη δυνατή έρευνα η οποία θα επιφέρει το σωστό αποτέλεσμα.

1.2 Απαιτήσεις για αναλυτή

Όπως αναφέρθηκε ο αναλυτής θα πρέπει να έχει μια βασική γνώση πάνω σε κάποιους μηχανολογικούς κλάδους και κυρίως στην επιστήμη των υλικών και στην τεχνολογία των υλικών. Πρέπει κάποιος να κατανοήσει ότι μεγάλο ρόλο στην αστοχία ενός υλικού παίζει το τρίπτυχο διαδικασία σχεδιασμού – κατασκευή – απόδοση.

Οι αναλυτές δίνουν σημασία στην συνοχή αυτών των τριών πραγμάτων ορίζοντας αναλυτικά τα διάφορα στάδια του μηχανολογικού σχεδίου καθώς και τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα κατασκευαστεί θα κατεργασθεί και εν τέλη θα συναρμολογηθεί

1.3 Διεξαγωγή

Για να γίνει σωστά η έρευνα και η διεξαγωγή μια ανάλυσης αστοχίας κάποιος θα πρέπει να λάβει υπόψιν του την ιδιαιτερότητα κάθε αστοχίας αλλά σε κάθε περίπτωση η έρευνα αυτή θα πρέπει να απαντήσει σε κάποια βασικά ερωτήματα:

Τι συνέβη;

Ποιος είναι ο τόπος και ο τρόπος που συνέβη;

Ποια είναι η αιτία που συνέβη;

Ποιος είναι υπεύθυνος;

Ποιο είναι το κόστος της επισκευής ή αντικατάστασης;

Τι απώλειες υπήρξαν;

Όπως αναφέρθηκε είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι η αστοχία προκλήθηκε από ένα αδύνατο σημείο στην μηχανολογική διαδικασία του σχεδίου – κατασκευής – απόδοσης. Έτσι λοιπόν για να δώσει κανείς τις απαντήσεις που χρειάζονται θα πρέπει να εξετάσει με την σειρά τις συνθήκες λειτουργίας, την κατασκευή, και τέλος το σχέδιο. Αναφέρθηκε ότι η ανάλυση αστοχίας είναι μια αντίστροφη πορεία και για αυτόν τον λόγο πρέπει να εξετασθεί το τελευταίο κομμάτι της αλυσίδας πρώτα και δια της απόπου

απαγωγής να βρεθεί ο αδύναμος κρίκος προκειμένου να επέλθει το σωστό συμπέρασμα, προκειμένου να αποτραπούν μελλοντικές αστοχίες.

Κάθε ερευνητής θα πρέπει πρώτα να καθορίσει και να διασαφηνίσει το πρόβλημα και αμέσως μετά μέσω βιβλιογραφίας να εστιάσει στην ανάπτυξη ενός καλού υποβάθρου όσον αφορά την περιοχή του προβλήματος. Τέλος θα πρέπει να γίνει ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός ελέγχων και πειραμάτων για την εξέταση του προβλήματος. Συνεπώς η ανάπτυξη ενός καλού υπόβαθρου θα βοηθήσει τον μελετητή να ανταπεξέλθει ταχύτερα και αποτελεσματικότερα αφού ο ίδιος θα είναι σε θέση να συνδέει τα προβλήματα.

1.4 Στάδια μια ανάλυσης αστοχίας

Μια έρευνα αστοχίας ακολουθούμενη από την ανάλυση της θα πρέπει να είναι σε θέση να καθορίσει την αιτία της αστοχίας και αναλόγως την απόφαση θα πρέπει να ξεκινήσουν διορθωτικές ενέργειες προκειμένου να αποφευχθεί κάτι παρόμοιο μελλοντικά. Ανάλογα την κάθε περίπτωση οι ενέργειες βάση των οποίων θα διεξαχθεί η έρευνα μπορεί να αλλάζουν πάραυτα γενικά ισχύει ότι για μια λεπτομερή και ολοκληρωτική αξιολόγηση μιας ανάλυσης αστοχίας είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί μια μεθοδευμένη σειρά βημάτων, όπως [1]:

Συλλογή ιστορικού και επιλογή δειγμάτων.

Προκαταρκτική εξέταση του κομματιού που αστόχησε (οπτικός έλεγχος και διατήρηση αρχείου).

Μη καταστροφικές δοκιμές.

Μηχανικές δοκιμές (συμπεριλαμβανομένης και δοκιμή σκληρότητας).

Επιλογή, αναγνώριση, διατήρηση ή καθαρισμός των δοκιμών (και σύγκριση με κομμάτια που δεν έχουν αστοχήσει).

Μακροσκοπικός έλεγχος και ανάλυση και φωτογραφικό αρχείο (επιφάνειες θραύσης, δευτερεύοντες ρωγμές και αλλά επιφανειακά φαινόμενα).

Μικροσκοπικός έλεγχος και ανάλυση (μπορεί να είναι απαραίτητη η ηλεκτρονική μικροσκοπία)

Επιλογή τμημάτων για μεταλλογραφία.

Εξέταση και ανάλυση των μεταλλογραφικών τμημάτων.

Προσδιορισμός του μηχανισμού αστοχίας.

Χημική ανάλυση (τοπικά, σε ρωγμές, σε σημεία με επιφανειακή διάβρωση αν υπάρχουν).

Ανάλυση των μηχανισμών θραύσης.

Δοκιμές υπό ελεγχόμενες συνθήκες (αν είναι απαραίτητο).

Ανάλυση όλων των στοιχείων, σχηματισμός συμπερασμάτων και καταγραφή της έκθεσης αστοχίας (συμπεριλαμβανομένων και των προτάσεων για την λύση του προβλήματος). [1]

Είναι απαραίτητο κάποιος να επενδύσει χρόνο για να μπορέσει να γίνει ορθά η εξακρίβωση και ανάλυση όλων των καταστάσεων που οδήγησαν στην αστοχία. Όταν ένα κομμάτι που αστόχησε παραλαμβάνεται για έλεγχο, ο αναλυτής καλείται να προετοιμάσει αμέσως δοκίμια χωρίς να επενδύει χρόνο στην μελέτη της κατάστασης, συνεπώς πολλές φορές οδηγείται σε αδιέξοδο σπαταλώντας χρόνο και κόπο. Όπως αναφέρθηκε η ακολουθία των ενεργειών μπορεί να διαφέρει από αστοχία σε αστοχία αναλόγως τα δεδομένα, παρόλα αυτά υπάρχουν στάδια τα οποία μπορεί να είναι κοινά από την μια περίπτωση στην άλλη. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί κανείς να ακολουθήσει τις ενέργειες αυτές αλλά με διαφορετική σειρά, όπως και να έχει για να δοθεί ένα σωστό αποτέλεσμα και μια ορθή λύση θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να χρησιμοποιηθούν όλα τα στάδια ή κάποια από αυτά. Ακολουθεί λίστα επεξήγησης για το κάθε στάδιο και ενέργειες που τυχόν πρέπει να γίνουν σε κάθε ένα από αυτά.

1.4.1 Συλλογή ιστορικού και επιλογή δειγμάτων

Αρχικά, η έρευνα της αστοχίας θα πρέπει να εστιάζει στην απόκτηση στοιχείων και λεπτομερειών όπως πληροφορίες που αφορούν την κατασκευή, την κατεργασία και την συντήρηση του αστοχούντος μηχανήματος ή κατασκευής και εν τέλη να γίνει προσπάθεια ένωσης των στοιχείων με σκοπό την επαναδημιουργία της, όσο γίνεται πιο πιστά στην πραγματικότητα, αλληλουχίας των γεγονότων που οδήγησαν στην αστοχία. Δεδομένα που συνδέονται με την κατασκευή του κομματιού μπορούν να χωριστούν σε: μηχανικές κατεργασίες όπως η κάμψη, μηχανουργικές κατεργασίες, στιλβωτικές και λειαντικές ενέργειες, θερμικές κατεργασίες όπως η βαφή, η επαναφορά, κατεργασίες συγκόλλησης και χημικές κατεργασίες οι οποίες πρέπει να πληροφορήσουν τον αναλυτή για όσον αφορά το καθαρίσμα ή την εφαρμογή επικαλύψεων με χημικές ενέργειες κλπ.

1.4.1.1 Ιστορικό

Η απόκτηση ενός πλήρους ιστορικού παίζει καθοριστικό ρόλο για την έρευνα της αστοχίας. Αν ο αναλυτής έχει στην διάθεση του όλα τα αρχεία με το ιστορικό πριν την αστοχία, το γεγονός αυτό διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την δουλειά του. Κατά την συγκέντρωση του ιστορικού μεγάλη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στις περιβαλλοντικές λεπτομέρειες, όπως οι θερμοκρασίες και οι διακυμάνσεις τους, λειτουργία σε διαβρωτικό περιβάλλον. Θα πρέπει να δοθεί προσοχή στα φορτία, στις κυκλικές φορτίσεις και στις υπερφορτώσεις. Τις περισσότερες φορές ο αναλυτής καλείται να εργαστεί έχοντας τμηματικές πληροφορίες για το ιστορικό του μηχανήματος, για αυτό θα πρέπει να είναι σε θέση με την δεξιότητα και την κρίση του να κρίνει την κατάσταση και να μην οδηγηθεί σε λάθος αποτέλεσμα.

1.4.1.2 Φωτογραφικό Αρχείο

Για να γίνει σωστά μια ανάλυση αστοχίας το φωτογραφικό αρχείο είναι πολύ σημαντικό, βέβαια είναι στην κρίση του αναλυτή αν κάθε περίπτωση αστοχίας χρειάζεται φωτογραφικό αρχείο. Μια λεπτομέρεια που στην αρχή του ελέγχου φαίνεται να μην παίζει πολύ σημαντικό ρόλο μπορεί αργότερα να διαπιστωθεί ότι έχει σοβαρές επιπτώσεις που οδήγησαν στην αστοχία. Είναι σημαντικό οι φωτογραφίες να έχουν πολύ καλή ποιότητα ώστε οτιδήποτε να μπορεί να γίνει αντιληπτό από τον αναλυτή, ενώ κατά την φωτογράφιση κοντά στο κομμάτι πρέπει να τοποθετείται μια ένδειξη του μεγέθους όπως ένα κέρμα, ή ένας χάρακας.

1.4.1.3 Επιλογή δειγμάτων

Τα δόκιμα θα πρέπει να επιλύονται πριν ξεκινήσει η έρευνα και ειδικά σε περιπτώσεις όπου η έρευνα θέλει αρκετό χρόνο. Ο αναλυτής θα πρέπει να είναι σε θέση να κρίνει και να επιλέξει εκείνα τα δοκίμια τα οποία θα απεικονίζουν επαρκώς και με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την αστοχία. Συχνά θα πρέπει να γίνει έλεγχος και σε κομμάτια που φέρουν μικρές ή δευτερεύουσες ζημιές. Μερικές φορές είναι απαραίτητο να γίνει σύγκριση των κομματιών με άλλα που δεν έχουν αστοχήσει, για να ξεκαθαριστεί αν οι αιτίες προέρχονται από την συντήρησή τους, ή από κάποιο λάθος στην κατασκευή τους. Επιπροσθέτως σε περιπτώσεις που η αστοχία περιλαμβάνει διάβρωση από κάποιο υγρό που βρισκόταν σε επαφή, τότε ως δείγμα θεωρείται και το υγρό και θα πρέπει να γίνει χημική ανάλυση και σε αυτό.

1.4.1.4 Ερευνά στην περιοχή

Σε μερικές περιπτώσεις ο αναλυτής για να έχει καλύτερη εικόνα της αστοχία καλείται να επισκεφθεί την περιοχή στην οποία συναινει. Το σημαντικότερο πράγμα στο σημείο του συμβάντος είναι το γεγονός ότι πριν από οποιαδήποτε άλλη ενέργεια, η θέση καθενός από τα κομμάτια της αστοχίας πρέπει να καταγράφει. Μια τέτοια καταγραφή απαιτεί συνήθως εκτεταμένο φωτογραφικό υλικό και ταξινόμηση των κομματιών. Είναι καλό να υπάρχουν αρχεία όπου τα κομμάτια είναι καταγεγραμμένα έτσι, ώστε αν σε περίπτωση λείπει ένα κομμάτι από την περιοχή της αστοχίας να γίνει γνωστό στον αναλυτή σύντομα. Επίσης πολλές φορές υπάρχει περίπτωση να γίνει εξέταση κάποιων τμημάτων στην περιοχή του ατυχήματος παίρνοντας αντίγραφα επιφανειών (replica) ή παίρνοντας μετρήσεις σκληρότητας με κάποιο φορητό σκληρόμετρο.

1.4.2 Προκαταρκτικός έλεγχος

Το αστοχές κομμάτι, συμπεριλαμβανομένων όλων των θραυσμάτων και τμημάτων του, θα πρέπει πριν οποιοδήποτε καθαρισμό να υποβληθεί σε διεξοδικό μακροσκοπικό έλεγχο. Σε πολλές περιπτώσεις το χόμα και οι βρωμιές που βρίσκονται στα πλάγια της επιφάνειας που αστόχησε δηλώνουν την αιτία της αστοχίας ή δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την αλληλουχία των γεγονότων. Στην διαδικασία του προκαταρκτικού ελέγχου πλαισιώνονται ενέργειες όπως η μακροσκοπική εξέταση και η φωτογράφιση των επιφανειών θραύσης που σε κάθε περίπτωση μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες.

1.4.2.1 Μακροσκοπικός έλεγχος

Ο προκαταρκτικός έλεγχος θα πρέπει να ξεκινήσει με τον μακροσκοπικό έλεγχο των κομματιών που αστόχησαν, με γυμνό μάτι. Το ανθρώπινο μάτι έχει την δυνατότητα να εστιάζει ταυτόχρονα σε πολλά σημεία, να αντιληφθεί την αλλαγή χρωμάτων και λεπτομερειών πράγμα που κάποιο οπτικό ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο δεν μπορεί να αντιληφθεί. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στις επιφάνειες θραύσης καθώς και στην κατεύθυνση που έχουν κινηθεί. Όλες οι διαστάσεις των κομματιών πρέπει να καταγράφουν και να αρχειοθετηθούν. Δεν μπορεί κάποιος να εγγυηθεί ότι η εξέταση θα γίνει όσο το δυνατόν πιο λεπτομερής αφού τις περισσότερες φορές στοιχεία ή τμήματα που ενώ είναι παρόντα στην περιοχή του συμβάντος μπορεί να μην γίνουν αντιληπτά από τον αναλυτή.

1.4.2.2 Φωτογράφιση επιφανειών θραύσης

Όταν η αιτία της αστοχίας είναι η θραύση κάποιων εξαρτημάτων, τότε το επόμενο βήμα του προκαταρκτικού ελέγχου είναι η φωτογράφιση ολόκληρου του τομέα που έλαβε χώρα η θραύση, συμπεριλαμβανομένων και των σπασμένων τμημάτων.

1.4.3 Μη Καταστρεπτικές Δοκιμές

Οι έλεγχοι και οι δοκιμές που εφαρμόζονται στα δοκίμια για την έρευνα και ανάλυση της αστοχίας χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

- Στις καταστρεπτικές δοκιμές
- Στις μη καταστρεπτικές δοκιμές

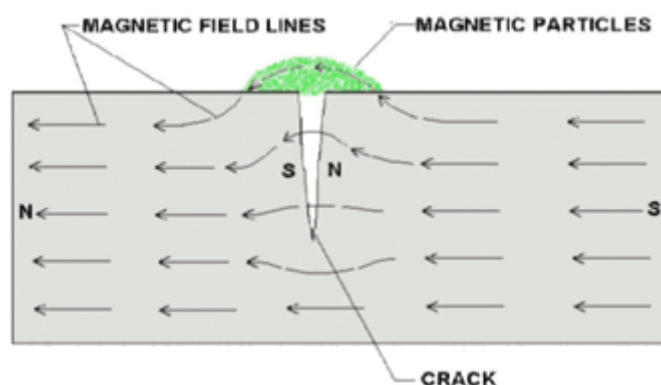
Στις καταστρεπτικές δοκιμές ανήκουν οι δοκιμές στις οποίες η εξαγωγή αποτελεσμάτων προϋποθέτει την καταστροφή του εξαρτήματος όπως πχ εφελκυσμός, κάμψη κλπ. Στους μη καταστρεπτικούς ελέγχους (ΜΚΕ) η αλλιώς Non - Destructive Testing (NDT) ανήκουν οι δοκιμές που μπορούν να ανιχνεύσουν ατέλειες κατασκευής, συγκόλλησης, χύτευσης χωρίς να καταστρέφουν το υλικό.

Παρόλο που πολλές φορές χρησιμοποιούνται ως εργαλεία ποιοτικού ελέγχου πολλές μη καταστρεπτικές δοκιμές μπορούν να παίξουν πρωταρχικό ρόλο στην ανάλυση μιας αστοχίας: μέθοδος μαγνητικών σωματιδίων, μέθοδος διεισδυτικών υγρών, υπέρηχοι και πολλές φορές η μέθοδος των δινορευμάτων. Όλες οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν τυχόν επιφανειακές ρωγμές ή ασυνέχειες. Οι ραδιογραφίες χρησιμοποιούνται συνήθως για την εύρεση ατελειών και ασυνεχειών στο εσωτερικό του εξαρτήματος.

1.4.3.1 Μέθοδος μαγνητικών σωματιδίων

Η μέθοδος αυτή MPI (Magnetic Particle Inspection) χρησιμοποιεί τα μαγνητικά πεδία για τον εντοπισμό τυχόν επιφανειακών και υποεπιφανειακών ασυνεχειών στα σιδηρομαγνητικά υλικά όπως σιδηρούχα κράματα, κράματα νικελίου και κοβαλτίου. Σε κράματα αλουμινίου, χαλκού, τιτανίου, μαγνησίου και σε ωστενιτικούς χάλυβες η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Όταν το υλικό ή το τμήμα που θα εξεταστεί μαγνητίζεται, ασυνέχειες οι οποίες βρίσκονται κάθετα στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου θα οδηγήσουν στην δημιουργία ενός σημείου διαρροής της μαγνητικής ροής, ακριβώς στο σημείο στο οποίο βρίσκονται. Το σημείο αυτό και κατ' επέκταση η ασυνέχεια γίνεται αντιληπτή από μικρά λεπτά φερομαγνητικά σωματίδια που εφαρμόζονται πάνω στην επιφάνεια και τα οποία συγκρατούνται σε εκείνο το σημείο

και δημιουργούν, αναλόγως το μέγεθος της ασυνέχειας, αντίστοιχα σύνολα σωματιδίων στην επιφάνεια του κομματιού. Αυτό ονομάζεται μαγνητική διαρροή, δηλαδή στην αρχή και στο τέλος της ατέλειας ή ασυνέχειας δημιουργούνται τοπικά νότιοι (S) και βόρειοι (N) πόλοι (Εικόνα 1.2). Η διαρροή εξαρτάται από τον αέρα που βρίσκεται μέσα στις ασυνέχειες είτε αυτές είναι ρωγμές είτε είναι πόροι. Συχνά συνδυαστικά με τα σωματίδια γίνεται χρήση και μιας φθορίζουσας ουσίας ώστε οι ασυνέχειες που δεν φαίνονται με γυμνό μάτι, να φαίνονται κάτω από υπεριώδες φως. Τα μαγνητικά πεδία μπορούν να δημιουργηθούν (a) διαρρέοντας το κομμάτι που θα εξετασθεί, με ρεύμα μεγάλης έντασης, (b) χρησιμοποιώντας έναν μαγνητικό ζυγό, (c) χρησιμοποιώντας ένα μαγνητικό πηνίο.



Εικόνα 1.2: Αναπαράσταση του μηχανισμού λειτουργίας της μεθόδου των μαγνητικών σωματιδίων. [7]

Μεταξύ των πλεονεκτημάτων της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- a) Είναι η καλύτερη και πιο αξιόπιστη τεχνική για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών, ειδικά εκείνων που είναι λεπτές ή εκείνων που είναι γεμάτες με ξένο υλικό.
- b) Οι τεχνικές και οι μέθοδοι είναι εύκολες στην κατανόηση και η διαδικασία είναι γρήγορη, απλή και δεν κοστίζει.
- c) Τα σημάδια φαίνονται εκτενώς στην επιφάνεια του υλικού και αντικατοπτρίζουν την εικόνα της ασυνέχειας. Δεν υπάρχει κάποια ένδειξη ή κάποια ηλεκτρονική έξοδος που να χρειάζεται να βαθμονομηθεί.
- d) Δεν υπάρχει σχεδόν κανένας περιορισμός στο μέγεθος του τμήματος που θα ελεγχθεί.

- e) Δεν είναι απαραίτητος ο καθαρισμός της επιφάνειας πριν την δοκιμή και λειτουργεί ακόμα και αν υπάρχει μια λεπτή στρώση επικάλυψης μογαίας ή άλλων μη μεταλλικών υλικών.

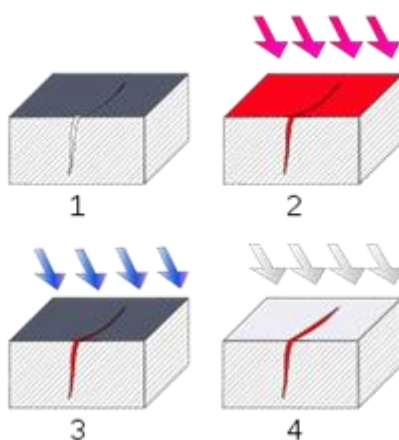
Η μέθοδος υπόκειται στους εξής περιορισμούς:

- a) Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε υλικά που είναι μαγνητικά.
- b) Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητος ο απομαγνητισμός των διάφορων τμημάτων μετά την δοκιμή.
- c) Δεν είναι απόλυτα έμπιστη για τον εντοπισμό ασυνεχειών που βρίσκονται ολοκληρωτικά κάτω από την επιφάνεια του υλικού.
- d) Το μαγνητικό πεδίο θα πρέπει να είναι κάθετο στην διεύθυνση της ασυνέχειας ή έστω σε γωνία 45° . Αυτό συμβαίνει γιατί μια ασυνέχεια είναι ανιχνεύσιμη όταν τέμνει το μαγνητικό πεδίο σε γωνία μεγαλύτερη από 45° ενώ η μαγνητική ροή είναι μέγιστη στο σημείο των 90° .
- e) Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα σημεία που υπάρχει ηλεκτρική επαφή με το υλικό, ώστε να αποτραπούν τυχόν αύξηση της θερμοκρασίας ή καταστροφή των επιφανειών.

1.4.3.2 Διεισδυτικά Υγρά

Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών χρησιμοποιείται και αυτή για την ανίχνευση επιφανειακών ασυνεχειών στο υλικό. Χρησιμοποιείται κυρίως, αλλά όχι μόνο, σε μη μαγνητικά υλικά στα οποία η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων δεν μπορεί να λειτουργήσει. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την εξάπλωση ενός διεισδυτικού υγρού στην επιφάνεια του δείγματος. Τα διεισδυτικά υγρά είναι ουσίες που έχουν την ικανότητα να διεισδύουν μέσα σε μικρές ρωγμές και ασυνέχειες της τάξεως του $1\mu\text{m}$, στην επιφάνεια του δείγματος. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο τριχοειδές φαινόμενο, στην ιδιότητα δηλαδή των υγρών αυτών να ρέουν σε πολύ στενά τμήματα χωρίς την βοήθεια εξωτερικών δυνάμεων όπως η βαρύτητα. Εφόσον το δείγμα καλυφθεί με το υγρό αυτό, όλο το πλεονάζον υγρό αφαιρείται και εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια του δείγματος ένα δεύτερο υγρό ή σκόνη “εμφάνισης” (developer) το οποίο έχει την δυνατότητα να απορροφά το πρώτο υγρό από τις ρωγμές που βρίσκονται στην επιφάνεια με αποτέλεσμα στο σημείο της ασυνέχειας να δημιουργείται μια κηλίδα διαφορετικού χρώματος (Εικόνα 1.3). Το υγρό που εφαρμόζεται στην αρχή έχει

συνήθως ένα πολύ έντονο χρώμα ή περιέχει φθορίζοντα σωματίδια τα οποία κάτω από υπεριώδες φως αποκαλύπτουν τα σημεία που υπάρχουν ασυνέχειες. Πολλές φορές επειδή το δείγμα ή το τμήμα στο οποίο θα διεξαχθεί ο έλεγχος μπορεί να έχει κάποιες επιφανειακές ανωμαλίες (κοιλότητες), μπορεί να δοθεί η εντύπωση ότι σε εκείνο το σημείο υπάρχει κάποιου είδους ασυνέχεια και να βγει έτσι κάποιο λάθος συμπέρασμα. Είναι απαραίτητο σε κάθε περίπτωση να υπάρχει ο κατάλληλος έλεγχος, όσον αφορά την επιφάνεια του δείγματος, πριν την δοκιμή καθώς και ο κατάλληλος εξοπλισμός ο οποίος περιλαμβάνει διεισδυτικά υγρά, καθαριστικούς διαλύτες καθώς και πηγές φωτός στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται φθορίζοντα σωματίδια.



Εικόνα 1.3 Αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας των διεισδυτικών υγρών, (1) Περιοχή με ρηγματώση, (2) Το διεισδυτικό υγρό εφαρμόζεται στην επιφάνεια, (3) Το πλεονάζον υγρό σκουπίζεται, (4) Εφαρμογή της σκόνης εμφάνισης. [8]

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υλικό μη μαγνητικά.
- Είναι αρκετά οικονομική μέθοδος.
- Όλος ο εξοπλισμός είναι φορητός και οι δοκιμές μπορούν να γίνουν στο πεδίο.
- Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι αρκετά εύκολη και γρήγορη.

Περιορισμοί της μεθόδου:

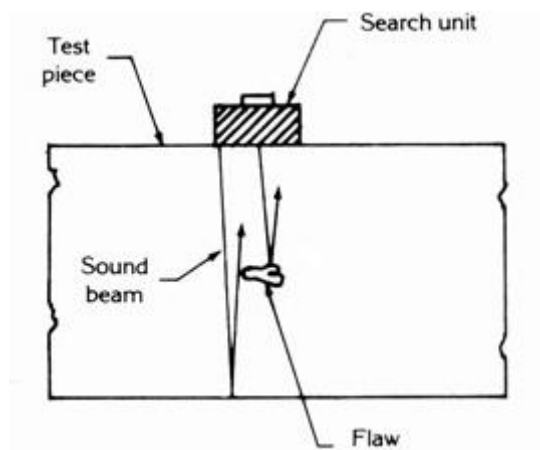
- Οποιαδήποτε ασυνέχεια ή ρωγμή θα πρέπει να βρίσκεται στην επιφάνεια έτσι ώστε το υγρό να ισορρήσει σε αυτή.
- Τα προς εξέταση τμήματα θα πρέπει να καθαριστούν πριν την δοκιμή αλλά και μετά διότι το διεισδυτικό υγρό μπορεί να διαβρώσει το μέταλλο.

- c) Οποιαδήποτε επιφανειακή επικάλυψη μπορεί να εμποδίσει τον εντοπισμό κάποιας ασυνέχειας.
- d) Το διεισδυτικό υγρό μπορεί να μεταποιήσει τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης σε εκείνο το σημείο.
- e) Η μέθοδος δεν ενδείκνυται για χρήση σε προϊόντα κονιομεταλλουργίας ή σε άλλα πορώδη υλικά.

1.4.3.3 Υπέρηχοι

Η μέθοδος υπερήχων βασίζεται σε ηχητικά κύματα πολύ μεγάλων συχνοτήτων τα οποία μεταδίδονται μέσα στο μέταλλο και ανακλώνται σε οποιοδήποτε εμπόδιο συναντήσουν στην επιφάνεια του υλικού καθώς και σε οποιαδήποτε ρωγμή ή ασυνέχεια στο εσωτερικό του υλικού. Οι υπέρηχοι είναι μηχανικά κύματα με συχνότητα που κυμαίνεται από 20 KHz έως 20000 KHz τα οποία λόγω της υψηλής συχνότητας τους μεταδίδονται μέσα στα υλικά και επιστρέφουν πίσω δίνοντας κάποιο αποτέλεσμα σε μια οθόνη ενός παλμογράφου. Οι υπέρηχοι προκαλούνται από κάποια πηγή διέγερσης. Στην περίπτωση του ελέγχου των υλικών η παραγωγή των υπερήχων βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, την ιδιότητα δηλαδή κάποιων υλικών (κυρίως κρυσταλλικών υλικών αλλά και μερικών κεραμικών) να υπόκεινται παραμορφώσεις όταν σε αυτά ενεργεί ηλεκτρική τάση. Όταν τα υλικά αυτά παραμορφώνονται προκαλούν μηχανικές ταλαντώσεις που με την σειρά τους δημιουργούν μηχανικά κύματα υψηλών συχνοτήτων τα οποία διαδίδονται εντός της ύλης. Οι υπέρηχοι έχουν την δυνατότητα να ανακλώνται σε σημείο που υπάρχει παγιδευμένος αέρας (ρωγμές, πόροι) και σε οποιαδήποτε άλλη ανωμαλία στο εσωτερικό του υλικού με αποτέλεσμα να εντοπίζονται τα σημεία στα οποία βρίσκονται οι ασυνέχειες (Εικόνα 1.4). [5]

Η εφαρμογή των υπερήχων είναι περιορισμένη στην ανάλυση αστοχίας διότι η ακριβής ερμηνεία των αποτελεσμάτων βασίζεται σε πρότυπες προδιαγραφές που χρειάζονται για την απομόνωση των πολλών μεταβλητών. Παρόλα αυτά ρωγμές, στρωματοποίησης, συρρίκνωσης, κοιλότητες, πόροι και άλλες ασυνέχειες οι οποίες δημιουργούν επιφανειακές ανακλάσεις μπορούν να εντοπιστούν πολύ εύκολα. Οι ενσωματώσεις και άλλες ανομοιογένειες μπορούν και αυτές να εντοπισθούν παράγοντας μερική ανάκλαση ή διασπορά των κυμάτων.



Εικόνα 1.4: Αναπαράσταση μηχανισμού λειτουργίας υπέρηχων.[9]

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου περιλαμβάνει τα εξής :

- a) Είναι αρκετά γρήγορη και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα
- b) Μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια πάχος τοιχωμάτων και γενικότερα διαστάσεις του εξαρτήματος.
- c) Μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια πολλά εσωτερικά ελαττώματα.
- d) Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα μεταλλικά υλικά.

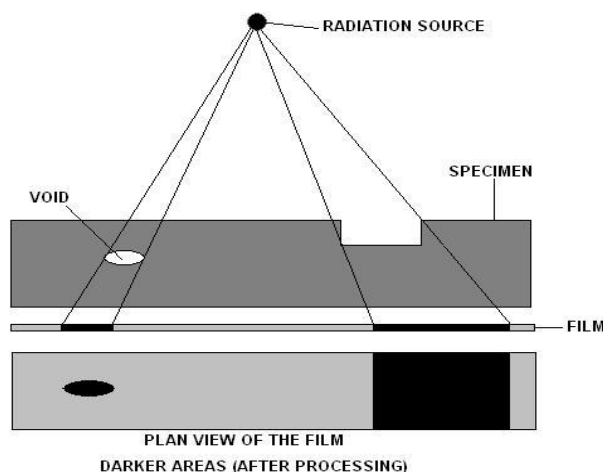
Τα μειονεκτήματα και οι περιορισμοί της μεθόδου είναι :

- a) Η διαδικασία απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή από εξειδικευμένους τεχνικούς.
- b) Είναι απαραίτητη η εκτεταμένη τεχνική γνώση για την ανάπτυξη μεθόδων επιθεώρησης.
- c) Δυσκολία επιθεώρησης σε υλικά τα οποία φέρουν μεγάλη τραχύτητα επιφάνειας, έχουν ακανόνιστη μορφή, είναι μικρά ή λεπτά και μη ομοιογενή.
- d) Ασυνέχειες οι οποίες είναι παρόντες ακριβώς κάτω από την επιφάνεια μπορεί και να μην είναι ανιχνεύσιμες.
- e) Είναι απαραίτητο να υπάρχουν καλώδια τα οποία παρέχουν αποτελεσματική μεταφορά των υπερήχων μεταξύ της πηγής και του δείγματος.
- f) Πρέπει να υπάρχουν πρότυπα (reference standards) τόσο για την βαθμονόμηση όσο και για τον χαρακτηρισμό των ατελειών.

1.4.3.4 Ραδιογραφία

Η μέθοδος της ραδιογραφίας χρησιμοποιεί ακτίνες-X ή ακτίνες-γ, οι οποίες κατευθύνονται διαμέσου του δείγματος σε ένα φωτογραφικό φιλμ. Αφού το φιλμ

εμφανισθεί μπορεί να εξετασθεί τοποθετώντας το μπροστά από μια πηγή φωτός. Η ένταση του φωτός που περνάει μέσα από στο φιλμ είναι ανάλογη της πυκνότητας του δείγματος και του μήκους της διαδρομής της ακτινοβολίας. Οπότε, οι περιοχές με περισσότερο φως που φαίνονται πάνω στο φιλμ αντιστοιχούν σε μια πυκνότερη περιοχή του υλικού ενώ οι μαυρισμένες περιοχές σηματοδοτούν μια ρωγμή ή ένα ελάττωμα που βρέθηκε από την ακτινοβολία. Συγκεκριμένα όταν η ακτινοβολία πέφτει πάνω στο φιλμ έχει ως αποτέλεσμα να το μαυρίζει. Τοποθετώντας το υλικό ενδιάμεσα στην πηγή και στο φιλμ, το ίδιο λειτουργεί σαν αντίσταση στην ακτινοβολία η οποία και καθυστερεί να το διαπεράσει. Όταν μέσα στο υλικό βρίσκεται ένα ελάττωμα στο οποίο υπάρχουν εγκλείσματα αέρα τότε, την περιοχή αυτή η ακτινοβολία τη διαπερνά πολύ πιο εύκολα μαυρίζοντας έτσι το συγκεκριμένο σημείο του φιλμ. Έτσι πάνω στο φιλμ σχηματίζονται ακριβώς τα σημεία στα οποία υπάρχουν ελαττώματα (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας ραδιογραφίας. [10]

Τα βασικά πλεονεκτήματα της ραδιογραφίας είναι τα εξής:

- Μπορούν να ανιχνεύσουν εσωτερικές ασυνέχειες σε πολλά διαφορετικά υλικά.
- Παρέχουν μόνιμο αρχείο με την ανάλυση ενός δείγματος στην μορφή φωτογραφικού φιλμ.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Όσον αφορά την ραδιογραφία με ακτίνες-γ απαιτείται η ύπαρξη ισοτόπου το οποίο και εκπέμπει ακτινοβολία.
- Ακριβός και πολύ εξειδικευμένος εξοπλισμός.

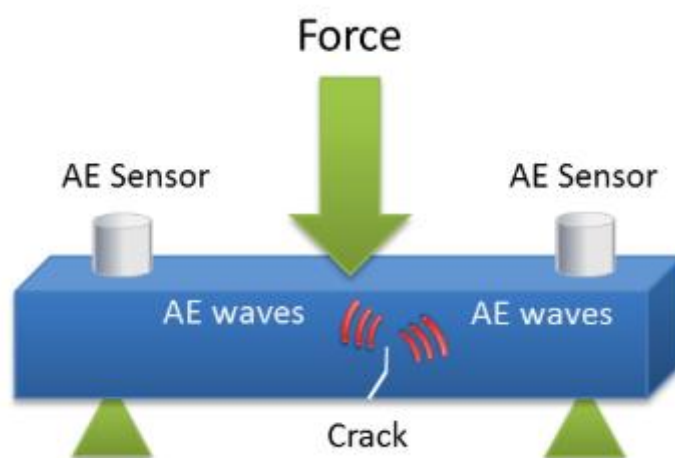
- c) Για την εμφάνιση του φιλμ απαιτείται ξεχωριστός εξοπλισμός το είδος του οποίου επηρεάζει πολύ την ποιότητα της.
- d) Πρέπει να τηρούνται πιστά τα μέτρα προστασίας διότι η ακτινοβολία αποτελεί εξαιρετικό κίνδυνο για όλους τους ζωντανούς οργανισμούς.

1.4.3.5 Ακουστική εκπομπή

Ο έλεγχος μέσω ακουστικής εκπομπής ανιχνεύει και αναλύει ηχητικά κύματα τα οποία παράγονται από τις ασυνέχειες του υλικού όταν σε αυτό εφαρμοστεί μηχανική τάση. Η ορθή ανάλυση αυτών των σημάτων μπορεί να παρέχει πληροφορίες που αφορούν την τοποθεσία και την μορφή των ασυνεχειών που βρίσκονται μέσα στο δείγμα (Εικόνα 1.6). Μερικές εφαρμογές τις μεθόδου αυτής είναι :

- a) Συνεχής παρακολούθηση δοχείων πίεσης για τον εντοπισμό τυχόν απωλειών.
- b) Εντοπισμός έναρξης θραύσης από κόπωση σε αεροσκάφη.
- c) Παρακολούθηση της σύντηξης κατά την διαδικασία συγκόλλησης.
- d) Εντοπισμός της έναρξης ρηγμάτωσης λόγω καταπόνησης και διάβρωσης σε υπερευαίσθητες κατασκευές.
- e) Ως εκπαιδευτικό εργαλείο για την έρευνα των μηχανισμών θραύσης και την συμπεριφορά των υλικών.

Όλες οι πληροφορίες που μπορούν να αποσπαστούν από την μέθοδο αυτή μπορεί να είναι πολύ χρήσιμες για την έρευνα της αστοχίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση των καταπονήσεων. Πηγές που μπορούν να δημιουργήσουν ηχητικά κύματα μέσα στο υλικό μπορούν να είναι οι τοπικές κινήσεις όπως η διάδοση ρωγμών, η ξαφνική αλλαγή των ορίων των κόκκων και η δημιουργία διδυμών.



Εικόνα 1.6: Ακουστική εκπομπή λόγω της έναρξης ρηγμάτωσης μέσα στο υλικό [11]

1.4.3.6 Δινορεύματα

Η μέθοδος των δινορευμάτων (Eddy Currents) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα υλικά τα οποία είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού. Εάν ένα πηνίο που μεταφέρει εναλλασσόμενο ρεύμα τοποθετηθεί κοντά ή γύρω από την επιφάνεια που ελέγχεται, τότε θα δημιουργήσει δινορεύματα μέσα στο υλικό λόγω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Τα δινορεύματα αυτά παράγουν μαγνητικό πεδίο το οποίο αντιτίθεται προς το πεδίο του πηνίου και επιδρά στα χαρακτηριστικά του με αποτέλεσμα το πηνίο αυτό να δίνει ένα σήμα/ένδειξη εξόδου. Οι ρωγμές και οι ασυνέχειες μέσα στο υλικό προκαλούν παραμορφώσεις στο μαγνητικό πεδίο των δινορευμάτων, τα οποία προκαλούν παραμόρφωση στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του πηνίου η οποία λαμβάνεται επαγωγικά. Όταν η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που παράγεται από τα πηνία εισέλθει μέσα στο υλικό που εξετάζεται, ένα μέρος της μετατρέπεται σε θερμότητα και το υπόλοιπο παίρνει την μορφή ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Έτσι λοιπόν ανάλογα το υλικό που εξετάζεται αλλάζουν και οι ιδιότητες του πηνίου. Η αλλαγή αυτή μπορεί να γίνει αντιληπτή εάν συνδεθούν τα κατάλληλα ηλεκτρικά όργανα.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- a) Επιφανειακά και μη επιφανειακά ελαττώματα μπορούν να ανιχνευθούν.
- b) Δεν χρειάζονται ιδιαίτερη εκπαίδευση.
- c) Η διαδικασία μπορεί να είναι προσαρμοστική ώστε να υπάρχει συνεχής παρακολούθηση.
- d) Η διαδικασία μπορεί, κατά ένα μέρος να αυτοματοποιηθεί και να υπάρχουν πολύ γρήγορα αποτελέσματα.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν τα εξής:

- a) Το βάθος διείσδυσης είναι αρκετά ρηχό και ανιχνεύονται μόνο υπό επιφανειακές ασυνέχειες.
- b) Τα υλικά υπό εξέταση θα πρέπει να είναι αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος.
- c) Τα αποτελέσματα επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες.
- d) Απαιτείται η ύπαρξη προτύπων αναφοράς.

1.4.4 Μηχανικές Δοκιμές

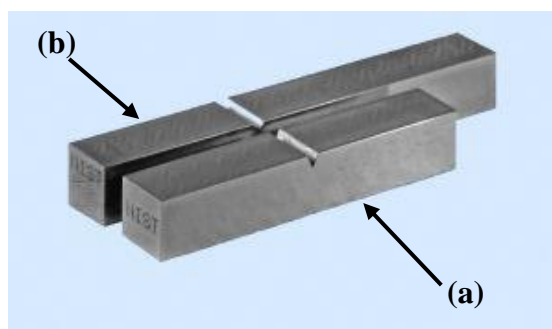
Η δοκιμή σκληρότητας είναι η πιο απλή μέθοδος των μηχανικών δοκιμών και αποτελεί πολύ σημαντικό εργαλείο για τον αναλυτή. Μεταξύ των πολλών εφαρμογών της, η δοκιμή σκληρότητας μπορεί να εφαρμοστεί στην αξιολόγηση της θερμικής κατεργασίας, να παρέχει πληροφορίες για την εφελκυστική αντοχή του υλικού, να εντοπίσει σημεία εργοσκληρυνσης τα οποία δημιουργήθηκαν λόγω της υψηλής θερμοκρασίας ή εξανθράκωσης. Η δοκιμή σκληρότητας πολλές φορές αποτελεί μη καταστρεπτική μέθοδο εκτός και αν απαιτείται προετοιμασία ειδικού δοκιμίου για μέτρηση της σκληρότητας, όπως στην περίπτωση μικροσκληρότητας. Οι φορητές συσκευές σκληρομέτρησης είναι πολύ χρήσιμες για μετρήσεις στο πεδίο αλλά η μέθοδος που χρησιμοποιείται κάθε φορά θα πρέπει να είναι η σωστή.

Άλλες μηχανικές δοκιμές είναι επίσης χρήσιμες για την επιβεβαίωση ότι το αστοχές υλικό είναι σύμφωνο με την προδιαγραφή του. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η ποιότητα της επιφάνειας του εξαρτήματος. Όταν είναι επιτρεπτό, δοκιμές εφελκυσμού και δοκιμές κρούσης πρέπει να πραγματοποιηθούν δεδομένου ότι υπάρχει αρκετό υλικό για την δημιουργία δοκιμίων. Ο έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού μέσω της δοκιμής του εφελκυσμού συμπεριλαμβάνει τον τεμαχισμό του δείγματος και την μηχανουργική κατεργασία αυτού, με σκοπό να προκύψουν δοκίμια εφελκυσμού (Εικόνα 1.7). Σε όλες τις φάσεις της εφαρμογής, από τον τεμαχισμό μέχρι την μέτρηση των τελικών διαστάσεων είναι σημαντικό να υπάρχει φωτογραφικό αρχείο. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να καταλάβει κανείς αν το αστοχές δείγμα έχει εκτεθεί σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως για παράδειγμα η αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων ενός τμήματος του εξαρτήματος λόγω έκθεσης σε μεγάλες θερμοκρασίες που προκλήθηκαν λόγω φωτιάς. Έτσι λοιπόν για την παραγωγή δοκιμίων εφελκυσμού θα πρέπει να επιλεγεί μια περιοχή η οποία δεν έχει εκτεθεί σε ακραίες συνθήκες έτσι ώστε ο έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού να γίνει σωστά και να μην προκύψει κάποιο λανθασμένο συμπέρασμα.



Εικόνα 1.7: Επίπεδα και κυλινδρικά δοκίμια εφελκυσμού. [12]

Ο αναλυτής αστοχίας θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού. Αν η δοκιμή εφελκυσμού καταλήξει στο γεγονός ότι το υλικό έχει όριο θραύσης 5 – 10 % χαμηλότερα από αυτό που αναφέρει η προδιαγραφή του, αυτό δεν σημαίνει ότι η διαφορά αυτή ευθύνεται που το υλικό αστόχησε. Επιπλέον θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι εργαστηριακές δοκιμές πάνω σε μικρά δείγματα σε καμία περίπτωση δεν αντικατοπτρίζουν την συμπεριφορά μιας πολύ μεγαλύτερης διάταξης. Για παράδειγμα ενώ είναι πολύ πιθανό να συμβεί μια ψαθυρή θραύση σε μια διάταξη, όταν αυτή βρίσκεται σε μια λογική θερμοκρασία, η δοκιμή κρούσης μέσα σε εργαστήριο με δοκίμια Charpy ή Izod (Εικόνα 1.8) δείχνει ότι αυτή η μεταβατική θερμοκρασία που κάνει το υλικό να συμπεριφέρεται ψαθυρά είναι κάτω από τους -18°C . Οι συνέπειες που έχει το μέγεθος στην κόπωση, στην διάβρωση και στην απορρόφηση υδρογόνου στο υλικό είναι ιδιαίτερης σημασίας και γενικά ισχύει ότι οποιαδήποτε ισχυροποίηση έχει το υλικό σε κάποιους παράγοντες αστοχίας μειώνεται όσο το μέγεθος αυξάνεται.



Εικόνα 1.8: Αναπαράσταση δοκιμίων κρούσης, (a) μέθοδος Charpy και (b) μέθοδος Izod[13].

Περιστασιακά οι μηχανικές δοκιμές μπορεί να είναι αποδεκτές για τα περισσότερα δείγματα αλλά μπορεί να διαφοροποιούνται σε κάποιο σημείο που το υλικό εμφανίζει μια ασυνέχεια ή μια κοιλότητα. Τα προϊόντα που έχουν προκύψει από χύτευση μπορεί

να διαφέρουν στις μηχανικές τους ιδιότητες από σημείο σε σημείο, λόγω της στερεοποίησης τους. Για αυτό τον λόγο η περιοχή από την οποία κάποιος θα επιλέξει για να δημιουργήσει δοκίμιο, είναι πολύ σημαντική. Ο έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών χύτευσης πραγματοποιείται τμηματικά, λαμβάνοντας δηλαδή δείγματα από πολλά σημεία και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα. Επιπλέον οι κατεργασίες επικάλυψης ή επιφανειακές βαφές αποτελούν παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

1.4.5 Επιλογή Διατήρηση Καθαρισμός

Η κατάλληλη επιλογή, η διατήρηση και ο καθαρισμός των επιφανειών θραύσης είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού μπορούν να εμποδίσουν την καταστροφή ή απόκρυψη σημαντικών στοιχείων για την αστοχία. Οι επιφάνειες θραύσης μπορεί να έχουν υποστεί μηχανική ή χημική ζημιά, από διάφορα σώματα που προκλήθηκαν κατά την θραύση και προσκρούστηκαν πάνω τους, γεγονός που συμβαίνει ή κατά την διάρκεια που αστόχησε το εξάρτημα ή κατά την μεταφορά του. Συνήθως οι επιφάνειες θραύσης μπορούν να προστατευθούν με την χρήση κάποιου βαμβακερού υφάσματος. Σε πολλές περιπτώσεις η ενέργεια αυτή λειτουργεί με αρνητικό αποτέλεσμα αφού το ύφασμα που τοποθετείται μπορεί να αφαιρέσει από την επιφάνεια κάποιο σημαντικό στοιχείο που να αφορά την αιτία της θραύσης. Η επαφή της επιφάνειας με το χέρι θα πρέπει να αποφεύγεται και δεν πρέπει να γίνει καμία επιχείρηση ένωσης δυο επιφανειών θραύσης, πράγμα που δεν φέρει κανένα αποτέλεσμα πάρα προκαλεί ζημιά στις επιφάνειες. Ειδικό χαρτί που περιορίζει την διάβρωση θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την προστασία των επιφανειών.

Η ζημιά που έχει προκληθεί σε μια επιφάνεια θραύσης από χημική διάβρωση μπορεί να αποτραπεί με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα, επειδή η αναγνώριση ενός ξένου υλικού πάνω σε μια επιφάνεια θραύσης, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό στοιχείο στον προσδιορισμό της αιτίας της αστοχίας, πολλά εργαστήρια δεν είναι σύμφωνα στο να χρησιμοποιούν επικαλύψεις που περιορίζουν την διάβρωση, πάνω στις επιφάνειες θραύσης. Όταν είναι εφικτό το δείγμα θα πρέπει να ξηραθεί φυσώντας το με αέρα, ο οποίος θα διώξει τα περιττά σωματίδια, και αμέσως μετά να τοποθετηθεί σε ξηραντήριο παρουσία μιας αφυγραντικής ουσίας. Παρόλα αυτά οι καθαρές επιφάνειες θραύσης θα πρέπει να επικαλυφθούν με προστατευτικές επικαλύψεις, όταν δεν μπορούν να προστατευθούν αλλιώς, ειδικά στην περίπτωση που μια κατασκευή έχει αστοχήσει και χρειάζεται να περάσουν μερικές μέρες για την εξαγωγή δοκιμίων προς ανάλυση.

1.4.5.1 Καθαρισμός

Ο καθαρισμός των επιφανειών θραύσης θα πρέπει να αποφεύγεται, αλλά είναι απαραίτητος στην περίπτωση που θα γίνει έλεγχος με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και μακροσκοπικός έλεγχος. Ο καθαρισμός θα πρέπει να μεταβαίνει σταδιακά χρησιμοποιώντας τη λιγότερη δραστική μέθοδο πρώτη κάθε φορά. Ο καθαρισμός είναι σημαντικός για την απομάκρυνση θραυσμάτων και βρωμιάς. Διαδικασίες καθαρισμού είναι οι εξής:

Καθαρισμός με την χρήση πεπιεσμένου αέρα ή βούρτσας με μαλακή τρίχα, η χρήση ανόργανων ουσιών για τον καθαρισμό είτε με βύθιση είτε με ψεκασμό, η αντιμετώπιση με ήπια οξέα ή αλκαλικά διαλύματα (ανάλογα το υλικό), ο καθαρισμός με υπερήχους. Ο καθαρισμός με αντίγραφο οξικής κυτταρίνης είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους καθαρισμού ειδικά στην περίπτωση που η επιφάνεια της θραύσης έχει διαβρωθεί. Μια λωρίδα οξικής κυτταρίνης πάχους περίπου 0.1 mm και ιδανικού μεγέθους τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια θραύσης αφού πρώτα έχει μαλακώσει από την βύθιση της σε ακετόνη. Η αρχική λωρίδα συγκρατείται με την χρήση μιας ακόμα μη μαλακωμένης λωρίδας και πιέζεται ελαφριά πάνω στην επιφάνεια. Ο χρόνος στεγνώματος εξαρτάται από το πόσο μαλακή ήταν η αρχική λωρίδα που τοποθετήθηκε αλλά συνήθως είναι περίπου 15 – 30 min. Το στεγνό αντίγραφο αφαιρείται από την επιφάνεια χρησιμοποιώντας μεταλλική λαβίδα και η διαδικασία θα πρέπει να επαναληφθεί αρκετές φορές αν η επιφάνεια θραύσης είναι πολύ μολυσμένη από βρωμίες. Όταν ληφθεί ένα καθαρό και μη μολυσμένο αντίγραφο η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί. Τα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι όλα τα θραύσματα και οι βρωμίες που αφαιρούνται από την επιφάνεια θραύσης, αποθηκεύονται για τυχόν ανάλυση που μπορεί να χρειάζεται.

1.4.5.2 Τεμαχισμός

Όταν απαιτείται να γίνει έλεγχος σκληρότητας ή οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία είναι απαραίτητος ο τεμαχισμός του δείγματος. Επειδή τα εργαλεία εξέτασης έχουν περιορισμούς στο μέγεθος των δοκιμίων που δέχονται είναι συχνά αναγκαστική, από ένα αστοχές κομμάτι, η αφαίρεση ενός δείγματος που περιέχει μια επιφάνεια θραύσης με σκοπό την εξέταση της. Πριν τον τεμαχισμό της, η επιφάνεια θραύσης θα πρέπει να προστατευθεί. Όλη η διαδικασία του τεμαχισμού θα πρέπει να γίνει έτσι ώστε καμία επιφάνεια θραύσης να μην επηρεαστεί και αν είναι εφικτό όλες οι επιφάνειες να διατηρηθούν στεγνές. Σε μεγάλες κατασκευές ο τεμαχισμός γίνεται συνήθως με την

διαδικασία της κοπής με φλόγα. Ο τεμαχισμός θα πρέπει να γίνει αρκετά μακριά από το σημείο των θραύσεων έτσι ώστε να μην επηρεαστεί η δομή του υλικού, που βρίσκεται κοντά στην θραύση, από την αύξηση της θερμοκρασίας όπως επίσης και να μην υπάρξει εναπόθεση τηγμένου μετάλλου πάνω σε κάποια επιφάνεια θραύσης. Η θερμοκρασία που δημιουργείται λόγω κοπής μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες του μετάλλου και την μικροδομή του. Για αυτόν το λόγο δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τροχοί κοντά στην επιφάνεια που θα γίνει μικροσκοπικός έλεγχος. Έτσι λοιπόν ο τεμαχισμός μπορεί να γίνει με ειδικά πριόνια ή διαμαντοτροχούς τα οποία χρησιμοποιούν λιπαντικό κατά την κοπή και το οποίο αποτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας.

1.4.5.3 Δευτερεύοντες ρωγμές

Στην περίπτωση που η κύρια επιφάνεια θραύσης έχει καταστραφεί ή διαβρωθεί και όλες οι πληροφορίες που θα μπορούσε να δώσει για το αίτιο της αστοχίας, έχουν εξαφανιστεί, είναι επιθυμητό να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες ώστε όλες οι δευτερεύουσες θραύσεις να μελετηθούν.. Πολλές φορές αυτές οι επιφάνειες μπορεί να δώσουν περισσότερες πληροφορίες από την επιφάνεια της κυρίας θραύσης. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου να αποτραπεί οποιαδήποτε καταπόνηση, κυρίως μηχανική, στην επιφάνεια του δείγματος.

1.4.6 Θραύσεις

Η ανάλυση αστοχίας επιφανειών θραύσης προϋποθέτει τον οπτικό και μακροσκοπικό έλεγχο ενώ τα πρώτα αποτελέσματα απορρέουν από τον οπτικό έλεγχο. Η βασικότερη ερώτηση για να διακρίνει κάποιος το είδος της θραύσης είναι το αν υπήρξε παραμόρφωση πριν την θραύση. Η παραμόρφωση συνδέεται άμεσα με την καταπόνηση από την οποία προήλθε η θραύση. Η έλλειψη παραμόρφωσης σηματοδοτεί ότι η θραύση είναι συνήθως ψαθυρή, πράγμα που δεν σημαίνει ότι το υλικό έχει ψαθυρή συμπεριφορά. Η γεωμετρία πολλές φορές του εξαρτήματος, ακόμα και αν έχει προέλθει από όλκιμο υλικό, μπορεί να προκαλέσει μια υπερφόρτωση και εν τέλει θραύση σε ένα σημείο χωρίς αυτό να προϋποθέτει μεγάλη παραμόρφωση. Έτσι από μακροσκοπική άποψη ενώ ένα υλικό παρουσιάζει όλκιμη συμπεριφορά, είναι δυνατόν να εμφανίσει μια ψαθυρή θραύση, η ανάλυση της οποίας είναι αρκετά πιο δύσκολη καθότι μπορεί να εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι να έχουν επηρεάσει το υλικό ακόμα και αν αυτό συγκαταλέγεται στα όλκιμα. [1]

1.4.6.1 Όλκιμη Θραύση

Όλκιμες θραύσεις λόγω υπερφόρτισης στα μέταλλα συμβαίνουν πολλές φορές. Υπερφορτίσεις λόγω τάσης είναι οι πιο απλές και συχνές ωστόσο ο μηχανισμός είναι ο ίδιος ακόμα και αν επικρατούν πιο συνθέτες τάσεις οι οποίες προκαλούν και την τελική θραύση κατά την λειτουργία. Το πιο κλασσικό παράδειγμα όλκιμης θραύσης είναι μια δοκιμή εφελκυσμού, στην οποία πριν την τελική θραύση του δοκιμίου υπάρχει η δημιουργία λαιμού και συνεπώς η μεγάλη επιμήκυνση και παραμόρφωση του (Εικόνα 1.9). Μετά την δημιουργία του λαιμού στο σημείο της στένωσης δημιουργείται μια περιοχή τριαξονικών τάσεων, οι οποίες οδηγούν στην έναρξη μιας εσωτερικής ρωγμής στο κέντρο του λαιμού. Η εξάπλωση αυτής της ρηγματώσης εξαρτάται από την όλκιμότητα του υλικού και καταλήγει στην τελική θραύση του.



Εικόνα 1.9: Απεικόνιση όλκιμης θραύσης σε δοκίμιο εφελκυσμού. Φαίνεται η δημιουργία λαιμού η μείωση διατομής και η τελική διαμόρφωση του δοκιμίου (cup and cone). [14]

1.4.6.2 Ψαθυρή Θραύση

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι ψαθυρής θραύσης οι οποίοι προκαλούνται από κάποια τάση: (a) διακρυσταλλική απόσχιση, (b) περικρυσταλλικός διαχωρισμός.

Η διακρυσταλλική θραύση εμφανίζεται σε υλικά που βρίσκονται στο κυβικό χωροκεντρομμένο και των κραμάτων τους όπως φερριτικοί χάλυβες, μολυβδαίνιο και χρώμιο. Τα υλικά που ανήκουν στο κυβικό εδροκεντρομμένο συνήθως δεν εμφανίζουν αυτού του είδους θραύση. Η ψαθυρή θραύση ενός δοκιμίου εξαρτάται συνήθως από πολλούς παράγοντες όπως την γεωμετρία, την θερμοκρασία καθώς και τον ρυθμό παραμόρφωσης. Αυτός ο τύπος θραύσης είναι αρκετά εύκολος στην ερμηνεία του αφού είναι καθαρά κρυσταλλογραφικός και μακροσκοπικά σηματοδοτείται από ένα συγκεκριμένο μοτίβο γραμμών σε σχήμα ‘V’ (Chevron marks).

Η περικρυσταλλική θραύση μπορεί εύκολα να αναγνωρισθεί αλλά ο προσδιορισμός της κύριας αιτίας που την προκάλεσε είναι αρκετά δύσκολος. Με την βοήθεια της θραυστομηχανικής και του μικροσκοπικού ελέγχου μπορεί κάποιος να διακρίνει μια δεύτερη φάση μέσα στα όρια των κόκκων. Παρόλα αυτά μερικές φορές μια δεύτερη φάση η οποία μπορεί να έχει το πάχος μερικών ατόμων είναι πολύ δύσκολο να ερμηνευτεί από την θραυστομηχανική για αυτό άλλες μέθοδοι μπορεί να φανούν χρήσιμες όπως η φασματοσκοπία διασκορπισμού ενέργειας με ακτίνες X (EDS)



Εικόνα 1.10: Απεικόνιση επιφάνειας ψαθυρής θραύσης σε δοκίμιο εφελκυσμού. [15]

1.4.6.3 Βίαιες Θραύσεις

Βίαη θραύση είναι το καταστροφικό αποτέλεσμα συγκεκριμένης υπερφόρτισης, που οδηγεί στον τεμαχισμό του δείγματος σε τουλάχιστον δυο μέρη. Τέτοιου είδους υπερφορτίσεις μπορούν να συμβούν από στατικές φορτίσεις εφελκυσμού, θλίψης, κάμψης, στρέψης και συνδυασμό αυτών.

Θραύσεις με μακροσκοπικά ορατές παραμορφώσεις ονομάζονται όλκιμες βίαιες θραύσεις, όταν το υλικό στο οποίο συμβαίνουν εμφανίζει κάποια ευαισθησία στις διατμητικές τάσεις, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν ολίσθηση και κατά συνέπεια παραμόρφωση.

Θραύσεις χωρίς μακροσκοπικά ορατές παραμορφώσεις οι οποίες παρουσιάζονται σε υλικά με ψαθυρή συμπεριφορά ονομάζονται ψαθυρές θραύσεις. Η ψαθυρή συμπεριφορά των υλικών μπορεί να ωφελείται στην μικροδομή του υλικού (μαρτσενσιτική) ή στην ετερογενή μικροδομή του υλικού. Η ψαθυρότητα μπορεί να έχει και άλλες αιτίες όπως οι χαμηλές θερμοκρασίες, η σκλήρυνση, η πολυαξονική καταπόνηση αλλά και η συγκέντρωση εσωτερικών τάσεων. Κατά την όλκιμη θραύση μέρος της ενέργειας δαπανάται στην πλαστική παραμόρφωση του υλικού για αυτό και στις ψαθυρές θραύσεις η ενέργεια όπου αποδεσμεύεται είναι πολύ μεγαλύτερη.

Επιπλέον σε θέσεις και τμήματα εξαρτημάτων που υπάρχουν εγκοπές, υπάρχει και συγκέντρωση τάσεων, οι οποίες υπό ορισμένες συνθήκες φορτίσεων δημιουργούν τριαξονικές καταπονήσεις οι οποίες με την σειρά τους οδηγούν στην αύξηση της ψαθυρότητας τοπικά. Γενικά μια θραύση ξεκινάει πάντα από το σημείο που συγκεντρώνονται οι περισσότερες τάσεις, και συνεχίζει προς την διαδρομή που φέρει την μικρότερη αντίσταση. [4]

1.4.6.4 Θραύσεις Κόπωσης

Η θραύση κόπωσης οφείλεται στην μεταβαλλόμενη καταπόνηση όταν αυτή εφαρμόζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η καταπόνηση εκτός από τον δυναμικό παράγοντα μπορεί να συνοδεύεται και από τον στατικό παράγοντα αλλά πολλές φορές αυτό μπορεί και να μην ισχύει. Οι τρόποι καταπόνησης με τους οποίους μπορεί να προέλθει θραύση κόπωσης σε ψαθυρά και όλκιμα υλικά είναι: θλίψη - εφελκυσμός, μεταβαλλόμενη ή περιστρεφόμενη κάμψη, διάτμηση από διατμητική δύναμη, στρέψη και οι συνδυασμοί τους. Συνήθως οι αιτίες που προκαλούν θραύση κόπωσης είναι:

Καταπόνηση και φορτίο μεγαλύτερο από το αναμενόμενο: Αυτό μπορεί να συμβεί από λάθος υπολογισμό των καταπονήσεων δυναμικών και στατικών και πρόσθετων εξωτερικών καθώς και λανθασμένο χειρισμό κατά την λειτουργία.

Όταν η αντοχή του υλικού είναι μικρότερη της προδιαγραφής του: Συνήθως αυτό προκύπτει από σφάλμα κατά την παραγωγή και κατεργασία του υλικού, από αλλαγή της δομής του υλικού η οποία ωφελείται σε εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες και από πλήθος εγκοπών πάνω στο εξάρτημα.

Οι εγκοπές αποτελούν πάντα μια αιτία θραύσης: Η ευαισθησία που παρουσιάζουν τα υλικά έναντι των εγκοπών αυξάνεται όσο αυξάνεται η σκληρότητα με αποτέλεσμα να επέλθει η θραύση. Οι εγκοπές που μπορεί να προέλθουν από κακή κατεργασία ή σχεδίαση, πολλές φορές συνδυάζονται με άλλες αρνητικές καταστάσεις όπως με τις ταλαντώσεις που μπορεί να έχει το εξάρτημα κατά την λειτουργία ή την οποιαδήποτε αλλαγή στην δομή του.

Συνδυασμός πολλών αιτιών: Η θραύση κόπωσης ξεκινά τις περισσότερες φορές από κάποιο ελάττωμα στην επιφάνεια του υλικού η οποία με την σειρά της παίζει ιδιαίτερο ρόλο. Η επίδραση των ατελειών και σφαλμάτων της ποιότητας της επιφανειακής κατεργασίας είναι πολύ μεγάλη στην δυναμική καταπόνηση του εξαρτήματος. Αντίθετα όταν ένα εξάρτημα είναι λείο η αιτία της θραύσης προέρχεται από υποεπιφανειακούς παράγοντες όπως εγκλείσματα, πλαστικές επιφανειακές

παραμορφώσεις, συμπιεσμένα ξένα σώματα στην επιφάνεια, κομμένες γραμμές έλασης, ουλές από διάβρωση, γρέζια.

1.4.6.5 Μακροσκοπικός έλεγχος επιφανειών θραύσης

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι οποιασδήποτε ανάλυσης αστοχίας είναι ο μακροσκοπικός έλεγχος των επιφανειών θραύσης. Ο μακροσκοπικός έλεγχος μπορεί να γίνει με μεγεθύνσεις από 1 έως 50 ή 100x, μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί με γυμνό μάτι ή έναν μεγεθυντικό φακό χεριού ή ακόμα και με ένα στερεοσκόπιο ή ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM). Οι φωτογραφίες των επιφανειών απαιτούν μια υψηλής ανάλυσης κάμερα για μεγεθύνσεις έως και 20x, διαφορετικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μεγεθυντικό γυαλί προκειμένου να μεγεθυνθεί μια συγκεκριμένη περιοχή όπως μια ρωγμή ή μια μικρή λεπτομέρεια. Μπορεί να γίνει χρήση ενός μεταλλογραφικού μικροσκοπίου με μακροσκοπικούς αντικειμενικούς φακούς για μεγαλύτερες μεγεθύνσεις. Πολύ συχνά το δείγμα προς εξέταση είναι πολύ μεγάλο ή πολύ βαρύ για την διαδικασία της μεταλλογραφίας και η κοπή ή ο τεμαχισμός του δοκιμίου να είναι δύσκολος ή ανεπιθύμητος. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι καλύτερο να φωτογραφίζεται και να παίρνονται δείγματα επιφάνειας με αντίγραφο (replica). Τα αντίγραφα αυτά μπορούν να εξεταστούν με την διαδικασία της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διερχομένης δέσμης (TEM), ή επειδή είναι αγωγοί του ρεύματος μπορούν να εξετασθούν και με την διαδικασία της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM). [1]

Ο μακροσκοπικός έλεγχος έχει την δυνατότητα να καθορίσει την διεύθυνση της ρηγματώσης και συνεπώς την βασική αιτία προέλευσης της θραύσης. Στην περίπτωση των ψαθυρών θραύσεων ο προσδιορισμός εξαρτάται από την επιφάνεια της θραύσης η οποία φέρει ελικοειδή σχηματισμούς. Αν στις άκρες υπάρχουν σημάδια αποκόλλησης τότε η ρωγμή διαδίδεται παράλληλα στα σημάδια αυτά. Όταν τώρα στην επιφάνεια της ρωγμής εμφανίζονται και ενδείξεις επίπεδες αλλά και κεκλιμένες σηματοδοτείται η ύπαρξη ενός τερματικού σταθμού μιας γρήγορης επεκτεινόμενης ψαθυρής θραύσης. Αν αντιθέτως η θραύση έχει ξεκινήσει από μια ελεύθερη επιφάνεια τότε δεν φέρει ούτε κεκλιμένα σημάδια ούτε σημεία ένδειξης απόσχισης. [1]

Ο έλεγχος επιφανειών θραύσης με την χρήση μικρών σε μεγέθυνση φακών μπορεί πολλές φορές να εμφανίσει περιοχές οι οποίες διαφέρουν από το σημείο της κύριας θραύσης. Οι θραύσεις λόγω κόπωσης και διάβρωσης εμφανίζουν τέτοιου είδους διαφορές αφού η τελική θραύση είναι λόγω υπερφόρτισης εφόσον σταδιακά η διατομή

του εξαρτήματος μειώνεται. Σε όλκιμα υλικά είναι ευκρινώς ορατή η διαφορά μεταξύ επιφάνειας κόπωσης και τελικής βίαιης θραύσης. Διακρίνεται το πρώτο στάδιο κατά το οποίο η κρυσταλλική δομή του υλικού επηρεάζει την διαδρομή (συνήθως υπό γωνιά 45° ως προς τον άξονα συμμετρίας) και τέλος κατά το δεύτερο στάδιο η ρωγμή επεκτείνεται κάθετα στην διεύθυνση των τάσεων. Τέλος από την τελική διαμόρφωση της επιφάνειας μπορεί κάποιος να διακρίνει αν οι τάσεις που εφαρμόστηκαν είναι συνδυασμός εφέλκυσμού – θλίψης και μονόπλευρης ή περιστρεφόμενης κάμψης.

1.4.6.6 Μικροσκοπικός έλεγχος επιφανειών θραύσης

Ο μικροσκοπικός έλεγχος των επιφανειών θραύσης γίνεται συνήθως με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Το βασικό πλεονέκτημα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου έναντι του συμβατικού είναι το μεγάλο βάθος διείσδυσης πεδίου καθώς και οι πολύ μεγάλες μεγεθύνσεις που μπορεί να επιτύχει (από $x5000$ – $x10000$). Επιπροσθέτως πολλές φορές τα ηλεκτρονικά μικροσκοπία είναι εξοπλισμένα με φασματοσκόπιο διασκορπισμού ενέργειας με ακτίνες X για τυχόν χημικές μικροανάλυσεις. Η χημική ανάλυση σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη στον προσδιορισμό της μικροδομής στην θραύση και αν αυτή επηρέασε το τελικό αποτέλεσμα.[1] Οι επιφάνειες θραύσεις μπορούν να εξετασθούν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο χωρίς ιδιαίτερη προετοιμασία, πάρα μόνο να έχουν καθαριστεί εκτενώς. Στην περίπτωση που η επιφάνεια προς εξέταση είναι μεγάλη τότε πρέπει να μαρκαριστεί και να κοπεί σε τμήματα με μεγάλη προσοχή. [4]

Εκτός από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) υπάρχει και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM). Συγκριτικά με τα οπτικά μικροσκόπια μπορεί να επιτύχει πολύ μεγαλύτερες μεγεθύνσεις ακόμα και από το SEM της τάξεως των $x30000$ μεγεθύνσεων και εξαιρετική διείσδυση οπτικού πεδίου. Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχομένης δέσμης η εξέταση των επιφανειών θραύσης δεν μπορεί να γίνει κατευθείαν αφού το δοκίμιο προς εξέταση πρέπει να είναι εξαιρετικά λεπτό, προκειμένου να μπορέσουν τα ηλεκτρόνια να το διαπεράσουν. Για αυτόν τον λόγο απαιτείται η λήψη αντιγράφων επιφάνειας. (replicas).

Παρότι υπάρχουν επιφάνειες θραύσης οι οποίες είναι χαρακτηριστικές και σχετίζονται με συγκεκριμένους μηχανισμούς θραύσης, είναι σημαντικό ο αναλυτής να είναι πολύ προσεκτικός στην θραυστογραφική ανάλυση. Μερικές από τις πιο κλασσικές περιπτώσεις επιφανειών θραύσης είναι:

Κυψελοειδής θραύση, χαρακτηριστική των όλκιμων μετάλλων και κραμάτων. Όψεις απόσχισης, τυπικό της διακρυσταλλικής ψαθυρής θραύσης των μετάλλων και κραμάτων του κυβικού χωροκεντρομένου. Ψαθυρή περικρυσταλλική θραύση η οποία εμφανίζεται μεταξύ των ψαθυροποιημένων ορίων των κόκκων λόγω ύπαρξης οξυγόνου ή νικελίου, τυπική στους ευαίσθητους επαναφερμένους χάλυβες.

1.4.7 Προετοιμασία για μεταλλογραφικό έλεγχο.

Σκοπός της μεταλλογραφικής εξέτασης είναι να γίνει έλεγχος και περιγραφή της κρυσταλλικής δομής του υλικού. Η εξέταση της δομής του υλικού μπορεί να δώσει σημαντικά συμπεράσματα για την συμπεριφορά του υλικού έναντι των καταπονήσεων που έχει δεχθεί κατά την κατασκευή του και την λειτουργία του.

1.4.7.1 Μακροσκοπικός έλεγχος

Όπως προαναφέρθηκε και στην περίπτωση των θραύσεων όταν χρειαστεί να αποκοπεί ένα τμήμα για να εξεταστεί δεν πρέπει να γίνει χρήση ενός μέσου κοπής το οποίο αυξάνει την θερμοκρασία και ως εκ τούτου επηρεάζει την κρυσταλλική δομή. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του μακροσκοπικού ελέγχου διαφόρων τμημάτων πάνω στο αστοχές υλικό. Το τμήμα που αποκόπτεται θα πρέπει να λειανθεί με δίσκο ή χαρτί και εφόσον δεν χρειάζεται να εξετασθεί μόνο κάποια ρωγμή ή πόρος, πρέπει να προσβληθεί με κάποιο οξύ. Η προσβολή με το οξύ βασίζεται στο γεγονός ότι διάφορες περιοχές του υλικού με διαφορετική χημική σύσταση και διαφορετική δομή, αντιδρούν διαφορετικά στην χημική προσβολή για αυτό και ο αναλυτής μπορεί να παρατηρήσει: Αναλόγως τον βαθμό παραμόρφωσης παρατηρούνται διαφορετικά μεγέθη κόκκων, και οριακές επικολλήσεις και αποκολλήσεις. Σε συγκολλητά μέρη, δίπλα στο σημείο συγκόλλησης γίνεται εμφανής η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (HAZ). Εμφανίζονται οι διαφορισμοί του θείου και του φωσφόρου [4].

Σε πολλές περιπτώσεις από την μακροσκοπική εξέταση διαπιστώνεται, αν το αίτιο της αστοχίας ή αν η επιτάχυνση της καταστροφής ενός τμήματος ωφελείται στην ελαττωματική δομή ή σφάλματα στο υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του σε δυναμικές και στατικές φορτίσεις και να χάνει την ολκιμότητα του από παράγοντες όπως η εξανθράκωση, οι πόροι, η δημιουργία μεγάλων κόκκων. Μια καλή και λεπτομερής μακροσκοπική εξέταση μπορεί να βοηθήσει στην εξέλιξη της έρευνας και να αποτρέψει την μικροσκοπική διερεύνηση.

1.4.7.2 Μικροσκοπικός έλεγχος.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι μιας ανάλυσης αστοχίας είναι η μεταλλογραφική εξέταση στιλβωμένων και στιλβωμένων - προσβεβλημένων δοκιμίων με οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η μεταλλογραφική εξέταση δίνει πληροφορίες στον αναλυτή για την κλάση του υλικού και την δομή του. Εάν υπάρχουν ασυνέχειες στο υλικό, αυτές μπορεί να σχετίζονται με ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά τα οποία καταδεικνύουν μια πρόωρη αστοχία του υλικού. Πολλές φορές είναι πιθανό να τα συνδέσει κανείς με μια ακατάλληλη δομή ή με τις συνθήκες λειτουργίας του εξαρτήματος. Η εξέταση της μικροδομής μπορεί να δώσει ακόμα πληροφορίες και για τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε το υπό εξέταση κομμάτι, για την θερμική κατεργασία που έχει υποστεί και πιθανά ελαττώματα σε αυτή. Ο έλεγχος την μικροδομής είναι σε θέση να δώσει πληροφορίες για τυχόν υπερθέρμανση, κατακρήμνιση καρβιδίων, οξείδωση, διάβρωση και εργοσκλήρυνση. Μπορούν όπως προαναφέρθηκε να εξεταστούν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά μια ρωγμής, αν είναι δηλαδή διακρυσταλλική ή περικρυσταλλική, πράγμα που οδηγεί στην εξακρίβωση του μηχανισμού θραύσης. [1]

Επειδή κάθε ανάλυση αστοχίας αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση είναι δύσκολο να δοθούν λεπτομέρειες για τον τόπο ή το τμήμα από το οποίο θα πρέπει να γίνει η επιλογή δειγμάτων για τον μικροσκοπικό έλεγχο. Πάραυτα σε κάθε ανάλυση αστοχίας πρέπει να διευκρινιστεί αν η λήψη ενός δείγματος κοντά σε μια επιφάνεια θραύσης ή κοντά σε ένα ελάττωμα της επιφάνειας, είναι αντιπροσωπευτικό για όλη την κατασκευή. Στις περιπτώσεις που το αίτιο της αστοχίας μπορεί να είναι η έλλειψη καθαρότητας στο μέταλλο, η διεύθυνση κοπής των δοκιμίων θα πρέπει να επιλεγθεί προσεκτικά έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει ορθός έλεγχος των εγκλεισμάτων. Ο έλεγχος για εγκλείσματα πρέπει να γίνει σε μη προσβεβλημένη επιφάνεια.

Τα δοκίμια που θα εξετασθούν μικροσκοπικά θα πρέπει να είναι πολύ καλά και προσεκτικά προετοιμασμένα και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στον τρόπο κοπής, ώστε να αποφευχθούν τυχόν αυξήσεις της θερμοκρασίας οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την μικροδομή του υλικού. Ανάλογα το μέγεθος και το σχήμα των κομματιών, αποφασίζεται αν θα εγκιβωτιστούν για την καλύτερη στήριξη τους. Τα δοκίμια αμέσως μετά θα πρέπει να λειανθούν περνώντας από διαδοχικά λειαντικά χαρτιά και εν τέλει στιλβώνονται με μηχανικό, χημικό ή ηλεκτρολυτικό τρόπο. Στην περίπτωση της μηχανικής στύλβωσης το δοκίμιο πρέπει να πιεστεί μαλακά πάνω στην

επιφάνεια του λειαντικού μέσου που αυτή την φορά είναι κάποιο κατάλληλο ύφασμα όπου σε συνδυασμό με κάποια πάστα διαμαντιού δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Μετά την στύλβωση το δοκίμιο πρέπει να προσβληθεί χημικά ώστε να φανεί η κρυσταλλική του δομή και τα όρια των κόκκων. Τα διαλλείματα που χρησιμοποιούνται για την προσβολή εξαρτώνται από το μέταλλο καθώς και από τις λεπτομέρειες της μικροδομής που θέλει να δει κάποιος. [4]

Πριν την χημική προσβολή κάποιος μπορεί να παρατηρήσει:

- a) Ρωγμές που προκλήθηκαν από κάποια βλάβη ή λάθος στην θερμική κατεργασία
- b) Πόρους από την χύτευση.
- c) Ζώνες διαφορισμού, εγκλείσματα – ακαθαρσίες, διαφορετικές δομές (γραφίτης)

Μετά την χημική προσβολή παρατηρούνται:

- a) Ρωγμές, θραύσεις λόγω καρβιδίων ή λόγω διάβρωσης.
- b) Διακρυσταλλικές ρωγμές ή θραύσεις.
- c) Ισχυρές πλαστικές παραμορφώσεις στα όρια της ρωγμής.
- d) Μορφή και μέγεθος κόκκου.
- e) Περιοχές με μεγαλύτερους κόκκους (μείωση δυναμικής αντοχής), προσανατολισμός των κόκκων, διάλυση των ορίων τους (έχει προηγηθεί διάβρωση).
- f) Είδη κρυστάλλων (μαρτεσνίτης, ωστενίτης, φερρίτης), τοπικές αλλαγές δομής, διαφορισμοί στην κρυσταλλική δομή και τα όρια των κόκκων, μορφή και εμφάνιση δενδριτών.
- g) Μορφές δομής στα οριακά στρώματα (εναζώτωση, βαφή, αλλαγή δομής), πάχος και μορφή επικάλυψης, παραμορφώσεις της επιφάνειας.

Συμπληρωματικά πρέπει να τονισθεί ότι μερικά υλικά εμφανίζουν φάσεις οι οποίες μπορεί να μην είναι σαφώς διακριτές με το οπτικό μικροσκόπιο. Στην περίπτωση αυτή αφού πρώτα αφαιρεθεί η ρητίνη (αν υπάρχει), και αφού το δοκίμιο προσβληθεί πολύ βαθιά μπορεί να εξετασθεί με την χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

1.4.7.3 Ανάλυση μεταλλογραφικού ελέγχου

Η εξαιρετική ικανότητα του μικροσκοπίου, να μπορεί δηλαδή να εμφανίσει ατέλειες στην κρυσταλλική δομή ενός υλικού που έχουν προκληθεί κατά την διάρκεια

λειτουργίας ή σχεδιασμού, είναι αυτή που τοποθετεί τον μικροσκοπικό έλεγχο στις πιο σημαντικές ενέργειες κατά την ανάλυση αστοχίας. Εγκλείσματα, διαχωρισμός μικροδομής, λανθασμένη θερμική κατεργασία και διακρυσταλλική διάβρωση είναι μερικά από τα μεταλλουργικά ελαττώματα που μπορούν να ανιχνευθούν και να μελετηθούν κατά το μικροσκοπικό έλεγχο.

Ακόμα και στην απουσία κάποιου συγκεκριμένου μεταλλουργικού ελαττώματος, ο έλεγχος μεταλλογραφιών τμημάτων είναι ανεκτίμητος για τον αναλυτή όσον αφορά τις μετρήσεις των κρυσταλλικών παραμέτρων όπως είναι το μέγεθος του κόκκου, πάχη επικαλύψεων και θερμικά επηρεαζόμενων ζωνών, στοιχείων δηλαδή που μπορεί να έχουν σχέση με την αστοχία.

1.4.8 Χημική Ανάλυση

Σε κάθε ανάλυση αστοχίας είναι σημαντικό να γίνεται εξ αρχής ένας έλεγχος για την χημική σύσταση του υλικού. Πολλές φορές η χημική ανάλυση γίνεται τελευταία γιατί απαιτείται η καταστροφή ενός τμήματος του υλικού. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου το υλικό που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν το ιδανικό με αποτέλεσμα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες να αστόχησε αλλά συνήθως η χημική σύσταση του υλικού είναι ο τελευταίος παράγοντας που επηρεάζει μια ανάλυση αστοχίας. Μικρές αποκλίσεις στην χημική ανάλυση του υλικού, από τις προδιαγραφόμενες τιμές, τις περισσότερες περιπτώσεις δεν αποτελούν σοβαρό παράγοντα της αστοχίας. Πάραυτα μικρές αποκλίσεις στα ποσοστά του αλουμινίου μπορούν να οδηγήσουν σε πρόωρη γήρανση του μετάλλου και μικρές ποσότητες ακαθαρσιών (θείο, φωσφόρος) μπορεί να οδηγήσουν στην ψαθυροποίηση του. Σε συγκεκριμένες διερευνήσεις ιδιαίτερα όταν υπάρχει διάβρωση ή θραύση λόγω διάβρωσης απαιτείται χημική ανάλυση σε όλα τα σημεία που έχουν έρθει σε επαφή με το σημείο της διάβρωσης προκειμένου να βρεθεί η κύρια αιτία της αστοχίας. Αν κατά την χημική ανάλυση προκύψει ότι ένα στοιχείο βρίσκεται σε μεγαλύτερα ποσοστά από το συνηθισμένο, δεν πρέπει να δοθεί το συμπέρασμα πως αυτή η διαφορά ευθύνεται για την αστοχία. Η κατανομή των συστατικών ενός μετάλλου είναι μεγαλύτερης σημασίας από την αναλογία τους όταν βέβαια τηρούνται τα επιτρεπτά πλαίσια. [1]

Επιπλέον μερικά αέρια στοιχεία τα οποία παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, δεν αναφέρονται στην χημική ανάλυση. Για παράδειγμα στον χάλυβα η παρουσία του οξυγόνου και του υδρογόνου και οι συνέπειες τους έχουν

ιδιαίτερη σημασία. Το υδρογόνο μπορεί να προκαλέσει ψαθυροποίηση ειδικά όταν απορροφάται κατά την διαδικασία του καθαρισμού με ηλεκτρόλυση και των συγκολλήσεων λόγω χρήσης βρεγμένων ηλεκτροδίων. Το υδρογόνο αναμιγνύεται με το τηγμένο υλικό σε ατομικό επίπεδο και συγκεντρώνεται κάτω υπό πίεση σε πόρους και ασυνέχειες με αποτέλεσμα να δημιουργεί τοπικές ρηγματώσεις, ενώ η παρουσία αζώτου οδηγεί στην δημιουργία φάσεων από καρβίδια τα οποία με την σειρά τους προκαλούν την ψαθυροποίηση του υλικού και την τελική του θραύση όταν αυτό βρίσκεται υπό μεγάλες τάσεις.

Μεγάλο εύρος τεχνικών αναλύσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της σύστασης των μετάλλων μέσα στο κράμα καθώς και της ύπαρξης δειγμάτων περιβαλλοντικών υγρών, λιπαντικών και αιωρημάτων. Η υδροχημική ανάλυση, η φασματογραφία η φασματογραφία ακτινών X και η φασματογραφία ηλεκτρονίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον προσδιορισμό της ποσότητας ενός μετάλλου, όταν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια. [4]

Η υδροχημική ανάλυση: Η ποσοστιαία αναλογία του στοιχείου προσδιορίζεται με την βοήθεια του κατάλληλου κάθε φορά αντιδραστηρίου. Μπορεί να προσδιοριστεί η χημική σύσταση όλων των στοιχείων αλλά σε μεγαλύτερες ποσότητες.

Οπτική φασματογραφία: Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην διέγερση του ατόμου. Το άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και γύρω από αυτόν κινούνται τα ηλεκτρόνια κατανομημένα σε στοιβάδες. Μέσω της διέγερσης του (spark) η ενέργεια των ηλεκτρονίων αυξάνεται με αποτέλεσμα να μεταπηδούν σε μεγαλύτερη στιβάδα. Κατά την μεταπήδηση αυτή η ενέργεια που εκπέμπει το ηλεκτρόνιο παίρνει την μορφή φωτός. Το χρώμα που έχει το φως υποδεικνύει την φύση του χημικού στοιχείου ενώ η ένταση του υποδεικνύει το ποσοστό που περιέχεται μέσα στο υλικό. Ο φασματογράφος περιέχει ορισμένους φωτοπολλαπλασιαστές οι οποίοι καταγράφουν το φως που δέχονται. Έτσι λοιπόν γίνεται ανάλυση του αερίου που αποδεσμεύεται με την βοήθεια φασμάτων απορρόφησης.

Φασματοσκοπία ακτινών X: Γίνεται προσδιορισμός του χημικού στοιχείου που υπάρχει μέσα στο μέταλλο υπολογίζοντας την γωνία ανάκλασης. Όταν η ακτινοβολία X προσπέσει πάνω στο δοκίμιο υφίσταται σκέδαση στα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος.

Φασματογραφία ηλεκτρονίων: Ο προσδιορισμός των χημικών στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυση του φάσματος ακτινών X που δημιουργείται από την διείσδυση και την συγκράτηση ηλεκτρονίων στην ελεύθερη επιφάνεια μετάλλου.

1.4.9 Έκθεση ανάλυσης αστοχίας

Σε συγκεκριμένα σημεία σε κάθε διερεύνηση ανάλυσης αστοχίας όλα τα στοιχεία που έχουν βρεθεί από τον έλεγχο και τις δοκιμές, αναλύονται και δημιουργούνται υποθέσεις. Αν η πιθανή αιτία της αστοχίας είναι παρούσα σχετικά νωρίς κατά την ανάλυση αστοχίας, τότε όλος ο προγραμματισμός στήνεται με βάση την αιτία αυτή και με κύριο στόχο την εξάλειψη όλων των υπολοίπων. Όσο βγαίνουν στην επιφάνεια καινούρια στοιχεία, οι αρχικές υποθέσεις αλλάζουν και δημιουργούνται καινούριες όσον αφορά την αιτία της αστοχίας. Σε πολλές περιπτώσεις ορισμένες ενέργειες που γίνονται κατά την διάρκεια της ανάλυσης μπορεί να θεωρηθούν περιττές, παρόλα αυτά είναι σημαντικό να τονιστεί ότι καμία ενέργεια δεν θεωρείται ανούσια, εφόσον είναι σε θέση να αποκλείσει κάποια αιτία που τυχόν ο αναλυτής να έχει υποθέσει ότι ευθύνεται. Είναι πολύ σημαντικό να μην διατυπωθούν συμπεράσματα από μια πρώτη ματιά σε ένα δοκίμιο πάρα πρέπει να γίνει εκτενής έλεγχος σε αρκετές περιοχές για την εξαγωγή ενός ορθού αποτελέσματος.

Η έκθεση μιας ανάλυσης αστοχίας είναι το σύνολο όλων των δοκιμών και των αναλύσεων που διεξάχθηκαν κατά την διάρκεια της έρευνας. Πρέπει να γραφεί με τρόπο τέτοιο ώστε να περιγράφει όλα τα συγκεκριμένα μέρη και στοιχεία που εξετάστηκαν, να εκφραστούν όλα τα αποτελέσματα από τις δοκιμές και τις αναλύσεις και τέλος να γίνει ερμηνεία όλων των στοιχείων και των αποτελεσμάτων. Η δομή της έκθεσης παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο διεξάγει η έρευνα, τα βήματα που ακολουθήθηκαν και την σκέψη του αναλυτή, ο οποίος εν τέλει καταλήγει να δώσει απάντηση στα ερωτήματα που αφορούν την αιτία της αστοχίας. Η σύνταξη μιας έκθεσης απαιτεί την καλή προετοιμασία καθώς ο αναλυτής θα πρέπει να συγκεντρώσει όλες τις πληροφορίες που αντλήθηκαν κατά την έρευνα και να τις αναλύσει ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να είναι σε θέση μέσω φωτογραφιών και τήρησης του αρχείου, να ξέρει την σειρά με την οποία έγιναν οι απαραίτητοι έλεγχοι. Οι εκθέσεις ανάλυσης αστοχίας δεν έχουν συγκεκριμένη δομή και τρόπο γραφής και εξαρτώνται από τις ανάγκες του οργανισμού ή του καταναλωτή και κάθε φορά από την περίπτωση της αστοχίας, παρόλα αυτά υπάρχουν κάποια βασικά στοιχεία και γενικευμένοι κανόνες τα οποία πρέπει να περιέχονται και να τηρούνται μέσα στην έκθεση:

Επικεφαλίδα: Οι περισσότερες εκθέσεις ανάλυσης αστοχίας ξεκινούν με μια επικεφαλίδα η οποία περιλαμβάνει το όνομα της εταιρίας, το τμήμα, τον συγγραφέα, την ημερομηνία και τον τίτλο της έκθεσης ο οποίος θα πρέπει να είναι όσο πιο περιεκτικός και περιγραφικός γίνεται χωρίς να είναι φλύαρος.

Περίληψη: είναι χρήσιμη στην περιγραφή του σκοπού, του στόχου και των ευρημάτων της έρευνας. Το μέγεθος θα πρέπει να είναι περίπου 150 – 500 λέξεις .

Πίνακας περιεχομένων: Αν η έκθεση ανάλυσης αστοχίας είναι αρκετά μεγάλη θα πρέπει να περιέχεται ένας πίνακας περιεχομένων σύμφωνα με τον οποίο η έκθεση έχει χωριστεί σε τμήματα και κάθε τμήμα φέρει τον αντίστοιχο αριθμό σελίδας.

Υπόβαθρο: μέσα στο τμήμα αυτό θα πρέπει να περιλαμβάνονται στοιχεία που αφορούν τα δείγματα στα οποία έγινε η ανάλυση αστοχίας, ονοματολογία αυτών, περιγραφή των γεγονότων κατά την αστοχία, σχετικά έγγραφα που αφορούν τις προδιαγραφές ή τυχόν σχέδια, ιστορικό κατασκευής και λειτουργίας όπως υλικά κατασκευής και φορτία ώστε να μπορέσει ο αναγνώστης να κατανοήσει την περίπτωση της αστοχίας.

Διερευνητική διαδικασία: γίνεται περιγραφή των τεχνικών και των δοκιμών που εκτελέστηκαν κατά την ανάλυση. Τυπικά οι δοκιμές πάνω σε δείγματα που αστόχησαν εκτελούνται διαδοχικά από τους μη καταστροφικούς ελέγχους στους καταστροφικούς. Σε κάθε δοκιμή που εκτελείται είναι απαραίτητη η περιγραφή ακολουθούμενη από φωτογραφικό υλικό. Οποιοσδήποτε καθαρισμός και προετοιμασία πρέπει να σημειωθούν όπως επίσης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στον μακροσκοπικό και μικροσκοπικό έλεγχο του κομματιού.

Αποτελέσματα: περιλαμβάνονται όλες οι πληροφορίες και τα δεδομένα που αντλήθηκαν κατά την εκτέλεση των δοκιμών. Τα αποτελέσματα πρέπει να παρουσιαστούν με την βοήθεια περιγραφών, πινάκων και γραφημάτων. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν μαθηματικές και υπολογιστικές διαδικασίες θα πρέπει να αναφερθούν. Με αλλά λογία ο αναλυτής πρέπει να περιγράψει αναλυτικώς και εκτενώς όλες εκείνες τις πληροφορίες που αποκτήθηκαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και αμέσως μετά να αναλύσει τα δεδομένα αυτά. Οι τρεις βασικές εκβάσεις μιας ανάλυσης αστοχίας είναι ο προσδιορισμός του τρόπου αστοχίας, η αιτία της αστοχίας, και τέλος τυχόν προτάσεις που μπορεί να προκύψουν.

Τρόπος αστοχίας: μέσω των δεδομένων, των πληροφοριών και την ανάλυση αυτών προκύπτει ο τρόπος με τον οποίο αστόχησε το δείγμα.

Αίτια αστοχίας: μετά τον τρόπο αστοχίας διευκρινίζεται το κύριο αίτιο το οποίο σύμφωνα με την γνώμη του αναλυτή ευθύνεται για την αστοχία.

Προτάσεις: στο τέλος της έκθεσης πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες προτάσεις ώστε να διορθωθεί ο βασικός παράγοντας που προκάλεσε την αστοχία. Είναι σημαντικό ο αναλυτής να αποτρέψει τυχόν μελλοντικές αστοχίες, μεριμνώντας και δίνοντας λύση στο πρόβλημα.

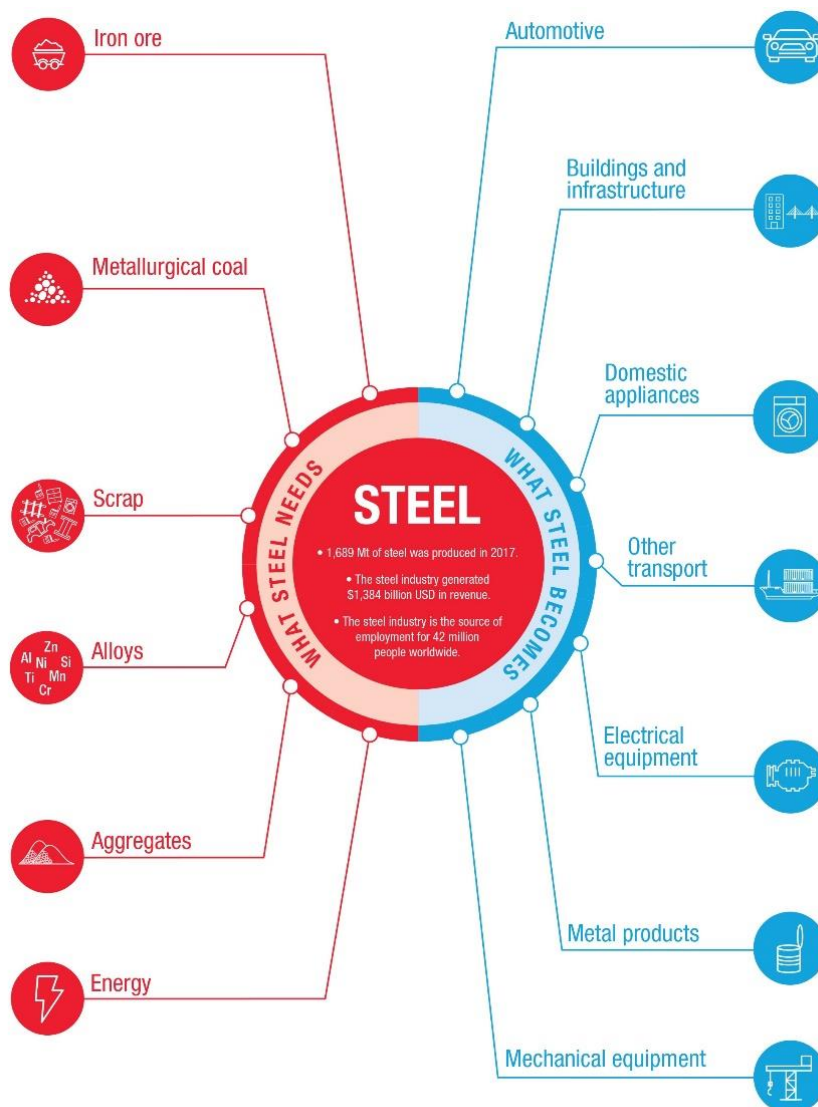
Αναφορές: όλη η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την άντληση πληροφοριών κατά την διάρκεια της ερευνάς.

2. ΧΑΛΥΒΕΣ

2.1 Ορισμός Χάλυβα

Ο χάλυβας αποτελεί κράμα σιδηρού άνθρακα (Fe-C) με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 2.14%. Ανάλογα την εφαρμογή τους πολλές φορές στην σύνθεση του κράματος συμμετέχουν και αλλά διάφορα κραματικά στοιχεία όπως το μαγγάνιο (Mn) το βανάδιο (V) το χρώμιο (Cr) το νικέλιο (Ni) και το πυρίτιο (Si). Το βασικότερο στοιχείο ενός χάλυβα είναι άνθρακας ο οποίος συνήθως βρίσκεται μεταξύ του 0.2% και του 0.7%. Ο άνθρακας και το ποσοστό αυτού που υπάρχει στον χάλυβα είναι αυτά που επηρεάζουν τις ιδιότητες του κράματος. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα αυξάνεται η σκληρότητα και η αντοχή σε εφελκυστηκές καταπονήσεις, η εμβापτότητα του ενώ μειώνεται η συγκολλησιμότητα του. Η παρουσία πυριτίου (Si) στο κράμα του χάλυβα κυμαίνεται συνήθως από 0.35% μέχρι 1.00%. Το πυρίτιο έχει την δυνατότητα να διαλύεται μέσα στον χάλυβα και να τον ενισχύει ενώ σε κάποια ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για αναγομώσεις υπάρχει περίπου 1.00% πυρίτιο το οποίο βοηθάει στην απομάκρυνση της οξειδωσης από την επιφάνεια. Οι χάλυβες περιέχουν περίπου 0.30% μαγγάνιο (Mn) γιατί βοηθάει στην προστασία από τη διάβρωση, αποτρέπει την δημιουργία του σουλφιδίου του σιδήρου και εγκλεισμάτων ενώ ταυτόχρονα, ενισχύοντας την σκληρότητα αυξάνει την αντοχή τους. Το νικέλιο (Ni) και το χρώμιο (Cr) είναι δυο σημαντικά κραματικά στοιχεία του χάλυβα αφού με την παρουσία τους τον προστατεύουν από την διάβρωση ενώ ενισχύουν την σκληρότητά του, την αντοχή του σε χαμηλές θερμοκρασίες και βελτιώνουν την αντοχή σε φθορά. Η παρουσία του χρωμίου (Cr) του νικελίου (Ni) του βαναδίου (V) και του νιόβιου (Nb) είναι απαραίτητη στην δημιουργία ειδικών χαλύβων για πιο ιδιαίτερες κατασκευές αφού όσον αφορά το νικέλιο το βανάδιο και νιόβιο δημιουργούν σταθερά καρβίδια τα οποία αυξάνουν την σκληρότητα και την αντοχή σε παραμόρφωση σε μεγάλες θερμοκρασίες. Στοιχεία όπως το θείο (S), ο φωσφόρος (P) και το οξυγόνο (O)

προσδίδουν συνήθως αρνητικά χαρακτηριστικά στα κράματα. Η συγκέντρωση του φώσφορου στα όρια των κόκκων δημιουργεί ψαθυρότητα στο υλικό ενώ η παρουσία οξυγόνου κατά την διαδικασία της χύτευσης ή της συγκόλλησης προκαλεί ασυνέχειες και ελαττώματα μέσα στην δομή του υλικού [16]. Ο χάλυβας είναι το πιο σημαντικό μηχανολογικό και κατασκευαστικό υλικό και αυτό γιατί χρησιμοποιείται σε κάθε πτυχή της ζωής από τα αυτοκίνητα και κτήρια έως ηλεκτρικές συσκευές (Εικόνα 2.1). Είναι πολύ φιλικό με το περιβάλλον και είναι ολοκληρωτικά ανακυκλώσιμο και συγκριτικά με άλλα προϊόντα απαιτεί πολύ λίγη ενέργεια για να κατασκευαστεί. Επίσης οι μετασχηματισμοί των φάσεων σε συνδυασμό με τα διάφορα κραματικά στοιχεία που συνθέτουν κάθε φορά το κράμα του χάλυβα, επιτρέπουν την δημιουργία πολλών άλλων κραμάτων για κάθε διαφορετική χρήση όταν απαιτείται [17].



Εικόνα 2.1: Τι προϋποθέτει η παραγωγή χάλυβα και οι διάφορες εφαρμογές του [18].

2.2 Ονοματολογία του Χάλυβα

2.2.1 Ονοματολογία Χαλύβων κατά το Αμερικανικό σύστημα AISI-SAE

Στις Η.Π.Α. παλαιότερα χρησιμοποιούνταν δυο συστήματα τυποποίησης των χαλύβων. Το σύστημα SAE (Society of Automobile Engineers) και το σύστημα AISI (American Iron and Steel Institute). Από το 1995 και μετά τα δυο συστήματα αυτά ενώθηκαν δίνοντας τον τίτλο AISI-SAE και η τυποποίηση χρησιμοποιείται έως και σήμερα [19]. Σύμφωνα λοιπόν με το αμερικάνικο σύστημα χρησιμοποιείται σειρά τεσσάρων ψηφίων (xyzz). Από αυτά τα δυο πρώτα αναφέρονται στην οικογένεια χαλύβων, πιο συγκεκριμένα στα κύρια στοιχεία προσθήκης και στο ποσοστό στο οποίο βρίσκονται μέσα στο κράμα αντίστοιχα. Τα δυο τελευταία στοιχεία υποδηλώνουν την

περιεκτικότητα του κράματος σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη με το 100. Ο τετραψήφιος λοιπόν αριθμός υποδηλώνει:

X: οικογένεια χαλύβων.

Y: Το είδος του χάλυβα με βάση το ποσοστό των στοιχείων κραμάτωσης του.

ZZ: Η περιεκτικότητα του άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100.

Ενδεικτικά στις οικογένειες χαλύβων ανήκουν οι κοινοί ανθρακούχοι ή Μαγγανιούχοι χάλυβες οι οποίοι συμβολίζονται, οι Νικελιούχοι χάλυβες, οι Νικελοχρωμιούχοι χάλυβες, οι Μολυβδαινιούχοι / Ni-Cr-Mo χάλυβες Χρωμιομολυβδαινιούχοι / Νικελιομολυβδαινιούχοι, οι χρωμιούχοι χάλυβες, οι Χρωμιοβαναδιούχοι χάλυβες, οι χάλυβες Βολφραμίου – Χρωμίου και οι Μαγγανοπυριτιούχοι χάλυβες.

Ανάλογα το ποσοστό στο οποία βρίσκονται τα στοιχεία κραμάτωσης τους οι χάλυβες διακρίνονται ενδεικτικά σε κοινούς χάλυβες, χάλυβες ελεύθερης κοπής με θείο και φωσφόρο, χαλυβοκράματα μαγγανίου, νικελίου, χρωμίου, μολυβδαίνιου, χρωμίου – μολυβδαίνιου, νικελίου – χρωμίου κ.α. Σε ορισμένες περιπτώσεις πριν από τα τέσσερα αυτά ψηφία μπαίνει μπροστά ένα κεφαλαίο γράμμα της λατινικής αλφάβητου το οποίο είναι χαρακτηριστικό για την μέθοδο παρασκευής του χάλυβα, όπως για παράδειγμα το B για την μέθοδο Bessemer, το E για την μέθοδο σε ηλεκτρική κάμινο, το A κραματωμένος χάλυβας σε κάμινο όξινης επένδυσης κ.α.

Παρακάτω δίνονται δυο παραδείγματα για την ονοματολογία κατά το σύστημα AISI – SAE:

Παράδειγμα πρώτο: E1030

E: Η παρασκευή έγινε σε ηλεκτρική κάμινο.

1: Μαγγανιούχος ή κοινός ανθρακούχος.

3: Μαγγανιούχος με ποσοστό Mn = 1.60 – 1.90% κ.β.

30: Ποσοστό άνθρακα 0.30% κ.β.

Παράδειγμα δεύτερο A2330

A: Κραματωμένος χάλυβας σε κάμινο όξινης επένδυσης

2: Νικελιούχοι χάλυβες.

3: Νικελιούχος με ποσοστό 3.50% κ.β.

30: Ποσοστό άνθρακα 0.30% κ.β.

2.2.2 Ονοματολογία χαλύβων κατά το γερμανικό σύστημα DIN

Κατά το γερμανικό σύστημα DIN οι χάλυβες τυποποιούνται ανάλογα με την χημική τους σύσταση καθώς και με βάση την κατεργασία την οποία θα υποστούν.

2.2.2.1 Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες

Οι ανθρακούχοι χάλυβες συμβολίζονται με το St (από το Stahl που σημαίνει χάλυβας), το οποίο ακολουθεί διψήφιος αριθμός (St XX). Ο αριθμός αυτός παριστάνει την ελάχιστη αντοχή του χάλυβα σε N/mm^2 ή σε kp/mm^2 . Άρα λοιπόν αν ένας κοινός ανθρακούχος χάλυβας έχει όριο αντοχής τα 500 N/mm^2 ή τα 50 kp/mm^2 αντίστοιχα, με βάση την γερμανική ονοματολογία συμβολίζεται κατά St 50.

Πιο παλιά, αυτόν τον διψήφιο αριθμό τον ακολουθούσε και άλλος ένας επίσης διψήφιος αριθμός, ο οποίος αντιπροσώπευε τα δυο τελευταία ψηφία του σχετικού πίνακα τυποποίησης του προτύπου DIN. Έτσι ο χάλυβας St 50 που αναφέρθηκε πριν ήταν τυποποιημένος σαν St 50.11 σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πίνακα DIN 1611 (ο πρώτος δηλαδή διψήφιος αριθμός, το 16 αναφέρεται στους χάλυβες). Για κάθε χάλυβα προβλέπονται τρεις ποιότητες. Η ποιότητα 1 για συνηθισμένες απαιτήσεις, η ποιότητα 2 για μεγαλύτερες απαιτήσεις και η ποιότητα 3 για ειδικές απαιτήσεις του χάλυβα. Για παράδειγμα ο χάλυβας με τυποποίηση St 27-2 συνιστά χάλυβα με όριο αντοχής 270 N/mm^2 ή 27 kp/mm^2 και ανήκει στην ποιότητα 2.

2.2.2.2 Χάλυβες επιβελτίωσης ή ενανθράκωσης

Όταν οι ανθρακούχοι χάλυβες έχουν καλύτερη ποιότητα όπως οι χάλυβες ενανθράκωσης συμβολίζονται με το γράμμα C, το οποίο ακολουθεί η περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100. Σε περιπτώσεις που οι ακαθαρσίες θείου (S) και φωσφόρου (P) στο κράμα είναι λιγότερες μετρά το γράμμα C τοποθετείται ένα K. Έτσι λοιπόν για έναν χάλυβα καλής ποιότητας με 0.45% άνθρακα ο συμβολισμός είναι C45 και αν οι ακαθαρσίες βρίσκονται σε πολύ χαμηλά ποσοστά τότε συμβολίζεται ως CK45. Αν ο χάλυβας έχει υποστεί κάποια θερμική κατεργασία αυτό υποδηλώνεται με το αντίστοιχο γράμμα στο τέλος της τυποποίησης. Έτσι λοιπόν αν ο χάλυβας έχει υποστεί ενανθράκωση (E), ανόπτηση (G), εξομάλυνση (N), επιβελτίωση (V) ή είναι χυτοχάλυβας (GS) μετρά την περιεκτικότητα του άνθρακα τοποθετείται το αντίστοιχο γράμμα. Ακολουθούν δυο παραδείγματα.

Παράδειγμα πρώτο: CK45 N: Πρόκειται για χάλυβα με 0.45% άνθρακα ο οποίος έχει πολύ χαμηλά ποσοστά ακαθαρσιών, προορίζεται για επιβελτίωση και έχει υποστεί εξομάλυνση.

Παράδειγμα δεύτερο: C 60 G: Πρόκειται για χάλυβα με 0.40% άνθρακα ο οποίος έχει υποστεί ανόπτηση.

2.2.2.3 Χαλυβοκράματα ή Κραματωμένοι Χάλυβες

Για τον συμβολισμό των χαλυβοκραμάτων αρχικά γράφεται ο διψήφιος αριθμός της περιεκτικότητας σε άνθρακα του χαλυβοκράματος, πολλαπλασιασμένος επί 100 όπως και στους ανθρακούχους χάλυβες. Ακολουθούν τα χημικά σύμβολα των προσθηκών, κατά σειρά όμως ελαττωμένης περιεκτικότητας. Στην περίπτωση ίσης περιεκτικότητας προσθηκών λαμβάνεται υπόψη η αλφαβητική τους σειρά, μετά τα σύμβολα αναγράφονται οι χαρακτηριστικοί αριθμοί περιεκτικότητας των κραματικών στοιχείων. Για να έχουμε ακραίους αριθμούς κατατάσσουμε τις προσθήκες σε ομάδες και δίνουμε σε κάθε ομάδα κατάλληλο πολλαπλασιαστή. Έτσι έχουμε [20]:

Για στοιχεία όπως χρώμιο (Cr), κοβάλτιο (Co), μαγγάνιο (Mn), νικέλιο (Ni), πυρίτιο (Si) και βολφράμιο (W) ο πολλαπλασιαστής είναι 4.

Για στοιχεία όπως το αργίλιο (Al), βηρύλλιο (Be), χαλκό (Cu), μολυβδαίνιο (Mo), νιόβιο Nb, μόλυβδο (Pb), ταντάλιο (Ta), τιτάνιο (Ti), βανάδιο (V) και ζirkόνιο (Zr) ο πολλαπλασιαστής είναι το 10

Για τον φωσφόρο (P), το θείο (S), το άζωτο (N) και το Δημήτριο (Ce) ο πολλαπλασιαστής είναι το 100.

Και για το βόριο (B) ο πολλαπλασιαστής είναι το 1000.

Ο χαρακτηριστικός αριθμός προσθήκης βρίσκεται αν η πραγματική τιμή περιεκτικότητας της προσθήκης πολλαπλασιαστεί επί τον αντίστοιχο πολλαπλασιαστή. Δίνονται δυο παραδείγματα Χαλυβοκράματος:

Παράδειγμα πρώτο: 50 CrMo 46:

Ο άνθρακας δίνεται από $C = 50/100 = 0.50\%$ κ.β.

Το Cr δίνεται από $Cr = 4/4 = 1.00\%$ κ.β.

Το Mo δίνεται από $Mo = 6/10 = 0.60\%$ κ.β.

Παράδειγμα δεύτερο: 15 Cr 3:

Ο άνθρακας είναι ίσος με $C = 15/100 = 0.15\%$ κ.β.

$Cr = 3/4 = 0.75\%$ κ.β.

2.2.3 Ονοματολογία Χαλύβων κατά το αγγλικό σύστημα BS

Το αγγλικό σύστημα τυποποίησης του χάλυβα κάνει χρήση ενός εξαψήφιου κωδικού ο οποίος κατ' επέκταση χωρίζεται σε τρία μέρη. Το **πρώτο μέρος** το οποίο είναι τριψήφιο αφορά τον τύπο του χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα αν ο χάλυβας είναι κοινός ανθρακούχος ή ανθρακούχος με Mn τα πρώτα τρία ψηφία υποδηλώνουν το ποσοστό του μαγγανίου επί το 100 και παίρνει τιμές από 000-199, αν είναι χάλυβας αποκοπής θείου και το δεύτερο και τρίτο ψηφίο δίνουν το ποσοστό του θείου επί 100 και παίρνει τιμές από 200-240, αν ο χάλυβας είναι μαγγανοπυριτιούχος παίρνει την τιμή 250, αν πρόκειται για ανοξείδωτο χάλυβα παίρνει τιμές από 300-499 και τέλος αν είναι κραματωμένος παίρνει τιμές από 500-900. Το **δεύτερο μέρος** είναι ένα γράμμα το οποίο δίνει πληροφορίες για τον χάλυβα όπως αν συνίσταται για κατεργασία σκλήρυνσης (H), αν συνίσταται για ειδική μηχανική κατεργασία (M), αν πρόκειται για ανοξείδωτο (S) και τέλος αν η χημική του σύσταση δίνεται μετά από χημική ανάλυση (A). Το **τρίτο μέρος** το οποίο είναι διψήφιο δίνει το ποσοστό του άνθρακα πολλαπλασιασμένο επί το 100. Ακολουθούν δυο παραδείγματα:

Παράδειγμα πρώτο: 080 M 20 πρόκειται για χάλυβα Μαγγανιούχο με ποσοστό μαγγανίου ίσο με 0.80% και 0.20% άνθρακα, ο οποίος μπορεί να κατεργασθεί μηχανικά.

Παράδειγμα δεύτερο: 205 H 30 πρόκειται για χάλυβα ο οποίος έχει ποσοστό θείου 0.05% και άνθρακα 0.30% και συνίσταται για κατεργασία σκλήρυνσης.

2.3 Ταξινόμηση Χαλύβων

Η ταξινόμηση των χαλύβων γίνεται συνήθως ανάλογα με την χημική τους σύσταση, τον προορισμό τους και με βάση την βιομηχανική τους χρήση. Ανάλογα με την χημική τους σύσταση οι χάλυβες διακρίνονται σε κοινούς ή ανθρακούχους και σε κραματωμένους χάλυβες ενώ ανάλογα το ποσοστό των κραματικών στοιχείων που περιέχονται, οι Κραματωμένοι διακρίνονται σε ελαφριά, μέτρια ή ισχυρά Κραματωμένοι. Σύμφωνα με τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε χάλυβες διαμόρφωσης και χυτοχάλυβες και τέλος με βάση την χρήση τους διακρίνονται σε χάλυβες κατασκευών, εργαλειοχάλυβες ή χάλυβες εργαλείων και στα ειδικά χαλυβοκράματα όπως οι ανοξείδωτοι, οι πυρίμαχοι, η οι χάλυβες μονίμων μαγνητών[19].

2.3.1 Ταξινόμηση χαλύβων με βάση την χημική τους σύσταση

2.3.1.1 Κοινοί ή Ανθρακούχοι Χάλυβες

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες ονομάζονται τα κράματα Fe-C, τα οποία δεν περιέχουν άλλα κραματικά στοιχεία πάρα μικρά ποσοστά θείου φωσφόρου και μαγγανίου. Ανάλογα το ποσοστό του άνθρακα που περιέχουν οι χάλυβες αυτοί διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τους υποευτηκτοειδείς οι οποίοι περιέχουν ποσοστό άνθρακα έως 0.80% κ.β, τους ευτηκτοειδείς οι οποίοι έχουν άνθρακα ίσο με 0.80% και τους υπereυτηκτοειδείς οι οποίοι έχουν άνθρακα από 0.80% έως 2.10%. Οι υποευτηκτοειδείς χάλυβες χωρίζονται σε μαλακούς των οποίων τα ποσοστά άνθρακα είναι από 0.10% έως και 0.25%, στους χάλυβες μέτριου άνθρακα των οποίων τα ποσοστά άνθρακα είναι από 0.25% έως και 0.50% και τέλος στους χάλυβες υψηλού άνθρακα οι οποίοι έχουν πάνω από 0.50% ποσοστό άνθρακα.

2.3.1.2 Κραματωμένοι Χάλυβες

Οι χάλυβες ανάλογα το ποσοστό των στοιχείων κραμάτωσης τους διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες

Ελαφρά Κραματωμένοι ή μικροκραματωμένοι, όταν το ποσοστό των κραματικών στοιχείων δεν ξεπερνά το 2%. Οι χάλυβες αυτοί πάρα το μικρό ποσοστό κραμάτωσης έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους κοινούς χάλυβες ενώ έχουν αυξημένη αντοχή σε διαβρωτικές συνθήκες. Για να έχουν καλή κατεργασιμότητα έχουν χαμηλά ποσοστά άνθρακα (C), μπορεί να περιέχουν μαγγάνιο (Mn) έως 1.5% ενώ μπορεί να περιέχουν και αλλά κραματικά στοιχεία όπως νιόβιο (Nb), βανάδιο (V), τιτάνιο (Ti) έως 0.1%.[21].

Μέτρια Κραματωμένοι χάλυβες για ποσοστά προσμίξεων από 2% έως και 10%. Οι χάλυβες αυτοί έχουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες ως αποτέλεσμα του ποσοστού κραματικών στοιχείων (χρώμιο, νικέλιο, μολυβδαίνιο) που περιέχονται. Το συνολικό ποσοστό των κραματικών προσθηκών κυμαίνεται περίπου από 2.07% έως και το 10% δηλαδή λίγο χαμηλότερα από το ποσοστό προσθηκών που υπάρχουν στους ανοξείδωτους χάλυβες.

Ισχυρά Κραματωμένοι χάλυβες είναι εκείνοι όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης ξεπερνά το 10%. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν συνήθως χάλυβες ειδικών κατασκευών όπως οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες και οι ανοξείδωτοι με μεγάλα ποσοστά χρωμίου (Cr), νικελίου (Ni), μολυβδαίνιου (Mo) κ.α.

2.3.1.3 Κραματικά στοιχεία προσθήκης

Οι χρήσεις του χάλυβα σε ορισμένες καταστάσεις απαιτεί αυξημένες μηχανικές ιδιότητες, υψηλή κατεργασιμότητα καθώς και αυξημένη αντοχή στην διάβρωση. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη ορισμένων κραματικών στοιχείων τα οποία έχουν ως στόχο:

Την βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση.

Την βελτίωση της κατεργασιμότητας.

Την μεταβολή της κρίσιμης ταχύτητας βαφής.

Τον σχηματισμό καρβιδίων για αυξημένη σκληρότητα και αντοχή.

Την σταθεροποίηση του πλέγματος του ωσθενίτη και του φερρίτη.

Την επίδραση στην ανάπτυξη κόκκων.

Ανάλογα το κραματικό στοιχείο που προστίθεται το κράμα αποκτά ξεχωριστές ιδιότητες που συμβάλουν στην καλύτερη και πιο αποτελεσματική λειτουργία του. Ορισμένα στοιχεία προσθήκης καθώς και οι ιδιότητες τους παρουσιάζονται παρακάτω [21].

Νικέλιο (Ni): Προκαλεί σημαντική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και προκαλεί αύξηση της εμβαπτότητας της αντοχής σε επαναφορά και παρεμποδίζει την ανκρυστάλλωση.

Μαγγάνιο (Mn): Προκαλεί μεγάλη μείωση των σημείων M_f και M_s .

Χρωμίο (Cr): Προσδίδει μεγάλη αντοχή στην διάβρωση του υλικού και θεωρείται και καρβιδιογόνο καθώς προκαλεί καρβίδια του χρωμίου.

Πυρίτιο (Si): Προκαλεί μικρή αύξηση στην σκληρότητα, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή σε διάβρωση και επιπλέον σχηματίζει χονδρόκοκκες φάσεις οι οποίες συμβάλουν στην ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά.

Μολυβδαίνιο (Mo): Αυξάνει την εμβαπτότητα, την δυσθραυστότητα και την σκληρότητα, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες, παρεμποδίζει την γήρανση και προκαλεί αύξηση της αντοχής σε φθορά και διάβρωση. Επιπλέον δημιουργεί καρβίδια του μολυβδαίνιου.

Βολφράμιο (W): Αποτελεί βασικό στοιχείο των ταχυχαλύβων και προκαλεί αύξηση της εμβαπτότητας, της αντοχής σε μηχανική φθορά και επαναφορά. Είναι ισχυρά

καρβιδιογόνο και βοηθά στην διατήρηση της σκληρότητας από δευτερογενή σκλήρυνση.

Βανάδιο (V): Προστίθεται για την βελτίωση της αντοχής σε επαναφορά και μηχανική φθορά. Επιπλέον προκαλεί αύξηση της εμβαιπτότητας και υποβοηθά στην διατήρηση της σκληρότητας μετά από δευτερογενή σκλήρυνση.

Αλουμίνιο (Al): Εμποδίζει την αύξηση του μεγέθους των κόκκων.

Τιτάνιο (Ti): Παρεμποδίζει την γήρανση, προκαλεί αύξηση της εμβαιπτότητας και της αντοχής σε επαναφορά.

Κοβάλτιο (Co): Έχει την δυνατότητα να μεταφέρει τις καμπύλες ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού TTT (Time Temperature Transformation) προς τα αριστερά.

2.3.2 Ταξινόμηση χαλύβων με βάση τον προορισμό τους

Όπως προαναφέρθηκε οι χάλυβες με βάση τον προορισμό τους διακρίνονται σε χάλυβες διαμόρφωσης και χάλυβες χύτευσης ή χυτοχάλυβες.

2.3.2.1 Χάλυβες Διαμόρφωσης

Είναι οι χάλυβες οι οποίοι μπορούν να ενδείκνυνται για περαιτέρω μηχανική και θερμική κατεργασία. Με βάση το ποσοστό του άνθρακα που περιέχεται αποκτούν διαφορετικές ιδιότητες και πεδίο χρήσης. Ενδεικτικά αν ο άνθρακας είναι μέχρι 0.15% ο χάλυβας έχει καλή πλαστικότητα και κατεργασιμότητα, καλή μηχανική αντοχή και χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή ελασμάτων, συρμάτων, κοχλιών αλλά και σε μεταλλικές κατασκευές και τμήματα μηχανών. Επιπλέον οι χάλυβες με ποσοστό άνθρακα μικρότερο του 0.30% έχουν καλή συγκολλησιμότητα. Όταν ο άνθρακας ξεπερνά το 0.45% το κράμα μετά από βαφή και επαναφορά αποκτά μεγάλη σκληρότητα και καλή αντοχή σε φθορά. Οι χρήσεις που έχει είναι συνήθως σε λάμες, άξονες, οδοντωτούς τροχούς κ.α.

2.3.2.2 Χυτοχάλυβες ή Χάλυβες Χύτευσης

Οι χυτοχάλυβες είναι κράματα σιδήρου άνθρακα με ποσοστό άνθρακα που δεν ξεπερνά το 2.04%. Το κύριο πλεονεκτήματα του χυτοχάλυβα είναι η σχεδιαστική ελευθερία που έχει η οποία επιτρέπει σύνθετες κατασκευές και σχηματισμούς. Επίσης με την προσθήκη διάφορων κραματικών στοιχείων μπορεί κάποιος να επιτύχει το αποτέλεσμα που επιθυμεί και να προσαρμόσει κάθε φορά το παραγόμενο κράμα, στις συνθήκες

λειτουργίας του όσον αφορά την αντοχή σε διάβρωση και φθορά και την βελτίωση των μηχανικών του ιδιοτήτων [22]. Ανάλογα με το ποσοστό των κραματικών στοιχείων οι χάλυβες χύτευσης χωρίζονται σε ανθρακούχους χάλυβες, ελαφρά κραματωμένους χάλυβες, και ισχυρά κραματωμένους χάλυβες. Οι ανθρακούχοι χάλυβες χωρίζονται σε μαλακούς χάλυβες, χάλυβες μέτριου άνθρακα, και χάλυβες υψηλού άνθρακα. Στους ισχυρά κραματωμένους χάλυβες χύτευσης ανήκουν και οι ανοξείδωτοι χάλυβες.

2.3.3 Ταξινόμηση των χάλυβων με βάση την χρήση τους

Όπως προαναφέρθηκε οι χάλυβες με βάση την χρήση τους χωρίζονται σε χάλυβες κατασκευών, χάλυβες εργαλείων και ειδικά χαλυβοκράματα στα οποία ανήκουν οι ανοξείδωτοι, οι πυρίμαχοι, οι χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών και άλλοι.

2.3.3.1 Χάλυβες Κατασκευών

Στους χάλυβες κατασκευών ανήκουν οι χάλυβες οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε όλες τις μεταλλικές κατασκευές (υπόστεγα, δοχεία, γέφυρες κλπ.) καθώς επίσης και στις κατασκευές τμημάτων μηχανών όπως ελατήριων, στροφαλοφόρων αξόνων και άλλων (εικόνα 2.2). Γενικά οι χάλυβες κατασκευών πρέπει να έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες και ανάλογα την περίπτωση θα πρέπει να έχουν αντοχή σε φθορά και διάβρωση. Ανάλογα κάθε φορά την κατασκευή επιλέγεται ο χάλυβας που ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα στις συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες της κατασκευής αυτής. Οι χάλυβες κατασκευών χωρίζονται σε δυο κατηγορίες στους ανθρακούχους χάλυβες και στα κράματα κατασκευών.



Εικόνα 2.2: διάφορα εξαρτήματα μηχανής αυτοκίνητου κατασκευασμένα από χάλυβα κατασκευών.

A. Ανθρακούχοι χάλυβες κατασκευών

Οι ανθρακούχοι χάλυβες χρησιμοποιούνται για συνηθισμένες κατασκευές και στοιχεία μηχανών και η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα κυμαίνεται από 0.05% μέχρι και 0.80%. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα οι ανθρακούχοι χάλυβες χωρίζονται σε:

Πολύ μαλακούς με C = 0.05% - 0.15%.

Μαλακούς με C = 0.15% - 0.30%.

Ημιμαλακούς με C = 0.30% - 0.40%.

Ημίσκληρους με C = 0.40% - 0.60%.

Σκληρούς με C = 0.60% - 0.70%.

Πολύ σκληρούς με C = 0.70% - 0.80%.

Σε πολλές περιπτώσεις που χρειάζεται να κατεργαστούμε τεμάχια σε αυτόματα μηχανήματα όπως CNC ή αυτόματους τόνους και φρέζες, για να έχουμε αποδοτική κοπή θα πρέπει τα απόβλητα της κοπής (γρέζι) να μην έχουν μεγάλο μήκος και να θρυμματίζονται. Αυτό το πετυχαίνουμε με την προσθήκη διάφορων στοιχείων όπως θείο (S), και μόλυβδο (Pb).

B. Κράματα κατασκευών

Είναι οι χάλυβες κατασκευών οι οποίοι έχουν αυξημένη ποιότητα από τους ανθρακούχους και περιέχουν πολύ λιγότερα ποσοστά ακαθαρσιών από αυτούς. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατάσταση επιβελτιώσεως μετά από βαφή και επαναφορά. Ανάλογα το ποσοστό και το είδος των κραματικών στοιχείων οι χάλυβες αυτοί παίρνουν ονόματα και τυποποίηση. Μέσα στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι νικελιούχοι χάλυβες οι οποίοι έχουν αυξημένη αντοχή σε κόπωση και διάβρωση, ο συνδυασμός χρωμίου και νικελίου δίνει στον χάλυβα καλή εμβαπτότητα και αντοχή σε διάβρωση ενώ επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση. Οι Μολυβδαινιούχοι χάλυβες χαρακτηρίζονται από καλή εμβαπτότητα, αυξημένη σκληρότητα και αντίσταση στην φθορά καθώς και μεγάλη αντοχή στον ερπυσμό. Οι χρωμιούχοι χάλυβες έχουν καλή εμβαπτότητα και επιδέχονται επιφανειακή σκλήρυνση και τέλος οι χρωμοβαναδιούχοι έχουν και αυτοί καλή εμβαπτότητα και αύξηση αντοχής σε τριβή.

B₁. Κράματα Εναζωτώσεως

Εναζωτώση υφίστανται χάλυβες με ειδική σύνθεση, γιατί η σκλήρυνση της επιφάνειας που επιτυγχάνεται οφείλεται στον σχηματισμό σκληρών ενώσεων του αζώτου (N) με

το χρώμιο (Cr), το αργίλιο (AR), και το βανάδιο (V). Το μολυβδαίνιο (Mo) όταν προστίθεται δίνει μεγαλύτερη δυσθραυστότητα του πύρινα των εξαρτημάτων.

B₂ Κράματα Ενανθρακώσεως

Σαν χάλυβες ενανθρακώσεως μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ανθρακούχοι χάλυβες είτε χαλυβοκράματα με την προϋπόθεση όμως να έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) (<0.30%), έτσι ώστε το τεμάχιο να αποκτά εύθραυστο πυρήνα μετά από τις θερμικές κατεργασίες που προβλέπονται για τους χάλυβες. Οι ανθρακούχοι χάλυβες ενανθρακώσεως περιέχουν άνθρακα (C) έως περίπου 0.30% και μαγγάνιο (Mn) έως 0.90%, ενώ τα χαλυβοκράματα ενανθρακώσεως είναι νικελίου, νικελιοχρωμιούχα με λίγα ποσοστά βαναδίου (V).

2.3.3.2 Χάλυβες εργαλείων

Όπως προαναφέρθηκε με την χύτευση μπορεί κανείς να δώσει την μορφή που θέλει στο τεμάχιο που θα παραχθεί. Εκτός από την χύτευση το εξάρτημα μπορεί να πάρει την μορφή που χρειάζεται με την βοήθεια των κατεργασιών κοπής όπως η τórνευση, το φρεζάρισμα, το πλάνισμα κλπ. Καθώς και με την βοήθεια των κατεργασιών διαμόρφωσης εν θερμώ ή εν ψυχρώ, όπως η έλαση, η σφυρηλασία, η εξέλαση κλπ. Σε όλες τις κατεργασίες αυτές είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλων για κάθε περίπτωση εργαλείων (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Αναπαράσταση διάφορων εργαλείων αφαίρεσης υλικού (τρυπάνια, κωνικοί τροχοί) [23].

Κατά την κοπή των μετάλλων μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου δημιουργείται ισχυρή τριβή με αποτελέσματα την ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών κατά την λειτουργία του. Σε μερικές περιπτώσεις εκτός από υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχουν και

ταλαντώσεις ή και κρούσεις κατά την κοπή, με αποτελέσματα να είναι ιδιαίτερης σημασίας η ύπαρξη εργαλείων κοπής με την δυνατότητα να αντέχουν σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας. Επίσης κατά τις κατεργασίες διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται σαν εργαλεία κατάλληλες μήτρες (καλούπια), όπου και σε αυτή την περίπτωση αναπτύσσεται τριβή και κρουστικές δυνάμεις μεταξύ του τεμαχίου που διαμορφώνεται και των μερών της μήτρας (Εικόνα 2.4). Τα μεγάλα ποσοστά κραματικών προσθηκών στα κράματα εργαλειοχαλύβων ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής σε φθορά, ενώ συμβάλουν στην δημιουργία καρβιδίων, τα οποία έχουν αποτέλεσμα την μεγάλη σκληρότητα του χάλυβα και την αντοχή σε φθορά. Σε υψηλές θερμοκρασίες τα καρβίδια έχουν την ιδιότητα να δημιουργούν δευτερογενή καρβίδια βοηθώντας την σκληρότητα του εξαρτήματος. Οι σημαντικότερες ιδιότητες των εργαλειοχαλύβων είναι η δυσθραυστότητα, η διατήρηση της σκληρότητας τους σε μεγάλες θερμοκρασίες, και η αντοχή σε φθορά και τριβή.



Εικόνα 2.4: Εργαλεία μεγάλης ταχύτητας κοπής, για τόρνο ή φρέζα κατασκευασμένα από εργαλειοχάλυβα. [24]

Σύμφωνα με το αμερικανικό σύστημα AISI – SAE οι εργαλειοχάλυβες ταξινομούνται ανάλογα τα κραματικά τους στοιχεία και την χρήση τους στις εξής κατηγορίες [22]:

Σειρά A (Air Hardening): χάλυβες οι οποίοι περιέχουν άνθρακα περίπου 1.00% και τα κύρια κραματικά τους στοιχεία είναι το μαγγάνιο (Mn) σε ποσοστά της τάξης του 3%, χρώμιο (Cr) μέχρι 5% και μολυβδαίνιο (Mo) μέχρι 1%. Έχουν καλή αντοχή στην φθορά από τριβή και καλή αντοχή στην επαναφορά, βάζονται στον αέρα και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μητρών κοπής και εργαλείων υψηλής αντοχής σε φθορά.

Σειρά D: στην κατηγορία αυτή ανήκουν ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα άνθρακα (C) σε ποσοστά από 1-2.35% και χρώμιο (Cr) περίπου 12%.

Άλλες προσθήκες που μπορεί να έχουν τα κράματα αυτά είναι το βανάδιο (V), το μολυβδαίνιο (Mo) και το βολφράμιο (W) τα οποία συνολικά προσδίδουν στην κατηγορία αυτή το βασικό πλεονέκτημα της πολύ μεγάλης αντοχής σε φθορά.

Σειρά S (Shock resisting): πρόκειται για εργαλειοχάλυβες υψηλής αντοχής σε κρούση. Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων τα οποία υφίστανται μεγάλα κρουστικά φορτία και για το λόγο αυτό διακρίνονται από μεγάλη δυσθραυστότητα. Περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό της τάξης του 0.45% - 0.60% και σαν προσθήκες μπορεί να έχουν πυρίτιο (Si) ή χρώμιο (Cr) και βολφράμιο (W), ενώ μερικές περιέχουν νικέλιο (Ni) και μολυβδαίνιο (Mo).

Σειρά O (Oil Hardening): πρόκειται για εργαλειοχάλυβες ψυχρής κατεργασίας και μέσης εμβαπτότητας οι οποίοι βάζονται σε λάδι. Περιέχουν άνθρακα (C) περίπου 1%, μαγγάνιο (Mn) και μικρότερες ποσότητες χρωμίου (Cr) και βολφραμίου (W). Η δυσθραυστότητα τους είναι μέτρια και έχουν χαμηλή αντοχή σε επαναφορά.

Σειρά P: εργαλειοχάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα με βασικά κραματικά στοιχεία το νικέλιο το χρώμιο το βανάδιο και το μολυβδαίνιο σε μικρά ποσοστά. Παρουσιάζουν μέτρια δυσθραυστότητα, σκληρότητα και αντοχή σε φθορά

Σειρά H (Hot Working): ανήκουν οι εργαλειοχάλυβες θερμών κατεργασιών. Οι χάλυβες αυτοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: σε αυτούς που έχουν σαν βάση το χρώμιο (έως 7%), σε αυτούς που έχουν σαν βάση το βολφράμιο (9%-18%), και τέλος σε αυτούς που έχουν σαν βάση το μολυβδαίνιο (5%-8%). Τα κράματα αυτά βάζονται στον αέρα, διακρίνονται από καλή δυσθραυστότητα, μεγάλη αντοχή σε επαναφορά και μέτρια αντοχή σε φθορά ενώ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μήτρων χυτεύσεως, έλασης, σφυρηλάτησης ή ακόμα και για λεπίδες ψαλιδιών για ψαλιδισμό εν θερμώ.

Σειρά W (Water Hardening): κοινοί χάλυβες εργαλείων ή βαφής στο νερό στους οποίους συνήθως περιλαμβάνονται οι ανθρακούχοι χάλυβες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μικρές ταχύτητες κοπής και πρόωσης για την κοπή μαλακών μετάλλων. Η περιεκτικότητα του άνθρακα (C) κυμαίνεται από 0.60% έως 1.50% Η παρουσία του χρωμίου (Cr) σε ποσοστά από 0.20% έως 0.50% συμβάλει στην αύξηση της αντοχής σε φθορά και της εμβαπτότητας ενώ το βανάδιο (V) βοηθά στην καλή δυσθραυστότητα.

Σειρά T: πρόκειται για ταχυχάλυβες βολφραμίου οι οποίοι χρησιμοποιούνται σαν χάλυβες κοπής των μετάλλων. Περιλαμβάνει μεγάλα ποσοστά βολφραμίου, μολυβδαίνιου και κοβαλτίου. Η περιεκτικότητα του άνθρακα κυμαίνεται από 0.70% μέχρι και 1.50% και μαζί με τις προσθήκες συμβάλουν στην απόκτηση αυξημένης σκληρότητας, αντοχής σε φθορά και επαναφορά και καλή δυσθραυστότητα. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων όπως τρυπάνια, κοπτικά εργαλεία τόννου και φρέζας.

Σειρά M: ανήκουν οι ταχυχάλυβες μολυβδαίνιου οι οποίοι έχουν τις ίδιες ιδιότητες με την σειρά T και χρησιμοποιούνται κυρίως ως κοπτικά εργαλεία υψηλής ταχύτητας.

2.3.3.3 Ειδικά κράματα

Τα ειδικά χαλυβοκράματα βρίσκουν εφαρμογή σε ορισμένες καταστάσεις στις οποίες οι χάλυβες που έχουν αναφερθεί έως τώρα δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι πυρίμαχοι χάλυβες, και οι χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών.

A. Ανοξείδωτοι χάλυβες

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση η οποία ωφελείται στο χρώμιο το οποίο σχηματίζει λεπτό στρώμα οξειδίου του χρωμίου στην επιφάνεια του κράματος. Το στρώμα αυτό είναι συμπαγές ανθεκτικό, προσκολλάται στην επιφάνεια του εξαρτήματος και εμποδίζει την διάβρωση του χάλυβα. Κατά αυτόν το τρόπο υπάρχει μεγάλη αντοχή σε διάβρωση η οποία μπορεί να προέλθει από τα φυσικά φαινόμενα της ατμόσφαιρας αλλά και γενικά από κάποιο διαβρωτικό περιβάλλον. Η διάβρωση των μετάλλων που βρίσκονται μέσα σε μια διαβρωτική περιοχή συμβαίνει είτε από συνεχή χημική προσβολή είτε από φαινόμενα ηλεκτρολύσεως είτε και από τα δυο μαζί. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι κράματα που περιέχουν χρώμιο (Cr) σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10.5%. και χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές που προϋποθέτουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση (σκουριά), όπως βαλβίδες, ρουλεμάν, αντλίες, σε εφαρμογές που προϋποθέτουν επαφή με τρόφιμα όπως δεξαμενές αποθήκευσης, καθώς και στην παραγωγή ιατρικών εργαλείων (Εικόνα 2.5). Οι ανοξείδωτοι χάλυβες χωρίζονται στους μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, στους φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και στους ωσθενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.



Εικόνα 2.5: Εφαρμογές ανοξείδωτων χαλύβων (ιατρικά εργαλεία, δεξαμενές τροφίμων, αρχιτεκτονικές εφαρμογές). [25]

Α1. Μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες

Οι χάλυβες αυτοί περιέχουν άνθρακα από 0.07% μέχρι και 0.40% και χρώμιο από 12% μέχρι 18%. Η βαφή τους γίνεται από 950°C μέχρι 1000°C και μετά την βαφή αποκτούν μαρτενσιτικό ιστό. Στην φάση αυτή αν υποστούν απόπτηση αποκτούν περλίτη με αποτέλεσμα να είναι μαγνητικοί και στην συνέχεια μπορούν να υποβληθούν σε επαναφορά από τους 500°C έως και τους 750°C. Μετά την επαναφορά ο χάλυβας αποκτά μεγαλύτερη δυσθραυστότητα αλλά μειώνεται η αντοχή του σε διάβρωση. Ανάλογα με την περιεκτικότητα τους σε άνθρακα οι Μαρτενσιτικοί χάλυβες έχουν συγκεκριμένες εφαρμογές.

Α2. Ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες

Σε αυτούς ανήκουν χαλυβοκράματα με περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr) περίπου 12% ως 25% και νικέλιο (Ni) από 8% έως 15% με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) της τάξεως του <0.10%. Ένας αντιπροσωπευτικός χάλυβας αυτής της κατηγορίας είναι ο νικελοχρωμιούχοι χάλυβες με χρώμιο 18% και νικέλιο 8%. Οι συγκεκριμένοι χάλυβες δεν αποκτούν αυξημένη σκληρότητα μετά την βαφή. Το μέσο βαφής τους είναι το λάδι ή το νερό σε θερμοκρασία 1050°C μέχρι 1100°C και έχει ως αποτέλεσμα την πλήρως κρυσταλλική δομή ωσθενίτη. Σε αυτή την φάση το κράμα είναι μαλακό δεν μαγνητίζεται και έχει μέγιστη αντοχή σε διάβρωση. Σε ορισμένες περιπτώσεις για να αποκτήσει ο χάλυβας αντοχή από την διάβρωση συγκεκριμένων διαλυμάτων μπορούν να προστεθούν σαν κραματικά στοιχεία το μολυβδαίνιο (Mo) έως 3% ή ο χαλκός (Cu) έως 2%.

Αν οι Ωσθενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες (500°C - 870°C) για ορισμένο διάστημα όπως συμβαίνει κατά την διαδικασία της συγκόλλησης τους, τότε στα όρια των κόκκων του ωσθενίτη ξεκινάει ο σχηματισμός καρβιδίων του χρωμίου με αποτέλεσμα στα σημεία αυτά να προκαλείται διάβρωση λόγω χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και χρώμιο. Η διάβρωση αυτή επιδεινώνεται από την ανομοιογένεια της φάσεως των καρβιδίων ενώ το φαινόμενο αυτό ονομάζεται περικρυσταλλική διάβρωση του χάλυβα. Για την αντιμετώπιση της περικρυσταλλικής διάβρωσης πρέπει να υπάρξει μείωση του άνθρακα σε ποσοστό μέχρι και 0.03% και να γίνει η πρόσμιξη τιτανίου ή νιόβιου. Λόγω ότι τα στοιχεία αυτά είναι ισχυρά καρβιδιογόνα, έχουν την τάση δηλαδή να σχηματίσουν καρβίδια, αποτρέπουν τον σχηματισμό των προηγούμενων καρβιδίων αντικρούοντας όλες τις συνέπειες της υπαρξής τους και δημιουργούν δικά τους καρβίδια του τιτανίου και του νιόβιου.

Α3. Φερριτικοί ανοξειδωτοί Χάλυβες

Περιέχουν άνθρακα από 0.10% έως και 0.30% και χρώμιο από 16% έως και 30%. Έχουν μόνο μια φάση τον φερρίτη δεν υπόκεινται σε θερμικές κατεργασίες, είναι μαγνητικοί και έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση από τους μαρτενσιτικούς ανοξειδωτούς χάλυβες, παρόλα αυτά υστερούν αρκετά στις μηχανικές ιδιότητες.

B. Πυρίμαχοι Χάλυβες

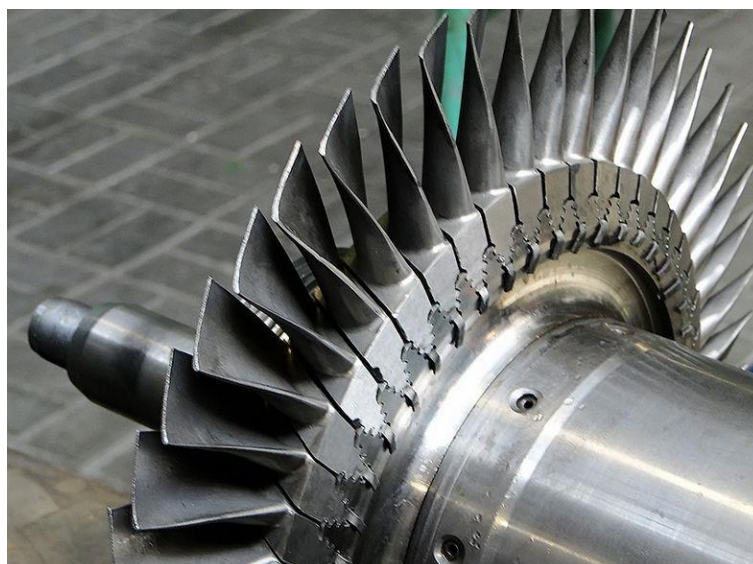
Πυρίμαχοι ονομάζονται οι χάλυβες οι οποίοι είναι σε θέση να λειτουργούν και να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των 500°C. Οι πυρίμαχοι χάλυβες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή βαλβίδων μηχανών εσωτερικής καύσης, σωληνώσεων εγκαταστάσεων ατμού, πτερύγια στροβίλων, κιβώτια ανοπτήσεως κλπ. Αυτοί οι χάλυβες θα πρέπει να έχουν τις εξής ιδιότητες (Εικόνα 2.6) :

Αντοχή στην διάβρωση.

Καλή μηχανική αντοχή και

Να μην υφίστανται συστολές και διαστολές με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ενδεικτικά μερικές θερμοκρασίες που μπορούν να λειτουργήσουν οι χάλυβες αυτοί είναι από 600°C - 700°C ενώ οι ωσθενιτικοί νικελοχρωμιούχοι χάλυβες μπορούν μέχρι 1100°C χωρίς να υπάρχει αλλαγή στις ιδιότητες τους.



Εικόνα 2.6: Πτερύγια στροβίλου κατασκευασμένα έτσι, ώστε να αντέχουν υψηλές θερμοκρασίες. [27]

Γ. Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών

Τα συγκεκριμένα κράματα μπορούν να χωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες: τα μαγνητικά μαλακά τα οποία μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται χωρίς να χάνεται σημαντικό ποσό ενέργειας και τα μαγνητικά σκληρά τα οποία μετά την απομαγνήτισή τους διατηρούν το μαγνητισμό τους.

Γ₁. Μαγνητικώς μαλακά κράματα

Τα κράματα αυτά έχουν μεγάλο συντελεστή μαγνητικής διαπερατότητας και μικρές απώλειες ενέργειας. Οι απώλειες της ενέργειας περιλαμβάνουν τις απώλειες ενέργειας από μαγνητική υστέρηση και δινορεύματα. Στα συγκεκριμένα κράματα ο σίδηρος χρησιμοποιήθηκε ως μαγνητικώς μαλακό υλικό και ακολούθησαν οι πυριτιούχοι χάλυβες με ελάχιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) και ποσοστό πυριτίου μέχρι 4.50%

Γ₂. Μαγνητικώς σκληρά κράματα

Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μονίμων μαγνητών πράγμα που σημαίνει ότι διακρίνονται από μεγάλο μαγνητισμό και για να απομαγνητιστούν θα πρέπει να εφαρμοσθεί αντίθετο μαγνητικό φορτίο μεγάλης έντασης. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε σαν μαγνήτης κράμα με άνθρακα (C) από 0.80% ως 1.00% ενώ αργότερα έγιναν και άλλες προσθήκες όπως βολφράμιο (W), χρώμιο (Cr), μολυβδαίνιο (Mo) και κοβάλτιο (Co).

3. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

3.1 Ορισμός, σημασία και είδη θερμικών κατεργασιών

Θερμική κατεργασία μετάλλου ή κράματος ονομάζουμε την διαδικασία θέρμανσης και απόψυξης ενός μεταλλικού τεμαχίου που γίνεται με σκοπό την απόκτηση συγκεκριμένης κρυσταλλικής δομής και κατά συνέπεια συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων. Οι χάλυβες αποτελούν κράματα που έχουν την ικανότητα να αποκτούν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες εάν και εφόσον υποστούν συγκεκριμένες θερμικές κατεργασίες γεγονός που ωφελείται στους μετασχηματισμούς της κρυσταλλικής τους δομής σε στερεά κατάσταση. Οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων είναι άρρηκτα δεμένες με την κρυσταλλική τους δομή και το μέγεθος κόκκου. Για τον λόγο αυτό οι θερμικές κατεργασίες έχουν ιδιαίτερη σημασία αφού μέσω αυτών μπορεί κάποιος να ρυθμίσει την κρυσταλλική δομή και το μέγεθος κόκκου. Με την εκτέλεση λοιπόν συγκεκριμένων θερμικών κατεργασιών είναι δυνατόν να υπάρξει αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα και βελτίωση της αντοχής του, της ευθραυστότητας του και της πλαστικότητας του. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τελική μορφή της κρυσταλλικής δομής του χάλυβα είναι: η ανώτατη θερμοκρασία στην οποία θερμαίνεται το εξάρτημα, ο χρόνος παραμονής του εξαρτήματος στην θερμοκρασία αυτή, και η ταχύτητα με την οποία αποψύχεται, η οποία καθορίζεται από το μέσο που χρησιμοποιείται για την απόψυξη (νερό, λάδι, αέρα). Οι βασικότερες θερμικές κατεργασίες που χρησιμοποιούνται είναι: η πλήρης ανόπτηση, η εξομάλυνση, η ανόπτηση για ανακρυστάλλωση, η αποτακτική ανόπτηση, η ανόπτηση για σφαιροποίηση του σεμεντίτη, η βαφή και η επαναφορά. Εκτός από τις θερμικές κατεργασίες δομής υπάρχουν και οι θερμικές κατεργασίες επιφάνειας όπως: ενανθράκωση, εναζώτωση, φλογοβαφή, βαφή με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Με τις επιφανειακές κατεργασίες πετυχαίνεται μεγάλη σκληρότητα στην επιφάνεια του τεμαχίου ενώ η αντοχή και η δυσθραυστότητα του πύρινα παραμένουν σε ανεκτά όρια.

3.2 Ανοπτήσεις Χαλύβων

Οι χάλυβες υπόκεινται σε πολλά είδη ανοπτήσεων προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητες τους. Εκτός από τα είδη ανόπτησης που θα περιγράψουν στην συνέχεια, με βάση τις θερμικές κατεργασίες που έχουν εκτελεσθεί, μπορούν να εφαρμοστούν και άλλα είδη ανοπτήσεων τα οποία εξαρτώνται από τη μικροδομή των κατεργασμένων χαλύβων και τις επιθυμητές μηχανικές ή άλλες ιδιότητες [21].

3.2.1 Πλήρης ανόπτηση

Οι χάλυβες μπορούν να υποβληθούν σε πολλές κατηγορίες ανοπτήσεων οι οποίες κάθε φορά εξαρτώνται από την περίπτωση και την μετέπειτα χρήση. Η διαδικασία της πλήρους ανόπτησης περιλαμβάνει:

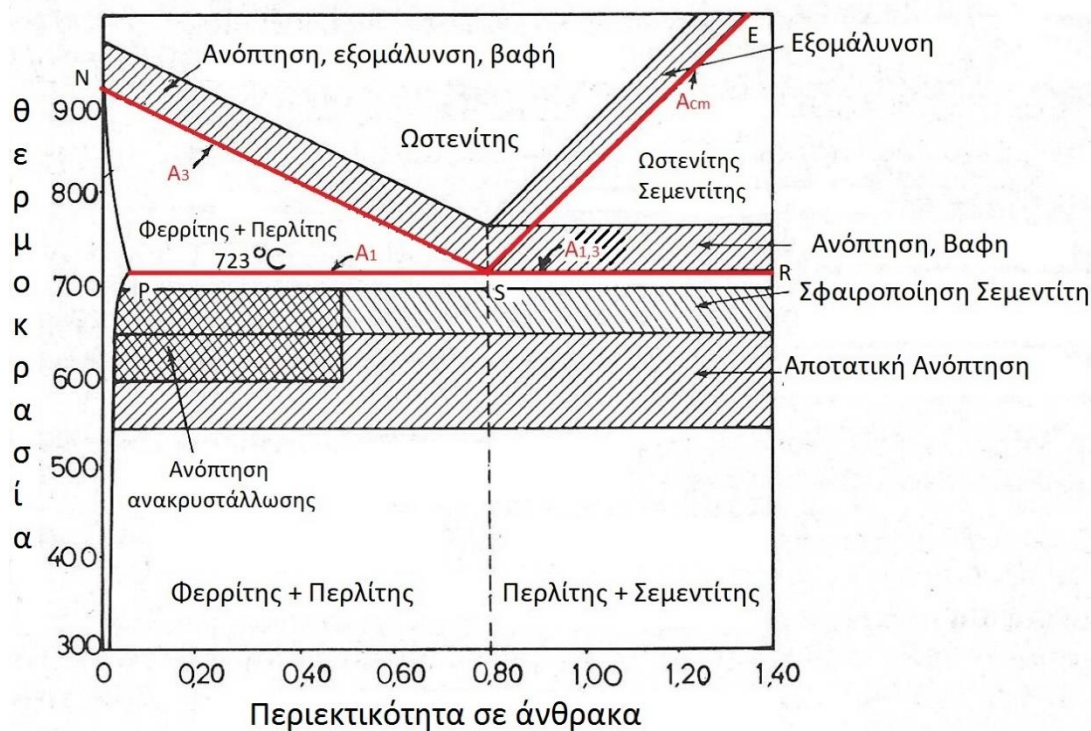
Την θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία ψηλότερη κατά 50°C από την θερμοκρασία A_1 (θερμοκρασία ευτηκτειδούς αντιδράσεως) ή A_3 (θερμοκρασία μετασχηματισμού), ανάλογα με το ποσοστό του άνθρακα.

Την παραμονή σε αυτή την θερμοκρασία για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται κάθε φορά.

Την ήρεμη απόψυξη του χάλυβα που συνήθως γίνεται στον ίδιο τον φούρνο και μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το αποτέλεσμα είναι να προκύψει μια δομή με πλήρη ευστάθεια και ισορροπία. Η ανόπτηση έχει ως στόχο να μετατρέψει το κράμα σε μαλακό και ομοιογενή, να το απαλλάξει από τυχόν εσωτερικές τάσεις και να βελτιώσει την κατεργαστικότητα. Έτσι αν ένας χάλυβας μετά από θερμικές κατεργασίες έχει αποκτήσει κρυσταλλική δομή μαρτενσίτη, μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση και να αποκτήσει εκ νέου δομή περλίτη. Σε χάλυβες με μεγάλα ποσοστά άνθρακα, όπως οι χάλυβες εργαλείων, η ανόπτηση δεν ενδείκνυται αφού στην περίπτωση αυτή ο χάλυβας αποκτά κόκκους περλίτη και στα όρια αυτών σχηματίζεται σκληρός σεμεντίτης με αποτέλεσμα το εξάρτημα να αποκτά χαμηλή δυσθραυστότητα, ενώ επιπλέον μειώνεται και η κατεργαστικότητά του.

Η θέρμανση του χάλυβα αποτελεί έναν παράγοντα ιδιαίτερης σημασίας και εξαρτάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από την ποσότητα του άνθρακα που περιλαμβάνεται. Οι υποευκτηκτοειδείς χάλυβες ($C < 0.80\%$) θερμαίνονται κατά 50°C πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία A_3 (Εικόνα 3.1) για να αποκτήσουν δομή ωστενίτη. Έτσι λοιπόν αν η περιεκτικότητα του άνθρακα είναι $C = 0.30\%$ η θερμοκρασία ανοπτήσεων θα είναι περίπου 880°C ενώ αν η περιεκτικότητα του άνθρακα είναι $C = 0.60\%$ η θερμοκρασία θα είναι 830°C αντίστοιχα. Στην περίπτωση των υπereυκτηκτοειδών χαλύβων η δομή ωστενίτη προκύπτει με την θέρμανση σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα ο χάλυβας να αποκτά μεγάλους κόκκους οι οποίοι έχουν μεγάλο αντίκτυπο στις μηχανικές του ιδιότητες.



Εικόνα 3.1: Αναπαράσταση διαγράμματος θερμοκρασιών για τις θερμικές κατεργασίες χαλύβων, ανάλογα την περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Για αυτόν τον λόγο η θέρμανση αυτών των χαλύβων γίνεται 50°C πάνω από την θερμοκρασία τριφασικής ισορροπίας ή θερμοκρασία ευτηκτοειδούς σημείου (723°C), δηλαδή περίπου στους 770°C . Κατά την θέρμανση του χάλυβα πρέπει να γνωρίζουμε τα εξής πράγματα:

Απότομη θέρμανση του εξαρτήματος προκαλεί απότομη διαστολή στην επιφάνεια του, ενώ λόγω πάχους και διατομής ο πυρήνας διαστέλλεται λιγότερο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλων εσωτερικών τάσεων οι οποίες με την σειρά τους μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες διαστασιακές μεταβολές στο τεμάχιο ή ακόμα και την θραύση του.

Ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι τόσοσ ώστε το δοκίμιο να αποκτήσει ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλη την μάζα του και στην συνέχεια δομή ωστενίτη.

Κατά την θέρμανση τεμαχίων χάλυβα σε τόσο μεγάλες θερμοκρασίες η επιφάνεια του οξειδώνεται γεγονός που επηρεάζει πολύ την χρήση τους. Ο άνθρακας της επιφανειακής στιβάδας μπορεί να καεί τελείως είτε μερικώς σε ορισμένο βάθος, αυτό ονομάζεται ενανθράκωση και συμβαίνει ταυτόχρονα με την οξείδωση. Αν η ταχύτητα οξείδωσης είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα ενανθράκωσης τότε επιφανειακά

δημιουργείται ένα οξείδιο το οποίο προστατεύει την δομή του χάλυβα που βρίσκεται από κάτω. Αν συμβαίνει το αντίθετο τότε ο χάλυβας επιφανειακά, χάνει σταδιακά τον άνθρακα του.

Αν η θέρμανση γίνει σε μεγαλύτερη από την καθορισμένη θερμοκρασία τότε ο χάλυβας υπερθερμαίνεται και αποκτά χονδρόκοκκη κρυσταλλική δομή η οποία συμβάλει στην χαμηλή σκληρότητα και γενικά στην μείωση των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Τα τεμάχια μετά την παραμονή τους για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στην κατάλληλη θερμοκρασία ανόπτησης αφήνονται να ψυχθούν πολύ αργά μέσα στον φούρνο μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αν τα τεμάχια απομακρυνθούν από τον φούρνο ώστε να κρυώσουν στον ελεύθερο αέρα, ο χρόνος απόψυξης τους μειώνεται.

3.2.2 Εξομάλυνση δομής

Η εξομάλυνση εκτελείται κατά τον τρόπο που εκτελείται και η πλήρης ανόπτηση με την διαφορά ότι στους υπερευνηκτοειδείς χάλυβες η θέρμανση γίνεται 50 - 85°C πάνω από την A_3 ή A_{cm} (Εικόνα 3.1). Επιπλέον η απόψυξη των τεμαχίων πραγματοποιείται πάντα σε ήρεμο αέρα και για αυτόν τον λόγο δεν παραμένουν ποτέ μέσα στον κλίβανο, έτσι λοιπόν η ταχύτητα αποψύξεως της εξομάλυνσης είναι μεγαλύτερη από εκείνη της ανόπτησης με αποτέλεσμα ο χάλυβας μετά την εξομάλυνση να είναι περισσότερο λεπτόκοκκος από εκείνον που έχει υποστεί ανόπτηση. Εφόσον οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα επηρεάζονται από την δομή του είναι σαφές ότι μετά την εξομάλυνση ο χάλυβας αποκτά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από ότι μετά την ανόπτηση[19]. Η εξομάλυνση συγκριτικά με την ανόπτηση έχει ως στόχο: την ελάττωση του μεγέθους των κόκκων του χάλυβα, την βελτίωση των μηχανικών του ιδιοτήτων, να κάνει τον χάλυβα περισσότερο ομοιογενή, να βελτιώσει την κατεργαστικότητα των χαλύβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και να βοηθήσει στην αφαίρεση τυχόν παραμενουσών τάσεων και διαφορισμών (συγκέντρωση ακαθαρσιών και προσμίξεων στα όρια των κόκκων κατά την χύτευση) σε χυτά τεμάχια [21].

3.2.3 Ανόπτηση σφαιροποίησης του σεμεντίτη.

Όπως προαναφέρθηκε η ανόπτηση σε χάλυβες με μεγάλα ποσοστά άνθρακα δεν φέρει τα κατάλληλα αποτελέσματα λόγω παρουσίας του σεμεντίτη στα όρια των κόκκων. Ο σεμεντίτης είναι μια φάση σκληρή και εύθραυστη, με αποτέλεσμα η παρουσία της να κατακρημνίζει τις μηχανικές του ιδιότητες και την κατεργαστικότητα του χάλυβα. Προς την βελτίωση της κατεργαστικότητας αυτής ακολουθείται μια συγκεκριμένη

θερμική κατεργασία η οποία ονομάζεται ανόπτηση σφαιροποίησης του σεμεντίτη κατά την οποία συνίσταται παρατεταμένη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη της A_1 (723°C) (Εικόνα 3.1), και αμέσως μετά ακολουθεί ήρεμη απόψυξη.

Με την κατεργασία αυτή ο σεμεντίτης χάνει την πλακοειδή μορφή που έχει μέσα στον συνηθισμένο περλίτη καθώς και στα όρια των κόκκων και αποκτά σφαιροειδή μορφή, η οποία δίνει στον χάλυβα καλή κατεργαστικότητα και καλή πλαστικότητα. Διάφορα τεμάχια μετά την θερμοκρασία (κατεργασία που έχει σκοπό την διαμόρφωση του χάλυβα εν θερμώ), υπόκεινται ανόπτηση με σκοπό να γίνει η σφαιροποίηση του σεμεντίτη και εν τέλει να διευκολυνθεί η κατεργασία τους.

3.2.4 Ανόπτηση για ανακρυστάλλωση

Η θερμική αυτή κατεργασία χρησιμοποιείται σε χάλυβες που έχουν υποστεί ψυχρηλασία (κατεργασία μορφοποίησης εν ψυχρώ) και έχει ως στόχο την εξάλειψη του ιστού της ενδοτράχυνσης ώστε να καταστεί δυνατή η περαιτέρω κατεργασία μορφοποίησης. Εφαρμόζεται σε χάλυβες με χαμηλά ποσοστά άνθρακα και εκτελείται σε θερμοκρασίες από 600°C έως και μέχρι 700°C . Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον έλεγχο της θερμοκρασίας η οποία δεν πρέπει να ανέβει υψηλότερα από τους 723°C . Το τεμάχιο θερμαίνεται για αρκετό χρόνο ώστε όλη του η μάζα να αποκτήσει ομοιόμορφη θερμοκρασία και να γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές στην κρυσταλλική του δομή ενώ ακολουθεί ήρεμη απόψυξη στον αέρα.

3.2.5 Αποτατική ανόπτηση

Στην κατεργασία αυτή ο χάλυβας θερμαίνεται στους 550°C έως και τους 650°C και ακολουθεί αργή απόψυξη μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Λόγω της διάχυσης ατόμων εξαιτίας της αργής μεταβολής θερμοκρασιών πραγματοποιείται εξάλειψη των εσωτερικών μηχανικών τάσεων που έχουν προέλθει από όλη την διάρκεια της κατεργασίας και παραγωγής. Επιπλέον η θερμική αυτή κατεργασία δεν μεταβάλλει την μικροδομή των χαλύβων.

3.3 Βαφή

Η βαφή του χάλυβα περιλαμβάνει τα έξης στάδια:

Την θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία λίγο υψηλότερη (κατά 50°C) από εκείνη της A_3 ή A_1 , ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Παραμονή στην θερμοκρασία αυτή για ορισμένο χρονικό διάστημα για να αποκτήσει μοιόμορφη θερμοκρασία σε όλη την μάζα του.

Ακολουθεί ταχεία απόψυξη μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Γενικά για να πραγματοποιηθεί η θερμική κατεργασία της βαφής, ο χάλυβας θα πρέπει να έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη από 30%. Χάλυβες με μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα χρησιμοποιούνται σε κατάσταση ανοπτήσεως ή εξομαλύνσεως και δεν βράφονται.

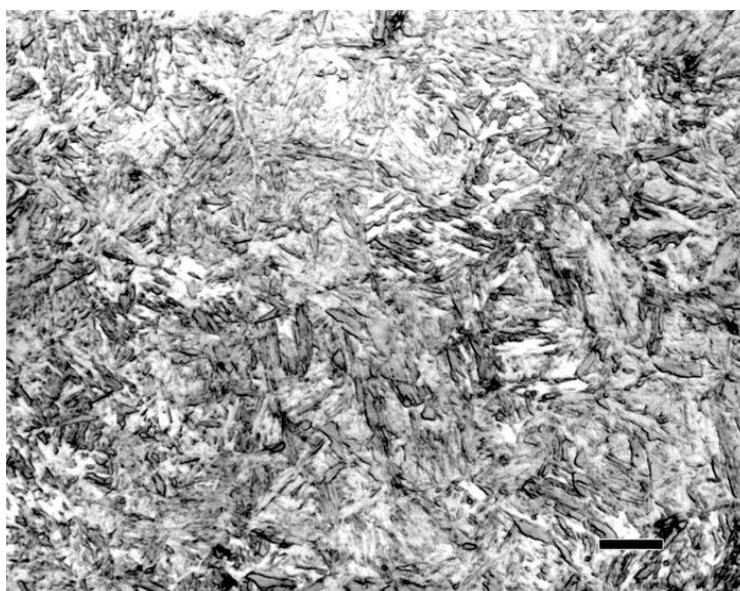
3.3.1 Ωστενιτοποίηση

Όπως προαναφέρθηκε η βαφή συνιστά την παραμονή του τεμαχίου σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά 50°C της κρίσιμης θερμοκρασίας. Ο χρόνος παραμονής στην θερμοκρασία αυτή θα πρέπει να είναι αρκετός ώστε να πραγματοποιηθεί η πλήρης μετατροπή του κράματος σε ομογενή ωστενίτη, χωρίς όμως ο χρόνος αυτός να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αύξηση της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση αύξηση των κόκκων (υπερθέρμανση). Κατά την διάρκεια της θέρμανσης παρατηρείται ορισμένη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του πυρήνα του δοκιμίου η οποία μπορεί να προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση στο κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη. Πρέπει λοιπόν να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην θέρμανση του τεμαχίου η οποία πρέπει να γίνει πάρα πολύ αργά ανάλογα κάθε φορά την μάζα του. Αν ο χάλυβας κατά την πύρωση του εκτεθεί σε οξειδωτική ατμόσφαιρα σχηματίζεται στην επιφάνεια του στρώμα από σκουριά γεγονός που συνοδεύεται από επιφανειακή απώλεια υλικού και ελάττωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα [21]. Αυτό το στρώμα σκουριάς μπορεί να λειτουργήσει και ως θερμομονωτικό και επομένως κατά την απόψυξη του τεμαχίου ελαττώνεται ο ρυθμός ροής της θερμότητας από το τεμάχιο προς το οποδήποτε κάθε φορά λουτρό. Έτσι ελαττώνεται η ταχύτητα αποψύξεως και το τεμάχιο μπορεί να μην βαφεί σωστά. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την χρήση φούρνων ελεγχόμενης ατμόσφαιρας.

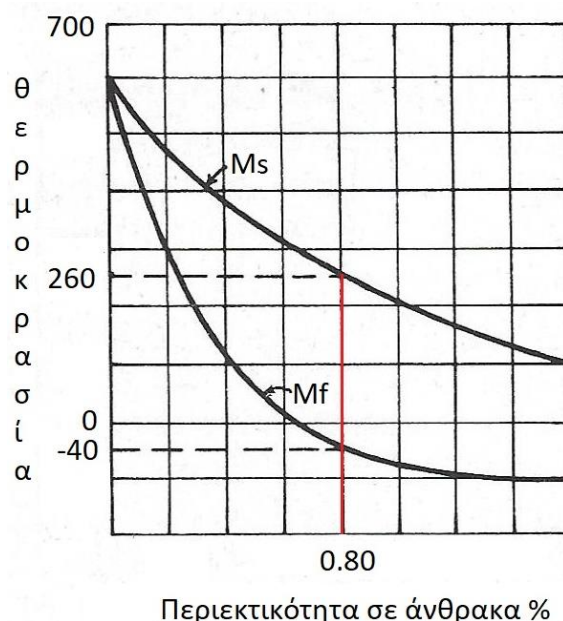
3.3.2 Απόψυξη του χάλυβα

Η ταχύτητα απόψυξης του τεμαχίου από την θερμοκρασία ωστενιτοποίηση μέχρι και την θερμοκρασία όπου ολοκληρώνεται ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη (Εικόνα 3.2) παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε όλη την διαδικασία βαφής του χάλυβα. Οι θερμοκρασίες ενάρξεως m_s και τέλους m_f του μετασχηματισμού του ωστενίτη σε μαρτενσίτη εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την περιεκτικότητα του

χάλυβα σε άνθρακα. Ένας ευτυκτοειδής χάλυβας με 0.80% ποσοστό άνθρακα (C) έχει θερμοκρασία έναρξης τους 260°C και θερμοκρασία τέλους τους -40°C (Εικόνα 3.3). Έτσι λοιπόν αν ψύξουμε τον συγκεκριμένο χάλυβα από την θερμοκρασία ωστενιτοποίηση μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος αποκτάει κρυσταλλική δομή μαρτενσίτη καθώς και ορισμένη ποσότητα ωστενίτη ο οποίος έχει παραμείνει. Ο ωστενίτης αυτός παραμένει διότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλότερη από τους -40°C στους οποίους όλη η ποσότητα ωστενίτη έχει μετατραπεί σε μαρτενσίτη. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται: από το ψυκτικό μέσο (λουτρό βαφής) που χρησιμοποιείται κάθε φορά το οποίο έχει διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και θερμοκρασία, από το βαθμό στο οποίον το λουτρό βαφής αναταράσσεται, και από το μέγεθος διατομής του τεμαχίου το οποίο βάφεται.



Εικόνα 3.2: Μικροδομή μαρτενσίτη μετά από βαφή [28].



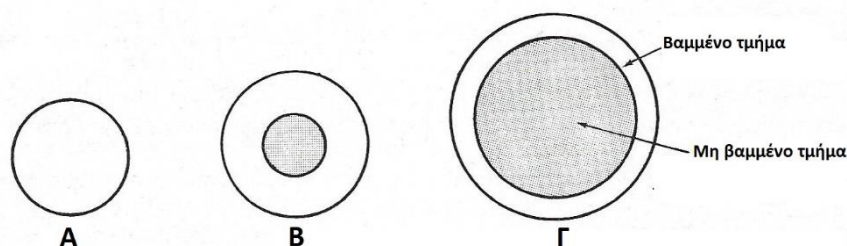
Εικόνα 3.3: Απεικόνιση γραμμών mf και ms και αντίστοιχων θερμοκρασιών ανάλογα το ποσοστό του άνθρακα.

3.3.3 Μέσα βαφής και Δραστικότητα

Ένα ιδανικό ψυκτικό μέσο θα πρέπει να είναι σε θέση να επιβάλλει μεγάλη ταχύτητα απόψυξης κατά την αρχική εμβάπτιση του τεμαχίου και συγχρόνως όσο περνάει ο χρόνος να επιβάλλει μικρή ταχύτητα απόψυξης ώστε να αποφεύγονται έντονες παραμορφώσεις. Δραστικότητα λουτρού βαφής ονομάζουμε την δυνατότητα που έχει αυτό να αναπτύξει μεγαλύτερη ή μικρότερη ταχύτητα αποψύξεως σε τεμάχιο ορισμένων διαστάσεων. Η δραστικότητα αυτή δίνεται από έναν συντελεστή ο οποίος καλείται δραστικότητα του μέσου βαφής (H). Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται κατά μεγάλο μέρος από την ταχύτητα απόψυξης, η οποία επιτυγχάνεται με το δεδομένο μέσο βαφής και εξαρτάται από το είδος του μέσου καθώς και από τον βαθμό στον οποίο αναταράσσεται (ανάδευση). Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου τόσο ελαττώνεται η ταχύτητα της ψύξης του μετάλλου, εφόσον το υγρό βρίσκεται κοντά στην θερμοκρασία στην οποία εξατμίζεται. Σε πολλές περιπτώσεις για να αποφύγει κανείς την μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του λουτρού προστίθενται σε αυτό ψυκτικά στοιχεία τα οποία σταθεροποιούν την θερμοκρασία του και αποτρέπουν την αύξηση της. Είναι σημαντικό να προστεθεί, ότι τα πιο δραστικά λουτρά μπορεί να προκαλέσουν την εμφάνιση εσωτερικών τάσεων και κατ' επέκταση την δημιουργία ρηγματώσεων. Σαν λουτρά βαφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά σειρά δραστικότητας τα εξής: αλατισμένο νερό ή αλλιώς διάλυμα νερού με 10% χλωριούχο νάτριο, νερό, τηγμένα άλατα, λάδια βαφής, αέρας σε ηρεμία.

3.3.4 Φαινόμενο μάζας

Είναι λογικό το γεγονός ότι κατά την διάρκεια της βαφής η ταχύτητα με την οποία αποψύχεται το τεμάχιο ελαττώνεται από την επιφάνεια προς τον πύρινα. Όσο αυξάνεται η διατομή του τεμαχίου τόσο περισσότερο γίνεται αντιληπτή η ελάττωση της ταχύτητας. Έτσι λοιπόν αν γίνει η βαφή ενός τεμαχίου με μεγάλη διατομή θα παρατηρηθεί ότι ενώ στην επιφάνεια έχει διαμορφωθεί κρυσταλλική δομή μαρτενσίτη, στο υπόλοιπο μέρος της μάζας τους υπάρχει μπαινίτης ή περλίτης (Εικόνα 3.4). Το φαινόμενο αυτό που αφορά την ατελή βαφή ενός τεμαχίου με μεγάλη διατομή ονομάζεται φαινόμενο μάζας. Σε ορισμένες περιπτώσεις με την προσθήκη ορισμένων χρωματικών στοιχείων τα οποία είναι σε θέση να ελαττώσουν την κρίσιμη ταχύτητα βαφής έτσι ώστε το τεμάχιο να μπορέσει να βαφεί επιτυχώς και σε όλη την μάζα του ακόμα και με λιγότερο δραστικά λουτρά βαφής, βέβαια και στην περίπτωση αυτή υπάρχει κάποιο όριο στο μέγεθος της διατομής του τεμαχίου [19].



Εικόνα 3.4: Επίπτωση της διατομής του εξαρτήματος στο βάθος της βαφής. Από αριστερά προς τα δεξιά: το Α είναι πλήρως βαμμένο ενώ στο Β δεν έχει βαφεί ο πυρήνας και στο Γ έχει βαφεί μόνο η επιφανειακή στρώση.

3.3.5 Εμβαπτότητα

Με την βαφή ο χάλυβας γίνεται ανθεκτικότερος, σκληρότερος και αποκτά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Για να θεωρείται μια βαφή επιτυχημένη θα πρέπει η απόψυξη του τεμαχίου να πραγματοποιηθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης έτσι ώστε να γίνει ο μετασχηματισμός του ωστενίτη και ο χάλυβας να αποκτήσει 100% μαρτενσιτική δομή. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται από το ποσοστό του άνθρακα που περιέχεται μέσα στον χάλυβα. Όσο περισσότερο άνθρακα έχει ένας χάλυβας τόσο περισσότερο μειώνεται η ταχύτητα μετασχηματισμού λόγω διάχυσης η οποία είναι ανάλογη του αριθμού των πυρήνων που σχηματίζονται στην επιφάνεια [21]. Εφόσον λοιπόν τα όρια των κόκκων αποτελούν σημεία στα οποία δημιουργούνται πυρήνες είναι σαφές ότι όσα περισσότερα όρια κόκκων έχει ένας χάλυβας τόσο

περισσότεροι πυρήνες θα σχηματίζονται. Έτσι λοιπόν ένας λεπτόκοκκος χάλυβας μετασχηματίζεται πολύ πιο γρήγορα από έναν χονδροκόκκο και κατά συνέπεια έχει υψηλότερη τιμή κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης. Με την προσθήκη ορισμένων κραματικών στοιχείων είναι δυνατή η μετατόπιση των καμπυλών TTT προς τα δεξιά, και κατά συνέπεια την επίτευξη μεγάλων τιμών Εμβαπτότητα, της ικανότητας δηλαδή των μετάλλων να μετασχηματίζονται μαρτενσιτική δομή σε μεγάλο βάθος από την επιφάνεια ακόμη και αν το μέσο βαφής που χρησιμοποιείται είναι χαμηλής δραστηριότητας

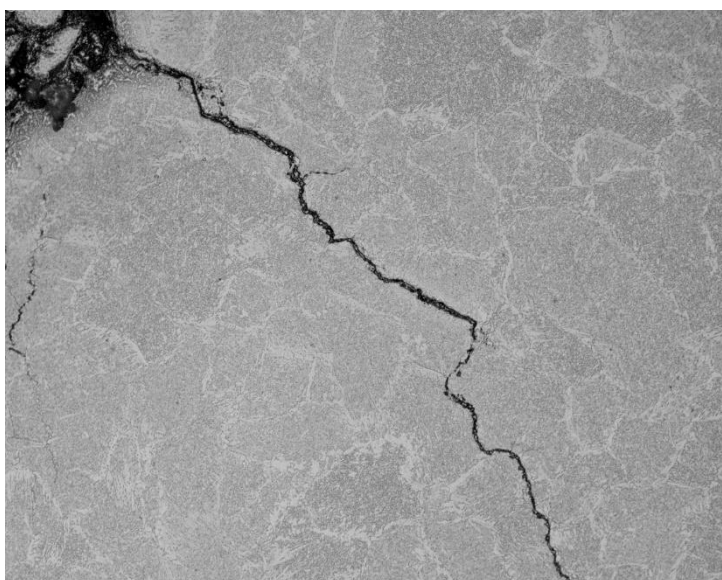
Πειραματικά η εμβαπτότητα των μετάλλων προσδιορίζεται με την δοκιμή Jominy. Κυλινδρικό δοκίμιο συγκεκριμένων διαστάσεων θερμαίνεται σε φούρνο ώστε να γίνει πλήρης ωστενιτοποίηση του και αμέσως μετά τοποθετείται στο περιβάλλον και στερεώνεται με τρόπο τέτοιο ώστε η μια του πλευρά να βρέχεται συνεχώς από νερό. Όταν το δοκίμιο φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τότε γίνεται μέτρηση σκληρότητας σε όλο το μήκος μιας γενέτειρας του δοκιμίου. Οι χάλυβες με υψηλή εμβαπτότητα εμφανίζουν σταθερές τιμές σκληρότητας διότι η ταχύτητα με την οποία αποψύχθηκε ακόμα και στο μη ψυχόμενο άκρο του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης. Στην περίπτωση του χάλυβα μέτριας εμβαπτότητας υπάρχει ελάττωση της σκληρότητας σταδιακά και κατά μήκος του δοκιμίου, όσο απομακρύνεται κανείς από το σημείο που έχει επαφή με το νερό. Επιπλέον η απόσταση από το άκρο που ψύχεται με νερό κατά την οποία ο ωστενίτης έχει μετασχηματιστεί κατά 50% σε μαρτενσίτη ονομάζεται βάθος βαφής. Ένας χάλυβας λέγεται ότι έχει καλή εμβαπτότητα όταν μετά την θερμική κατεργασία εμφανίζει μεγάλο βάθος βαφής, ενώ η Εμβαπτότητα του εξαρτάται από την μάζα του, το είδος του και το μέσο απόψυξης.

3.3.6 Αστοχίες κατά την βαφή

Η απότομη και ανομοιόμορφη θέρμανση όπως και απόψυξη μπορεί να προκαλέσουν ανομοιογένεια του τεμαχίου, με αποτέλεσμα η σκληρότητα του να διαφέρει πολύ από σημείο σε σημείο. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να προέλθει αν και εφόσον υπάρξει εκ του θέρμανση και βαφή.

Ορισμένες φορές παρατηρείται το γεγονός ότι το τεμάχιο δεν έχει αποκτήσει την σκληρότητα που θα έπρεπε μετά την βαφή. Η ανεπαρκής αυτή βαφή μπορεί να ωφελείται είτε στο μέσο απόψυξης το οποίο μπορεί να είχε χαμηλότερη δραστηριότητα από εκείνη που χρειαζόταν, είτε στην θέρμανση σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την ορισμένη θερμοκρασία βαφής.

Όταν η ταχύτητα απόψυξης είναι πολύ μικρή και το λουτρό διακρίνεται από μεγάλη δραστικότητα είναι πιθανών κατά την ψύξη του τεμαχίου να δημιουργηθούν εσωτερικές τάσεις οι οποίες στην συνέχεια θα προκαλέσουν ρωγμές ή και στρεβλώσεις (Εικόνα 3.5). Ο μετασχηματισμός του οστενίτη σε μαρτενσίτη προκαλεί ανομοιόμορφη διαστολή του τεμαχίου η οποία ωφελείται στην διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας και του πυρήνα. Επειδή ο σχηματισμός αυτός γίνεται απότομα δημιουργούνται μεγάλες εσωτερικές τάσεις. Αυτό σε συνδυασμό με τις τάσεις που μπορεί να υπήρχαν από πριν στο τεμάχιο οι οποίες προέρχονται από την μορφοποίηση του, τις συγκολλήσεις που μπορεί να υπάρχουν και την κατασκευή του, μπορεί να προκαλέσει στρέβλωση και αλλαγή των διαστάσεων του τεμαχίου αν αυτές οι τάσεις είναι μικρές. Στην περίπτωση που οι τάσεις είναι μεγαλύτερες μπορούν να δημιουργηθούν ρωγμές στην επιφάνεια και στο εξωτερικό του. Για την αποφυγή τέτοιων περιπτώσεων πρέπει να γίνεται μια σωστή μελέτη πριν την κάθε θερμική κατεργασία ώστε να γίνει εκλογή του κατάλληλου χάλυβα με μικρή κρίσιμη ταχύτητα βαφής, να χρησιμοποιηθεί το καταλληλότερο λουτρό απόψυξης με την αντίστοιχη δραστικότητα και σε κάποιες περιπτώσεις να γίνει εφαρμογή της κλιμακωτής βαφής η οποία χωρίζεται στην κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή, στην κλιμακωτή μπαινιτική βαφή και στην μπαινιτομαρτενσιτική βαφή.



Εικόνα 3.5: Οπτική μικρογραφία μικρορωγμής λόγω τάσεων [27].

3.3.7 Κλιμακωτή βαφή

3.3.7.1 Κλιμακωτή Μαρτενσιτική Βαφή

Για να γίνει αποφυγή τυχόν τάσεων που μπορεί να αναπτυχθούν κατά την απόψυξη του τεμαχίου η βαφή του πραγματοποιείται σε δυο στάδια. Μετά την θέρμανση του χάλυβα

το τεμάχιο αποψύχεται σε λουτρό τετηγμένων αλάτων για συγκεκριμένο χρόνο (συνήθως της τάξεως των δευτερολέπτων) και θερμοκρασίας μεγαλύτερης από εκείνη της έναρξης μετασχηματισμού του ωστενίτη, εν συνέχεια ο χάλυβας εμβαπτίζεται μέσα σε ψυχρό λουτρό ή αφήνεται στον αέρα να αποψυχθεί. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ξεκινά κατά την διάρκεια του δεύτερου σταδίου. Με αυτό το είδος βαφής ο χάλυβας αποκτά ομοιόμορφη θερμοκρασία κατά την διάρκεια της διαδικασίας με αποτέλεσμα ο πυρήνας και η επιφάνεια να μετασχηματίζονται ταυτοχρόνως σε μαρτενσίτη.

3.3.7.2 Κλιμακωτή Μπαινιτική Βαφή

Όπως και στην κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή και εδώ ακολουθείται ο ίδιος τρόπος με την διαφορά ότι στο δεύτερο στάδιο ο χάλυβας παραμένει μέσα στο λουτρό τετηγμένων αλάτων για πολύ μεγαλύτερο χρόνο (της τάξεως ωρών) προκειμένου να γίνει ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μπαινίτη ή σε λεπτόκοκκο περλίτη ανάλογα με την θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει χάλυβας με παρόμοιες ιδιότητες με εκείνον που έχει υποστεί βαφή και επαναφορά. Η κρυσταλλική δομή μπαινίτη δίνει στον χάλυβα υψηλό όριο διαρροής και θραύσης και καλή αντοχή στην κόπωση.

3.3.7.3 Κλιμακωτή Μπαινιτομαρτενσιτική Βαφή

Η τεχνική αυτή είναι μια ενδιάμεση κατάσταση της μαρτενσιτικής και μπαινιτικής κλιμακωτής βαφής. Ο χρόνος παραμονής του τεμαχίου στο λουτρό τετηγμένων αλάτων είναι της τάξεως των λεπτών. Αρχικά μέσα στο λουτρό ξεκινά ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μπαινίτη ενώ βγαίνοντας από το λουτρό ξεκινά ο μετασχηματισμός του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Το ποσοστό του μετασχηματισμού του ωστενίτη σε μπαινίτη και μαρτενσίτη εξαρτάται από το χρόνο παραμονής στο λουτρό αλάτων [21].

3.4 Επαναφορά

Με τα την βαφή του χάλυβα αυτός αποκτά πολύ μεγάλη σκληρότητα και ευθραυστότητα λόγω της δημιουργίας εσωτερικών τάσεων οι οποίες εν τέλη μπορεί να προκαλέσουν ρωγμές στο τεμάχιο. Έτσι λοιπόν για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν οι συγκεκριμένοι χάλυβες πρέπει να υποστούν αναθέρμανση προκειμένου ο μαρτενσίτη να μπορέσει να έρθει σε κατάσταση μερικής ισορροπίας. Ο μαρτενσίτη που προκύπτει μετρά από επαναφορά έχει χαμηλότερη σκληρότητα και αυξημένη δυσθραυστότητα και ολκιμότητα. Έτσι λοιπόν ο βαμμένος χάλυβας υπόκειται

επαναφορά για τους εξής λόγους: για να μπορέσει ο χάλυβας να γίνει κατάλληλος για χρήση μετά την εξάλειψη εσωτερικών τάσεων και αύξηση της ολκιμότητας του, για να μπορέσει ο μαρτενσίτης να ισορροπήσει μερικώς αφού μετά τον σχηματισμό του βρίσκεται σε κατάσταση πλήρης αστάθειας.

Όταν αναθερμαίνεται ένας χάλυβας ανάλογα την θερμοκρασία αναθέρμανσης παρατηρούνται διάφοροι μετασχηματισμοί όπως:

Από 100°C μέχρι 200°C

Σε αυτό το εύρος θερμοκρασίας παρατηρείται ο σχηματισμός πολύ μικρών, αοράτων με το μικροσκόπιο, καρβιδίων που προκύπτουν από την ένωση του σιδηρού και του άνθρακα. Άτομα άνθρακα εξέρχονται από το κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη το οποίο σιγά σιγά μετασχηματίζεται στο πλέγμα του φερρίτη. Στους 200°C ο χάλυβας αποτελείται από φερρίτη αυξημένου άνθρακα (0.30% αντί για 0.025%), ενώ ο μετασχηματισμός αυτός διαρκεί και σε επόμενες μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Στην θερμοκρασία αυτή το τεμάχιο έχει απαλλαγή εν μέρη από εσωτερικές τάσεις ενώ η σκληρότητα του ανέρχεται περίπου στα 700HV.

Από 200°C μέχρι και 300°C

Τα υποατομικά καρβίδια παραμένουν ενώ ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετασχηματίζεται σε φερρίτη. Στους 300°C η κρυσταλλική δομή του χάλυβα αποτελείται από φερρίτη λιγότερου ποσοστού άνθρακα αυτή την φορά (0.10%).

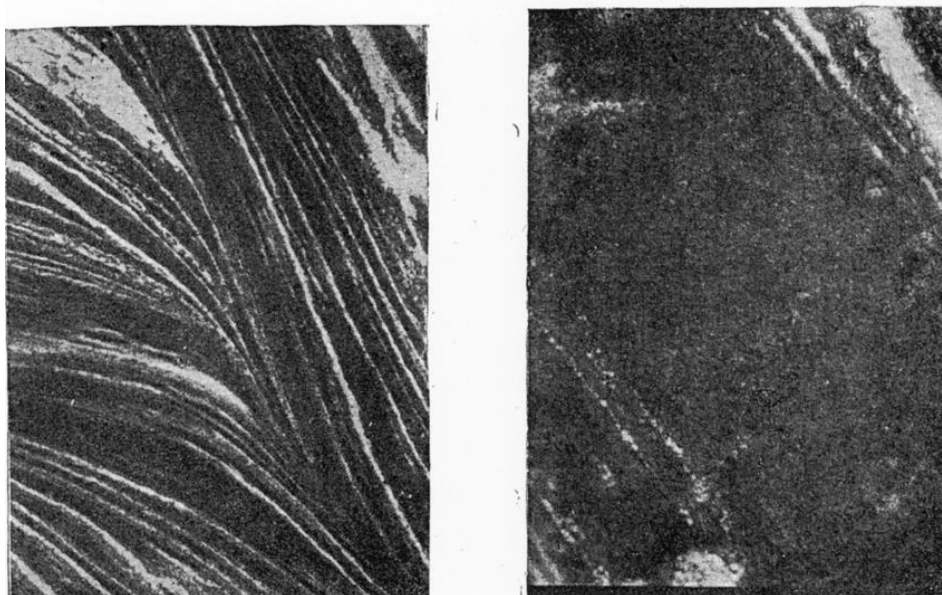
Από 300°C μέχρι και 400°C

Προοδευτικά τα καρβίδια αυτά μετατρέπονται σε σεμεντίτη ο οποίος σιγά σιγά παίρνει το κανονικό του μέγεθος ενώ στους 400°C ο φερρίτης έχει αποκτήσει το κανονικό του κρυσταλλικό πλέγμα.

Από 400 μέχρι και 723°C

Στους 500°C ο σεμεντίτης γίνεται ορατός με μικροσκόπιο και μεγαλώνουν οι κόκκοι του. Όταν η θερμοκρασία επαναφοράς φτάσει τους 600°C τότε ο χάλυβας αποκτά δομή φερρίτη με σφαιρίδια σεμεντίτη και σκληρότητα περίπου στα 270HV. Όταν η θερμοκρασία είναι στους 700°C παίρνουμε την κλασική δομή του πλακοειδούς περλίτη ενώ η εκτεταμένη παραμονή στην θερμοκρασία αυτή προκαλεί σφαιροποίηση του σεμεντίτη μέσα στους κόκκους του περλίτη. Μετά από επαναφορά μεταξύ των 350°C μέχρι και 450°C λαμβάνεται δομή τροοστίτη (Εικόνα 3.6) ο οποίος έχει μεγάλη δυσθραυστότητα με χαμηλή σκληρότητα και αντοχή. Μετά από επαναφορά στους 450°C μέχρι και 650°C προκύπτει η κρυσταλλική δομή του σορμπίτη ο οποίος

συγκριτικά με τον τροοσίτη έχει μικρότερη αντοχή αλλά μεγαλύτερη δυσθραυστότητα.



Εικόνα 3.6 : Αριστερά απεικονίζεται η κρυσταλλική δομή τροοσίτη και δεξιά η κρυσταλλική δομή σορμπίτη μετρά από επαναφορά τους 400°C.

3.4.1 Μηχανικές ιδιότητες μετά από επαναφορά

Όπως έχει προαναφερθεί ο χάλυβας μετά από βαφή αποκτά πολύ μεγάλη σκληρότητα αλλά πολύ χαμηλή δυσθραυστότητα και πλαστικότητα. Μετά την επαναφορά υπάρχει μεγάλη μεταβολή στις ιδιότητες του χάλυβα ο οποίος αποκτά χαμηλότερη σκληρότητα, αντοχή σε εφελκυσμό ενώ έχει καλύτερη πλαστικότητα και δυσθραυστότητα. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία επαναφοράς προοδευτικά μειώνεται η αντοχή σε εφελκυσμό. Η μέγιστη τιμή του ορίου θραύσης επιτυγχάνεται στους 100°C πράγμα που δικαιολογείται από το γεγονός ότι ακόμα και αν γίνει επαναφορά στους 100°C υπάρχει μερική εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων οι οποίες με την παρουσία τους επιδρούν αρνητικά στην αντοχή του χάλυβα. Επιπλέον με την αύξηση θερμοκρασία επαναφοράς, η αύξηση κόκκων του σεμεντίτη που προκύπτει, επιδρά θετικά στην δυσθραυστότητα του χάλυβα. Παρόλα αυτά υπάρχει ένα όριο στην θερμοκρασία διότι η εκτεταμένη αύξηση της πέραν του ορίου, προκαλεί πτώση της δυσθραυστότητας.

Μερικοί κραμματωμένοι χάλυβες παρόλο που υπόκεινται σε επαναφορά διατηρούν την αρχική σκληρότητα τους. Οι χάλυβες που περιέχουν χρώμιο διατηρούν την σκληρότητα τους μέχρι τους 500°C ενώ ακόμα και αν υπάρξει ελάττωση αυτής θα είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με την πτώση της σκληρότητας σε κοινούς ανθρακούχους

χάλυβες. Έτσι λοιπόν ενώ διατηρούν την σκληρότητα τους, μπορούν και γίνονται ολκιμότεροι λόγω επαναφοράς. Αυτό συμβαίνει σχεδόν με όλους τους χάλυβες που περιέχουν καρβιδιογόνα, στοιχεία τα οποία οφείλονται σε αυτή τους την συμπεριφορά η οποία καλείται αντοχή σε επαναφορά.

Η προσθήκη καρβιδιογόνων στοιχείων όπως το βανάδιο το μολυβδαίνιο και το βολφράμιο μέσα σε χάλυβες έχει ως αποτέλεσμα αυτοί να μην χάνουν την σκληρότητα τους σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται κοντά στους 600°C αντί για σεμεντίτη έχουμε τον σχηματισμό καρβιδίων (σκληρών ενώσεων). Οι χάλυβες αυτοί ανήκουν στους ταχυχάλυβες και συνήθως χρησιμοποιούνται για την δημιουργία εργαλείων κοπής ή κατεργασίας υψηλών ταχυτήτων και θερμοκρασιών. Επιπλέον σε μερικούς χάλυβες με υψηλές προσθήκες κραμματικών στοιχείων κατά την αργή απόψυξη τους, ξεκινάει η κατακρήμιση καρβιδίων τα οποία βρίσκονται διαλυμένα σε θερμοκρασίες άνω των 430°C. Λόγω της κατακρήμισης αυτής οι χάλυβες αυτοί αποκτούν υψηλή ευθραυστότητα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανωμαλία ευθραυστότητας λόγω επαναφοράς και μπορεί να αποφευχθεί αν η απόψυξη του τεμαχίου μετά την επαναφορά είναι απότομη.

3.5 Επιφανειακές κατεργασίες χαλύβων

Σε ορισμένες περιπτώσεις κρίνεται επιτακτική η ανάγκη οι επιφάνειες των διάφορων τεμαχίων να είναι σε θέση να δέχονται την άμεση επίδραση των προερχομένων από το περιβάλλον, μηχανικών καταπονήσεων. Έτσι λοιπόν κατά την λειτουργία τους τα πολλά εξαρτήματα πρέπει να έχουν σκληρή επιφάνεια ώστε να αντέχει τους διάφορους τύπου φθοράς και ταυτόχρονα να έχουν πολύ καλή δυσθραυστότητα στον πυρήνα τους. Οι επιφανειακές κατεργασίες αποσκοπούν μέσω της σκλήρυνσης στην ενίσχυση της επιφάνειας των υλικών σε μηχανικές και χημικές καταπονήσεις όπως την κόπωση, τη φθορά, τη διάβρωση και την οξειδωση. Οι επιφανειακές κατεργασίες χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τις μηχανικές κατεργασίες, τις θερμικές κατεργασίες και τις θερμομηχανικές κατεργασίες. Στις **μηχανικές κατεργασίες** ανήκουν τεχνικές όπως η σφαιροβολή, στην οποία η σκλήρυνση του κάθε τεμαχίου είναι μη ελεγχόμενη για αυτό το λόγο δεν είναι και διαδεδομένη, και η τεχνική με τα κρουστικά κύματα laser η οποία βρίσκεται σε πειραματικό ακόμα στάδιο. Στις **θερμικές κατεργασίες** ανήκουν η φλογοβαφή, η επαγωγική επιφανειακή θέρμανση και ο βομβαρδισμός με δέσμες υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Τέλος στις **θερμοχημικές τεχνικές** ανήκουν η ενανθράκωση, η εναζώτωση και η ενανθρακαζώτωση. Οι πιο διαδομένες τεχνικές

επιφανειακής κατεργασίας και στις οποίες θα γίνει αναφορά είναι η ενανθράκωση, η εναζώτωση, η φλογοβαφή και η βαφή με επαγωγική θέρμανση.

3.5.1 Ενανθράκωση

Η επιφανειακή αυτή κατεργασία πραγματοποιείται συνήθως σε χάλυβες με μικρά ποσοστά άνθρακα (0.10% έως 0,25%) και βασίζεται στο γεγονός ότι ο χάλυβας όταν βρίσκεται σε κατάσταση ωστενίτη έχει την ιδιότητα να εμποτίζεται επιφανειακά από άτομα άνθρακα σε θερμοκρασίες από 900°C - 950°C. Άτομα άνθρακα του περιβάλλοντος διαχέονται μέσα στο πλέγμα του ωστενίτη και αποτέλεσμα αυτού του εμποτισμού είναι η αύξηση του ποσοστού του άνθρακα στην επιφάνεια. Για να επιτευχθεί η μεγάλη επιφανειακή σκληρότητα είναι απαραίτητη η βαφή του αντικειμένου μετά το πέρας της ενανθράκωσης[21].

Για να επιτευχθεί η ενανθράκωση απαιτεί την παρουσία κάποιου ενανθρακωτικού μέσου ή ουσίας. Τα ενανθρακωτικά μέσα χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα στερεά, τα υγρά και τα αέρια. Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας [19].

Στερεά ενανθρακωτικά μέσα

Τα εξαρτήματα τα οποία θα υποστούν ενανθράκωση τοποθετούνται μαζί και παρουσία αυτών τοποθετείται και το μέσο ενανθράκωσης το οποίο στην περίπτωση αυτή αποτελείται από 60% έως 90 ξυλάνθρακα και 40% έως 10% ανθρακικό βάριο το οποίο μπορεί να αντικατασταθεί και με ανθρακικό ασβέστιο. Ο κλίβανος θερμαίνεται μέχρι τους 700°C ενώ μετά η θερμοκρασία ανεβαίνει στους 900°C-950°C. Στην θερμοκρασία αυτή ο συνδυασμός του ξυλάνθρακα και του βαρίου ή του νατρίου δίνει μονοξείδιο του άνθρακα το οποίο λόγω της παρουσίας σιδηρού δημιουργεί άτομα άνθρακα τα οποία απορροφούνται από την επιφάνεια του εξαρτήματος.

Υγρά ενανθρακωτικά μέσα

Σε αυτήν την περίπτωση η ενανθράκωση πραγματοποιείται μέσα σε λουτρό τετηγμένων αλάτων το οποίο περιέχει 20% έως 50% κυανιούχο νάτριο, ανθρακικό νάτριο 40% και από χλωριούχο νάτριο. Τα εξαρτήματα εμβαπτίζονται μέσα στο λουτρό το οποίο και σε αυτήν την περίπτωση αποδεσμεύει μονοξείδιο του άνθρακα και άζωτο. Η μέθοδος αυτή πολλές φορές καλείται και ενδοκυάνωση.

Αέρια ενανθρακωτικά μέσα

Το μονοξείδιο του άνθρακα που απαιτείται για την ενανθράκωση σε αυτή την περίπτωση σχηματίζεται με την βοήθεια υδρογονανθράκων όπως το μεθάνιο και το προπάνιο τα οποία πρέπει να είναι υπερκάθαρα αλλιώς σε άλλη περίπτωση οι ακαθαρσίες θα επηρεάσουν την ομοιομορφία της ενανθράκωσης.

Γενικά η ενανθράκωση με στερεά μέσα έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι ανάλογα τον χρόνο και την θερμοκρασία μπορεί να φτάσει σε μεγάλο βάθος ενώ το μειονέκτημα είναι ο χρόνος και το κόστος της διαδικασίας συγκριτικά με τις υπόλοιπες δυο. Με την χρήση υγρών και αέριων μέσων μπορεί να γίνει ακριβής έλεγχος του βάθους ενανθράκωσης το οποίο όμως είναι συγκριτικά μικρότερο από το βάθος που πετυχαίνετε με την χρήση στέρεων ενανθρακωτικών μέσων.

Για να επιτευχθεί η σκληρότητα της επιφάνειας είναι απαραίτητο μετά το τέλος της ενανθράκωσης να ακολουθήσει μια σειρά από θερμικές κατεργασίες. Η εκτεταμένη θέρμανση του χάλυβα σε τόσο υψηλή θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους των κόκκων τόσο της επιφάνειας όσο και του πυρήνα. Όπως προαναφέρθηκε ο εμποτισμός του αντικειμένου με άτομα άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού του άνθρακα στην επιφάνεια του εξαρτήματος ενώ στον πυρήνα το ποσοστό άνθρακα διατηρείται στο επίπεδο που βρισκόταν. Είναι λοιπόν αναγκαίο να πραγματοποιηθεί η αναθέρμανση του εξαρτήματος σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ανάλογα με τον άνθρακα που περιέχεται προκειμένου η χονδρόκοκκη δομή φερρίτη – περλίτη του πυρήνα να μετασχηματιστεί σε λεπτόκοκκο ωστενίτη, ακολουθούμενη από βαφή και επαναφορά ώστε να αποκτήσει δομή μαρτενσίτη και φερρίτη και την κατάλληλη σκληρότητα. Επειδή το ποσοστό άνθρακα της επιφάνειας και του πυρήνα διαφέρουν είναι λογικό η θερμοκρασία αναθέρμανσης για τον πυρήνα να επηρεάζει αρνητικά την επιφάνεια η οποία συνεχίζει να έχει χονδρόκοκκη δομή μαρτενσίτη. Εν συνέχεια λοιπόν μετά την θερμική κατεργασία για τον πυρήνα πραγματοποιείται ξανά θέρμανση σε χαμηλότερη θερμοκρασία ώστε η επιφάνεια που παραμένει χονδρόκοκκη να μετασχηματιστεί σε πιο λεπτόκοκκη μαρτενσιτική δομή και κατ' επέκταση να αποκτήσει υψηλή σκληρότητα.

Κατά την διαδικασία της ενανθράκωσης πολλές φορές εμφανίζονται ορισμένες αστοχίες οι οποίες αφορούν κυρίως το βάθος της ενανθράκωσης. Αυτό μπορεί να ωφελείται στον λανθασμένο υπολογισμό του χρόνου και της θερμοκρασίας ενανθράκωσης. Επίσης πολλές φορές λόγω ενανθρακωτικού μέσου και της

δραστικότητας του μπορεί να μην επιτευχθεί η επιθυμητή σκληρότητα. Τέλος η κακή ποιότητα, και η καθαριότητα της επιφάνειας μπορεί να οδηγήσουν σε ανομοιόμορφη σκληρότητα.

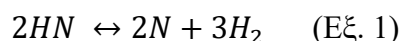
3.5.2 Εναζώτωση

Όπως προαναφέρθηκε η εναζώτωση όπως και η ενανθράκωση ανήκει στις θερμοχημικές κατεργασίες, κατά την οποία γίνεται πρόσθεση αζώτου στην επιφάνεια του εξαρτήματος το οποίο σχηματίζει πολύ σκληρές χημικές ενώσεις με το σίδηρο με αποτέλεσμα επιφανειακά η σκληρότητα του τεμαχίου να είναι πολύ μεγάλη. Όπως και στην ενανθράκωση έτσι και στην εναζώτωση ο χάλυβας θερμαίνεται για δεδομένο χρονικό διάστημα παρουσία αζώτου, το οποίο λειτουργεί ως σκληρωτικό μέσο. Πρέπει να σημειωθεί ότι εναζώτωση μπορούν να υποστούν ειδικοί χάλυβες διότι η σκλήρυνση της επιφάνειας εξαρτάται από τις ενώσεις του αζώτου με το χρώμιο ή το βανάδιο. Υπάρχουν δυο είδη εναζώτωσης, εκείνη που το σκληρωτικό μέσο (αμόνια) είναι σε αέρια μορφή και εκείνη που βρίσκεται σε υγρή μορφή.

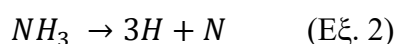
3.5.2.1 Αέρια Εναζώτωση

Η αέρια εναζώτωση αποτελεί μια κατεργασία επιφανειακής σκλήρυνσης στην οποία ένα εξάρτημα το οποίο βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία έρχεται σε επαφή με ένα αζωτούχο αέριο το οποίο συνήθως είναι η αμμωνία. Η εναζώτωση οδηγεί στην απόκτηση μιας σκληρής επιφάνειας που ταυτόχρονα αυξάνει την αντοχή σε τριβή, στην βελτίωση της αντοχής σε κόπωση καθώς και στην αντοχή σε διάβρωση.

Στην αέρια εναζώτωση πηγή του αζώτου αποτελεί η διάσπαση της αμμωνίας. Μέσω ενός εξωτερικού συστήματος αποθήκευσης, η αέρια αμμωνία τροφοδοτείται μέσα στην κάμινο. Βασικός παράγοντας για την διάσπαση της αμμωνίας αποτελεί η θερμοκρασία. Στις συνήθεις θερμοκρασίες εναζώτωσης (500-570°C) η αμμωνία βρίσκεται σε ασταθή θερμοδυναμική κατάσταση και ξεκινά να διασπάται. Η διάσπαση της αυτή χαρακτηρίζεται από την:



Τυπικά όταν ο χάλυβας βρίσκεται εντός πλούσιας, σε αέρια αμμωνίας ατμόσφαιρας, σε υψηλές θερμοκρασίες, τρεις ακόμα μετασχηματισμοί παίρνουν μέρος στην διαδικασία





Διαδοχικά λοιπόν τα εκτός ισορροπίας άτομα του αζώτου και υδρογόνου (Εξ. 2) θα ενωθούν προκειμένου να δημιουργήσουν μόρια (δεσμούς) (Εξ. 3) και (Εξ. 4). Το υδρογόνο διασπάται σύμφωνα με την εξίσωση (Εξ. 1). Την στιγμή της διάσπασης το απελευθερωμένο άζωτο, που συνεχίζει να βρίσκεται σε αστάθεια απορροφάται από την επιφάνεια του τεμαχίου, δημιουργώντας νιτρίδια σε συνδυασμό με τον α σίδηρο στο κυβικό χωροκεντρομένο σύστημα, με τον γ' σίδηρο στο κυβικό εδροκεντρομένο σύστημα και δημιουργεί και το νιτρίδιο ε στο εξαγωνικό κρυσταλλικό πλέγμα σε θερμοκρασίες κοντά στους 590°C [48].

Σε θερμοκρασίες κοντά στους 500°C, η αμμωνία δεν χαρακτηρίζεται από μεγάλη σταθερότητα, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλους ρυθμούς διάσπασης και κατ' επέκταση στη δημιουργία ενός προστατευτικού αερίου το οποίο δεν έχει τάση απορρόφησης από το μέταλλο. Μεγάλοι ρυθμοί διάσπασης οδηγούν σε κατάσταση ισορροπίας του ατόμου της αμμωνίας με αποτέλεσμα να σταματά η διαδικασία της εναζώτωσης. Γενικά η διάσπαση της αμμωνίας είναι μια πολύ αργή διαδικασία και σπάνια ο ρυθμός διάσπασης θα ξεπεράσει το 50% κατά την θερμική κατεργασία της εναζώτωσης. Η μεταφορά του αζώτου και η απορρόφηση του από το μέταλλο είναι σχετικά αργή και εξαρτάται από τον ρυθμό διάσπασης των μορίων της αμμωνίας. Ο ρυθμός διάσπασης που χρησιμοποιείται συνήθως είναι περίπου 30% αλλά πολλές φορές υπάρχει και ένα δεύτερο στάδιο εναζώτωσης με διαφορετικές θερμοκρασίες και ρυθμούς διάσπασης. Ο θεωρητικός ρυθμός διάσπασης είναι διαφορετικός από τον πραγματικό ρυθμό διάσπασης. Σύμφωνα με την (Εξ. 1) δυο μόρια αμμωνίας διασπώνται σε ένα μόριο αζώτου και τρία μόρια υδρογόνου. Η αύξηση αυτή του όγκου αραιώνει το ποσοστό της αμμωνίας και σε συνδυασμό με τα παραγόμενα αέρια, ο ρυθμός διάσπασης αλλάζει. Έτσι λοιπόν είναι πιο σωστό να υπολογίζεται ένας συντελεστής που περιγράφει το πόσο είναι σε θέση μια ατμόσφαιρα με βάση την αμμωνία, να οδηγήσει σε εναζώτωση (Εξ. 5).

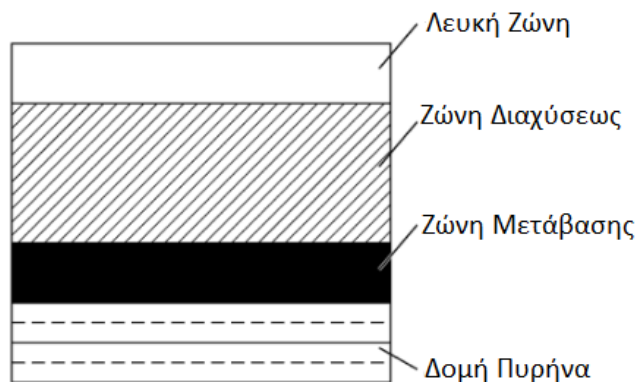
$$N_p = \frac{p_{NH_3}}{p_{H_2}^{3/2}} \quad (\text{Εξ. 5})$$

Όπου το p_{NH_3} και το $p^{3/2}$ αντιστοιχούν στην πίεση της αμμωνίας και του υδρογόνου αντίστοιχα.

Ο έλεγχος της παραπάνω εξίσωσης επιτρέπει την δημιουργία προβλέψιμων κρυσταλλικών δομών στην επιφάνεια του τεμαχίου καθώς και τον έλεγχο του βάθους της εναζώτωσης. Όσο μεγαλύτερο είναι το N_p τόσο μεγαλύτερες είναι οι συγκεντρώσεις αζώτου στην επιφάνεια του εκάστοτε εξαρτήματος. Χαμηλές τιμές οδηγούν στην δημιουργία επιφανειακής περιοχής εναζώτωσης, χωρίς την ύπαρξη της εξωτερικής λευκής ζώνης. Ένας βασικός παράγοντας για να είναι επιτυχής μια θερμική κατεργασία εναζώτωσης είναι η σκληρότητα του πυρήνα του τεμαχίου και η ικανότητα του να συγκρατήσει το σκληρό στρώμα της εναζώτωσης. Η δομή του χάλυβα στην ανοπτημένη κατάσταση του αποτελείται κυρίως από φερρίτη, ο οποίος κρυσταλλώνεται στο κυβικό χωροκεντρομένο. Κατά την θέρμανση του χάλυβα πριν την βαφή, ο φερρίτης μετατρέπεται σε ωστενίτη ο οποίος κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρομένο. Την στιγμή της βαφής η δομή του ωστενίτη μετατρέπεται σε δομή μαρτενσίτη ο οποίος σχηματίζεται στο τετραγωνικό κρυσταλλικό πλέγμα γεγονός που σημαίνει πως εκείνη την στιγμή ο χάλυβας βρίσκεται στην πιο ασταθή του κατάσταση και χρήζει επιπλέον θερμική κατεργασία επαναφοράς προκειμένου να επιτευχθεί η απαραίτητη ισορροπία και η κατάλληλη σκληρότητα, που θα υποστηρίξει τη ζώνη της εναζώτωσης. Κατά την διαδικασία της βαφής δεν είναι δυνατόν να γίνει όλος ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Ο παραμένων ωστενίτης πρέπει να μετασχηματιστεί σε επαναφερμένο μαρτενσίτη. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε με επαναφορά είτε με εναζώτωση. Η θερμική κατεργασία της επαναφοράς θα μετασχηματίσει τον ωστενίτη σε επαναφερμένο μαρτενσίτη και η εναζώτωση θα δημιουργήσει ακόμα μεγαλύτερη σταθερότητα στην δομή. Η σκληρότητα του πυρήνα κάθε φορά εξαρτάται από τον τύπο της φόρτισης και τις τάσεις που θα δεχθεί το στρώμα της εναζώτωσης στην επιφάνεια.

Ο σχηματισμός της ζώνης εναζώτωσης θα ξεκινήσει με κατά τόπους δημιουργίες πυρήνων στην επιφάνεια του τεμαχίου. Αυτοί οι πυρήνες αργότερα θα δημιουργήσουν την λευκή ζώνη της εναζώτωσης η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ψαθυρότητα και σκληρότητα. Η λευκή ζώνη εντοπίζεται στην επιφάνεια του τεμαχίου και αυξάνεται σε βάθος ανάλογα τον χρόνο, την θερμοκρασία και την σύνθεση του αερίου μέσα στην κάμινο. Η παρουσία του άνθρακα στον χάλυβα αλλάζει την μορφολογία των πυρηνώσεων στην επιφάνεια και δημιουργεί μια πολύπλοκη φάση διασκορπισμένων νιτριδίων. Κάτω ακριβώς από την λευκή ζώνη υπάρχει η ζώνη διάχυσης η οποία αποτελείται από σταθερά νιτρίδια τα οποία έχουν δημιουργηθεί από την αντίδραση του

αζώτου με τα κραματικά στοιχεία που ευνοούν την δημιουργία νιτριδίων. Κάτω από την ζώνη διάχυσης υπάρχει η ζώνη μετάβασης η οποία αποτελείται από την δομή του πυρήνα του υλικού (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Απεικόνιση των τριών ζωνών που δημιουργούνται κατά την θερμική κατεργασία της εναζώτωσης. [48]

Το ποσοστό του άνθρακα είναι εκείνο που καθορίζει αν στην λευκή ζώνη θα δημιουργηθούν νιτρίδια (ϵ) ή νιτριδία (γ). Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του άνθρακα στον χάλυβα τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των νιτριδίων (ϵ) ενώ στην αντίθετη περίπτωση ευνοείται η δημιουργία των νιτριδίων (γ). Το βάθος της λευκής ζώνης είναι μια συνάρτηση του χρόνου της θερμοκρασίας και της πίεσης (Συνήθως ατμοσφαιρικής). Το ποσοστό του άνθρακα δεν επηρεάζει το βάθος της. Ο έλεγχος της λευκής ζώνης και του βάθους της παίζει πολύ σημαντικό παράγοντα στην εκάστοτε εφαρμογή. Το περιβάλλον λειτουργίας του εξαρτήματος καθορίζει το αν είναι σημαντική η ύπαρξη της λευκής ζώνης ή όχι. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι ελέγχου και καθορισμού του βάθους της λευκής ζώνης: αραίωση, εναζώτωση δυο φάσεων και η εναζώτωση ιόντων.

Διάλυση: Όταν προστίθεται υδρογόνο στην ροή της αμμωνίας κατά την εναζώτωση, το ποσοστό του αζώτου στην αμμωνία διαλύεται. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το διαθέσιμο άζωτο προς απορρόφηση από την επιφάνεια. Ο έλεγχος της διαθεσιμότητας του αζώτου επιτρέπει τον έλεγχο του βάθους της λευκής ζώνης καθώς και την δομή της.

Εναζώτωση δυο φάσεων: η διαδικασία εναζώτωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δυο στάδια. Το πρώτο στάδιο θερμοκρασιακά κυμαίνεται μεταξύ των 495°C - 525°C και ο ρυθμός διάλυσης της αμμωνίας είναι 15% με 30%. Το δεύτερο στάδιο στην ίδια θερμοκρασία ή σε λίγο μεγαλύτερη της τάξεως των 550°C - 565°C και ο ρυθμός

διάσπασης είναι 75% - 80%. Το αποτέλεσμα αυτού είναι μια αρκετά λεπτή λευκή ζώνη εναζώτωσης. Στόχος του δευτέρου σταδίου είναι η μείωση του διαθέσιμου αζώτου προς απορρόφηση και η αύξηση της τελευταίας μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία του δευτέρου σταδίου πρέπει να επιλεγεί πολύ προσεκτικά γιατί υπάρχει κίνδυνος αν η θερμοκρασία είναι υψηλή τα νιτρικά ιόντα, να συσσωρευθούν στα όρια των κόκκων του υλικού με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία του.

Εναζώτωση ιόντων: η διαδικασία αυτή αναφέρεται στην δημιουργία ενός αερίου πλάσματος υπό συνθήκες κενού. Με την διαδικασία αυτή είναι εφικτό, ανάλογα την εφαρμογή να δημιουργηθεί λευκή ζώνη αποτελούμενη αποκλειστικά από νιτρίδια ενός τύπου, από διαφορετικούς τύπους αλλά και να μην υφίσταται καθόλου.

Για την καταλληλότητα ενός χάλυβα όσον αφορά την εναζώτωση είναι απαραίτητη η παρουσία κραματικών προσθηκών τα οποία σε συνδυασμό με το άζωτο μπορούν να δημιουργήσουν νιτρίδια. Τέτοια κραματικά στοιχεία είναι το αλουμίνιο (Al), το χρώμιο (Cr), το βανάδιο (V), το βολφράμιο (W) και το μολυβδαίνιο (Mo) το οποίο έχει και την δυνατότητα να μειώνει την πιθανότητα της ψαθυροποίησης του εξαρτήματος κατά την διαδικασία. Παρόλο που κατά την εναζώτωση όλοι οι χάλυβες μπορούν να δημιουργήσουν νιτρίδια με την παρουσία αζώτου, στην περίπτωση που στον χάλυβα υπάρχουν ένα ή περισσότερα κραματικά στοιχεία, το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Από τα στοιχεία σχηματισμού νιτρίδιων το Αλουμίνιο (Al) και το Χρώμιο (Cr) επηρεάζουν ιδιαίτερα την σκληρότητα της επιφάνειας. Ωστόσο το 1% Αλουμίνιο (Al) οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της σκληρότητας από ότι το 3% Χρώμιο (Cr) ενώ ταυτόχρονα είναι ανεξάρτητο από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα καθώς το Αλουμίνιο (Al) δεν σχηματίζει καρβίδια, όπως το Χρώμιο (Cr) και επομένως είναι πλήρως διαθέσιμο για σχηματισμό νιτρίδιων. Το Αλουμίνιο (Al) έχει ισχυρή συγγένεια με το άζωτο, σχηματίζοντας έτσι πολύ σκληρά και σταθερά νιτρίδια σε ποσοότητες 1%. Έχει διαπιστωθεί ότι πάνω από 1% το Αλουμίνιο (Al) δεν έχει καμία επίδραση στην προκύπτουσα σκληρότητα. Επιπλέον χαμηλότερα ποσοστά μολυβδαίνιου (Mo) και βαναδίου (V) βελτιώνουν την αντοχή στη δευτερεύουσα σκλήρυνση και αυξάνουν την δυσθραυστότητα. Η υψηλότερη σκληρότητα επιφάνειας που δημιουργείται με την προσθήκη κραματικών στοιχείων, αυξάνει την αντοχή σε τριβή. Ωστόσο η αυξημένη σκληρότητα της επιφάνειας οδηγεί επίσης και σε μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια, κατά την μηχανική καταπόνηση [58]. Στην περίπτωση

που ο χάλυβας δεν έχει κραματικά στοιχεία τότε η εξωτερική επιφάνεια του γίνεται πολύ ψαθυρή και η αύξηση της σκληρότητας είναι μικρή [30].

Πολλές φορές κατά την διαδικασία της εναζώτωσης το εξάρτημα υπόκειται σε διαστασιακές μεταβολές που επηρεάζουν την μετέπειτα λειτουργία του. Οι μεταβολές στην μάζα του τεμαχίου μπορούν να προέλθουν από την ανεπαρκή εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων από προηγούμενες κατεργασίες, από νέες τάσεις που προήλθαν κατά την εναζώτωση εξαιτίας της απότομης ή μη ελεγχόμενης ψύξης και θέρμανσης, καθώς και από τάσεις προήλθαν από διάφορες διαστασιακές μεταβολές. Οι μεταβολές αυτές αυξάνουν το μέγεθος της επιφάνειας με αποτέλεσμα να προκαλούν εφελκύστηκες τάσεις στον πύρινα του τεμαχίου οι οποίες ισορροπούνται με τις θλιπτικές τάσεις που υπάρχουν στην επιφάνεια του τεμαχίου όταν αυτό κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου. Το μέγεθος και η σημασία των τάσεων αυτών επηρεάζεται από την δύναμη του υλικού στο όριο διαρροής, από το πάχος της επιφανειακής στρώσης νιτριδίων καθώς και από το σύνολο και την φύση των νιτριδίων αυτών. Οι μεταβολές μπορούν πολλές φορές να οδηγήσουν στην παραμόρφωση του τεμαχίου.

Μερικά συχνά προβλήματα που προκύπτουν κατά την διαδικασία της εναζώτωσης είναι:

Χαμηλή σκληρότητα επιφάνειας: Συνήθως προκύπτει λόγω των χαρακτηριστικών του χάλυβα και της λανθασμένης διαδικασίας που ακολουθείται. Συγκεκριμένα η χημική σύσταση του χάλυβα μπορεί να μην είναι κατάλληλη για εναζώτωση, η μικροδομή μπορεί να μην είναι η κατάλληλη, λανθασμένες θερμικές κατεργασίες πριν την εναζώτωση, χαμηλή σκληρότητα του πυρήνα του εξαρτήματος καθώς και κακή ποιότητα επιφάνειας από την κατεργασία ή τις ακαθαρσίες.

Οι διαστασιακές μεταβολές: ωφελείται συνήθως σε κακή κατεργασία της επιφάνειας πριν την εναζώτωση, στα υπολείμματα λαδιού και υγρασίας, στην μεγάλη διαφορά πάχους μεταξύ των διάφορων τμημάτων του εξαρτήματος λόγω λανθασμένου σχεδιασμού, στην ανεπαρκή εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων πριν την εναζώτωση.

Ριγματώσεις: προκύπτουν κυρίως λόγω του σχεδιασμού και της ύπαρξης πολλών εγκοπών πάνω στο εξάρτημα, στην ακατάλληλη θερμική κατεργασία και στο μεγάλο πάχος της λευκής ζώνης ή ζώνης νιτριδίων.

Μεγάλο βάθος λευκής ζώνης: ωφελείται κυρίως στην χαμηλή θερμοκρασία και στον ρυθμό διάλυσης κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου, στον χρόνο διάρκειας του πρώτου σταδίου.

3.5.2.2 Υγρή Εναζώτωση

Στην υγρή εναζώτωση όπως και στην αέρια η θερμοκρασία κυμαίνεται από 510°C - 580°C. Το σκληρωτικό μέσο αυτή την φορά δεν είναι η αέρια αμμωνία αλλά ένα λουτρό το οποίο περιέχει κυανιούχα άλατα ή άλλες ουσίες που να περιέχουν κυάνιο. Η υγρή εναζώτωση αποτελεί μια από τις κυρίες μεθόδους επιφανειακής σκλήρυνσης και μπορεί και προσθέτει περισσότερο άζωτο και λιγότερο άνθρακα στα σιδηρούχα κράματα από ότι άλλες θερμικές κατεργασίες. Έχει ευρεία εφαρμογή και χρησιμοποιείται για την σκλήρυνση ενός μεγάλου συνόλου χαλύβων χαμηλών ή υψηλά κραματωμένων, εργαλειοχαλύβων, ανοξειδωτων χαλύβων καθώς και χυτοσιδήρων.

Η υγρή εναζώτωση χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση της αντοχής του εξαρτήματος στην τριβή καθώς και την αύξηση της αντίστασης σε κόπωση. Σε πολλά κράματα ανάλογα την χημική τους σύσταση βελτιώνεται και η αντοχή τους στην διάβρωση. Σε μερικές περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλο βάθος βαφής και αυξημένη σκληρότητα πυρήνα η διαδικασία της εναζώτωσης δεν συνίσταται. Η διαδικασία της υγρής και αέριας εναζώτωσης είναι πανομοιότυπες και προσφέρουν τα εξής ίδια πλεονεκτήματα: βελτιωμένη αντοχή στην τριβή και στην κόπωση, ενώ ταυτόχρονα δεν προκαλεί την εσωτερική παραμόρφωση και δημιουργία τάσεων που προκαλούν οι υπόλοιπες θερμικές κατεργασίες που συνιστούν θέρμανση σε μεγάλες θερμοκρασίες.

Το σκληρωτικό μέσο σε αυτήν την περίπτωση είναι ένα λουτρό τετηγμένων αλάτων του νατρίου και του καλίου σε συγκεκριμένες ποσότητες. Η θερμοκρασία του λουτρού αλάτων είναι 565°C. Πολλές φορές ανάλογα την εφαρμογή απαιτείται η γήρανση του λουτρού αλάτων η οποία συνιστά θέρμανση του λουτρού στους 565°C και παραμονή για τουλάχιστον 12h. Κατά αυτόν τον τρόπο η περιεκτικότητα των κυανιούχων αλάτων μειώνεται ενώ αυξάνεται η περιεκτικότητα του κυανικού οξέος και του ανθρακικού άλατος. Πρέπει να τονιστεί ότι η παρουσία του ανθρακικού άλατος και του κυανικού οξέος είναι υπεύθυνη για την εναζώτωση και ο ρυθμός με τον οποίο το κυανιούχο άλας μετατρέπεται σε κυανικό οξύ παίζει πολύ σημαντικό ρολό σε αυτή. Το λουτρό αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στην εναζώτωση χαλύβων εργαλείων συμπεριλαμβανομένων

των ταχυχαλύβων και ένα σύνολο χαμηλών κραματικά χαλύβων συμπεριλαμβανομένων εκείνων που περιέχουν αλουμίνιο.

Σε κάθε περίπτωση εναζώτωσης ο χάλυβας και τα κραματικά του στοιχεία παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Παρόλο που οι ιδιότητες των κραμάτων βελτιώνονται επιφανειακά, η χρήση χαλύβων με χαμηλά ή μέτρια ποσοστά άνθρακα μπορεί να επιφέρει ακόμα καλύτερο αποτέλεσμα. Η απορρόφηση του αζώτου στον χάλυβα εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό άνθρακα. Επιπλέον πολλές φορές η ύπαρξη κραματικών στοιχείων που οδηγούν στην δημιουργία νιτριδίων παραδείγματος χάριν το χρώμιο, αναστέλλει την απορρόφηση αζώτου. Όσον αφορά λοιπόν την απορρόφηση αζώτου, πολλές φορές ανάλογα την εφαρμογή ένας απλός χάλυβας με χαμηλό άνθρακα μπορεί να αντιδράσει καλύτερα στην εναζώτωση από έναν μέτρια ή υψηλά κραματωμένο αφού το βάθος της εναζώτωσης μπορεί να είναι μεγαλύτερο στον πρώτο.

Μετά το τέλος της εναζώτωσης τα τεμάχια δεν χρειάζονται κάποια επιπλέον θερμική κατεργασία. Ωστόσο πριν την εναζώτωση είναι απαραίτητο οι χάλυβες να υπόκεινται σε θερμικές κατεργασίες που χρειάζονται για την απόκτηση μηχανικών ιδιοτήτων σε όλη την μάζα τους. Αμέσως μετά δίνονται οι τελικές διαστάσεις του τεμαχίου με την χρήση διάφορων μηχανικών κατεργασιών. Πρέπει να τονιστεί ότι καλό είναι να αποφεύγεται η λείανση των τεμαχίων μετά την θερμή κατεργασία της εναζώτωσης εκτός εάν έχει προμελετήσει έτσι ώστε το βάθος της εναζώτωσης να είναι αρκετά μεγάλο προκειμένου να μην ελαττωθεί η σκληρότητα μετά την λείανση.

Συμπερασματικά λοιπόν με την εναζώτωση αποφεύγονται ρωγμές και στρεβλώσεις καθότι μετά από την διαδικασία δεν είναι αναγκαία η βαφή τους. Μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη σκληρότητα ενώ η αντοχή των τεμαχίων σε διάβρωση και κόπωση είναι αρκετά μεγάλη. Τα εναζωτωμένα εξαρτήματα μπορούν και διατηρούν την σκληρότητα τους σε υψηλές θερμοκρασίες συνήθως λίγο χαμηλότερες από εκείνες στις οποίες πραγματοποιήθηκε η εναζώτωση τους. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η υπερθέρμανση ενός εναζωτωμένου τεμαχίου έχει ως συνέπεια την καταστροφή της επιφανειακής σκλήρυνσης του. Στην περίπτωση αυτή το τεμάχιο μπορεί να υποστεί ξανά εναζώτωση, ενώ στην περίπτωση ενανθράκωσης το τεμάχιο δεν υφίσταται ξανά ενανθράκωση και βελτίωση της επιφανειακής του στιβάδας, αλλά κατάλληλη θερμική κατεργασία.

3.5.3 Φλογοβαφή

Η θερμική κατεργασία της φλογοβαφής συνιστά απότομη θέρμανση της επιφάνειας του τεμαχίου σε θερμοκρασία πάνω από το ανώτερο κρίσιμο σημείο, με φλόγα οξυγόνου. Αμέσως μετά ακολουθεί ταχεία απόψυξη με εκτόξευση νερού. Κατά αυτόν τον τρόπο το εξάρτημα διατηρεί την χημική του σύσταση στον πυρήνα και στην επιφάνεια η οποία σκληραίνει τοπικά με βαφή το βάθος της οποία μπορεί να φτάσει από 5μm έως 10μm. Οι χάλυβες που συνίσταται για αυτή την μέθοδο είναι συνήθως ανθρακούχοι χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα πάνω από 0.35% έτσι ώστε να μπορούν ευκολά να βάφουν.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απλότητα της και η εφαρμογή της ακόμα και σε πολύ μεγάλα τεμάχια σφυρήλατα ή χυτά τα οποία είναι δύσκολο να βάφουν με κάποια άλλη θερμική κατεργασία. Ένα βασικό μειονέκτημα της είναι ο μη ακριβής καθορισμός του βάθους βαφής καθώς και η αναπόφευκτη υπερθέρμανση της επιφανειακής στιβάδας. Επιπλέον σε αυτή την περίπτωση όπως και στην ενανθράκωση και την εναζώτωση, το τεμάχιο θα πρέπει πριν να υποστεί τις απαραίτητες κατεργασίες που χρειάζεται για να αποκτήσει τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες.

3.5.4 Βαφή με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Εδώ η θέρμανση επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής κατά το φαινόμενο των δινορευμάτων. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο γεγονός ότι ένα μεταλλικό αντικείμενο τοποθετηθεί σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο τότε σε όλη την μάζα του δημιουργούνται δινορρέυματα τα οποία οδηγούν ανάλογα την ένταση τους, στην αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας. Μετά την θέρμανση ακολουθείται ταχεία απόψυξη όπως και στην φλογοβαφή. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι το εναλλασσόμενο ρεύμα που χρειάζεται για την δημιουργία μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και κατεπέκταση την ανάπτυξη δινορευμάτων προκαλεί ανομοιόμορφη κατανομή τους στην επιφάνεια του τεμαχίου με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ομοιόμορφη θέρμανση. Επιπλέον η επιφάνεια θερμαίνεται ταχύτερα από τον πυρήνα ο οποίος παραμένει ψυχρός. Ανάλογα την συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος το βάθος της βαφής με την μέθοδο αυτή κυμαίνεται από 1mm έως και 10mm.

4. ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Η συσκευασία (Packaging) είναι η επιστήμη και η τεχνολογία του εγκλεισμού ενός προϊόντος με σκοπό την προστασία του κατά την μεταφορά, αποθήκευση, πώληση και χρήση. Αναφέρεται επίσης στην διαδικασία του σχεδιασμού ενός τρόπου λειτουργίας προκειμένου να υπάρξει η παραγωγή πακέτων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν εν τέλει στην συσκευασία του προϊόντος. Μπορεί επίσης να περιγράψει ως ένα σύστημα συντονισμού για την προετοιμασία των εμπορευμάτων – προϊόντων για μεταφορά αποθήκευση και πώληση [37].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μέσα στον όρο συσκευασία (Packaging) υπάρχει και ο όρος του πακετάρω (Packing). Πολλές φορές οι δυο όροι αυτοί χρησιμοποιούνται συνώνυμα αλλά πρέπει να τονισθεί ότι υπάρχει μια διαφορά μεταξύ τους ως προς την σημασία τους και το αποτέλεσμα το οποίο επιφέρουν [38]. Η συσκευασία (Packaging) ενός προϊόντος αναφέρεται στην κάλυψη του ιδίου του προϊόντος με σκοπό την προστασία από υγρασία, διαρροές, ρύπανση, σκόνη και οποιαδήποτε ζημιά. Ο όρος πακετάρισμα (Packing) αναφέρεται στην τοποθέτηση όλων των συσκευασμένων προϊόντων σε κάποιο κιβώτιο ή δοχείο ή παλέτα προκειμένου για την αποθήκευση και την μεταφορά αυτών. Οποιαδήποτε ενέργεια λοιπόν αφορά την μεταφορά και αποθήκευση προϊόντων σε ομάδες όπως για παράδειγμα η στήριξη των εμπορευμάτων, η απορρόφηση των κραδασμών κατά την μεταφορά, η σήμανση τους, το περιτύλιγμα τους και ο τρόπος μετακίνησης τους συνυπάρχουν όλα μέσα στη έννοια του πακεταρίσματος.

4.2 Μηχανές Συσκευασίας

Υπάρχουν διάφορες πρώτες ύλες με τις οποίες είναι δυνατόν κάποιος να πακετάρει εμπορεύματα, όπως το ξύλο, το μέταλλο, το χαρτί, το γυαλί καθώς και το πλαστικό. Ανάλογα κάθε φορά τον τύπο του εμπορεύματος αλλάζει και το υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την συσκευασία του. Έτσι λοιπόν ανάλογα την περίπτωση του προϊόντος που θα μεταφερθεί και τον τρόπο που θα γίνει, αλλάζει κάθε φορά και το υλικό της συσκευασίας του, το οποίο θα πρέπει να είναι σε θέση να προσφέρει προστασία έναντι των δονήσεων, της θερμοκρασίας, της συρρίκνωσης και γενικά της υποβάθμισης της ποιότητας του εμπορεύματος. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης εμπορευμάτων έκρινε επιτακτική την ανάγκη εύρεσης τρόπων πακεταρίσματος και

μεταφοράς πολλών προϊόντων. Έτσι λοιπόν εφευρέθηκαν διάφορα μηχανήματα και συσκευές τα οποία βοηθούν στην συσκευασία προϊόντων με ασφάλεια και ταχύτητα. Άλλες φορές αυτά τα μηχανήματα είναι χειροκίνητα και χρειάζονται ανθρώπινη παρέμβαση (Εικόνα 4.1) και άλλες φορές είναι μέρος μιας γραμμής παραγωγής και είναι αυτόματα (Εικόνα 4.1). Όπως προαναφέρθηκε το πακετάρισμα των εμπορευμάτων μπορεί να γίνει με διάφορους και ποικίλους τρόπους και υλικά.



Εικόνα 4.1 Απεικόνιση μηχανών περιτυλίγματος. Αριστερά χειροκίνητη μηχανή [39]
Δεξιά αυτόματη μηχανή [40].

Ανάλογα το είδος του εμπορεύματος και τον τρόπο μεταφοράς του αλλάζει το υλικό που χρησιμοποιείται στο πακετάρισμά τους.

4.2.1 Μηχανές Συσκευασίας με την χρήση μεταλλικού ελάσματος

Η μεταφορά προϊόντων μεγάλων σε όγκο και σε βάρος προέτρεψε στην δημιουργία συσκευών οι οποίες πακετάρουν τα προϊόντα με την χρήση πιο ισχυρών υλικών όπως το μέταλλο ή ακόμα και σε πολλές περιπτώσεις τα πολυμερή. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση μεταφοράς μεταλλικών προϊόντων το πακετάρισμα είναι αναγκαίο να γίνει με την χρήση ανθεκτικών υλικών τα οποία είναι σε θέση να στερεώσουν και να προστατέψουν τα εμπορεύματα κατά την μεταφορά τους. Όπως στην περίπτωση των μηχανών περιτυλίγματος με την χρήση πολυαιθυλενίου έτσι και στην περίπτωση του μεταλλικού ελάσματος υπάρχουν χειροκίνητες (Εικόνα 4.2) και αυτόματες συσκευές (Εικόνα 4.3). Στις συσκευές αυτές το έλασμα διερχόμενο μέσα από την μηχανή τυλίγεται γύρω από το εμπόρευμα και με την βοήθεια κάποιου πνευματικού ή υδραυλικού συστήματος γίνεται η συνάρμωση ώστε να επιτευχθεί η συσκευασία του

προϊόντος. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ανάλογα την αντοχή που απαιτείται κάθε φορά για την μεταφορά, είναι εφικτή η αλλαγή του ελάσματος με κάποιο το οποίο ενδεχομένως να έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή σε εφελκυσμό ή κρούση ενώ πολλές φορές αναλόγως τις συνθήκες μεταφοράς μπορεί να αλλάξει και το είδος της συνάρμοσης.



Εικόνα 4.2: Αναπαράσταση χειροκίνητης συσκευής συνάρμοσης μεταλλικού ελάσματος [41].



Εικόνα 4.3: Απεικόνιση αυτόματης μηχανής συνάρμοσης μεταλλικού ελάσματος με σκοπό την συσκευασία κουλούρων μεταλλικής λαμαρίνας [42].

Στις αυτόματες συσκευές η παροχή ελάσματος είναι συνεχόμενη και αυτοματοποιημένη (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 4.4). Η διαδικασία της συνάρμοσης πραγματοποιείται σε τρία διαδοχικά στάδια από την στιγμή που το έτοιμο προς συσκευασία προϊόν τοποθετηθεί στην σωστή θέση. Το πρώτο στάδιο αφορά το

μεταλλικό έλασμα το οποίο κατευθυνόμενο μέσα από την κεφαλή της μηχανής τυλίγεται γύρω από το προϊόν και αμέσως μετά τεντώνεται (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 4.4). Όταν τεντωθεί, τα διαμορφωτικά εργαλεία τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της κεφαλής της μηχανής (λεπτομέρεια 3, Εικόνα 4.4) έρχονται σε επαφή με το μεταλλικό έλασμα και μορφοποιώντας το πραγματοποιούν την συνάρμωση. Το τελευταίο στάδιο αφορά την διαδικασία της εξόλκευσης. Τα συναρμολογήματα μέσα στην κεφαλή είναι υπεύθυνα για την εν ψυχρώ διαμόρφωση του μεταλλικού ελάσματος και την τελική συνάρμωση του.



Εικόνα 4.4: Λεπτομέρειες συσκευής συνάρμωσης μεταλλικού ελάσματος [43].

4.3 Είδη μεταλλικής Συνάρμωσης

Το μεταλλικό έλασμα που χρησιμοποιείται κάθε φορά για την συνάρμωση θα πρέπει να μπορεί να καλύπτει τις ανάγκες της εκάστοτε μεταφοράς. Εκτός από το υλικό κατασκευής του ελάσματος που μπορεί ανά πάσα στιγμή να αλλάξει για λόγους αντοχής στην μεταφορά, υπάρχει η δυνατότητα, η συνάρμωση να γίνει με διαφορετικό τρόπο προκειμένου να επιτευχθεί το αποτέλεσμα. Υπάρχουν διάφορα είδη συνάρμωσης τα οποία συνίστανται για διαφορετική χρήση κάθε φορά [45].

4.3.1 Σύνδεση με την χρήση προστατευτικής κάλυψης.

Αυτός ο τύπος συνδέσμου περιλαμβάνει την διαμόρφωση της προστατευτικής κάλυψης ή σφραγίδας για την δημιουργία μικρών εγκοπών στις άκρες (Εικόνα 4.5). Οι εγκοπές αυτές θα γίνουν με την βοήθεια ενός κοπτικού εργαλείου κινούμενο από ένα πνευματικό σύστημα. Οι εγκοπές αυτές αμέσως μετά θα καμφθούν προς τα κάτω και θα δημιουργήσουν μια τυπική ένωση ή μπορούν να καμφθούν προς τα πάνω και

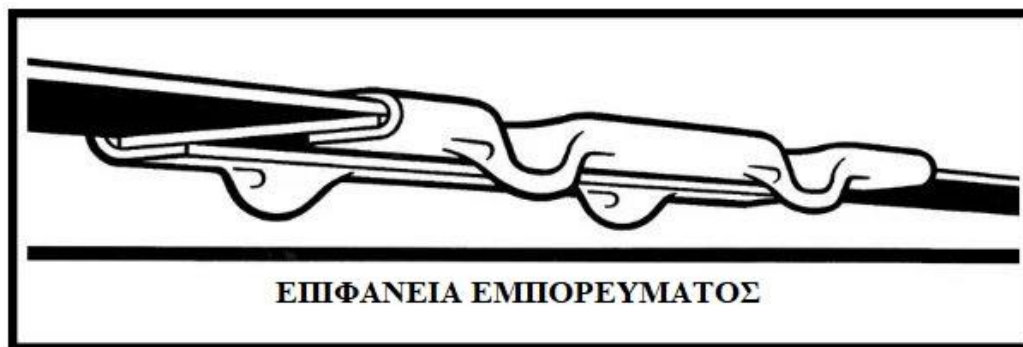
δημιουργήσουν μια αντίστροφη ένωση. Ανάλογα με τον αριθμό των συναρμολογημάτων των εργαλείων διαμόρφωσης που υπάρχουν μέσα στην κάθε κεφαλή, μπορεί να δημιουργηθεί μονός, διπλός, ή και τριπλός σύνδεσμος.



Εικόνα 4.5: Απεικόνιση ενός συνδέσμου με προστατευτική σφραγίδα.

4.3.2 Σύνδεση με την χρήση προστατευτικής κάλυψης με την μέθοδο της τσάκισης.

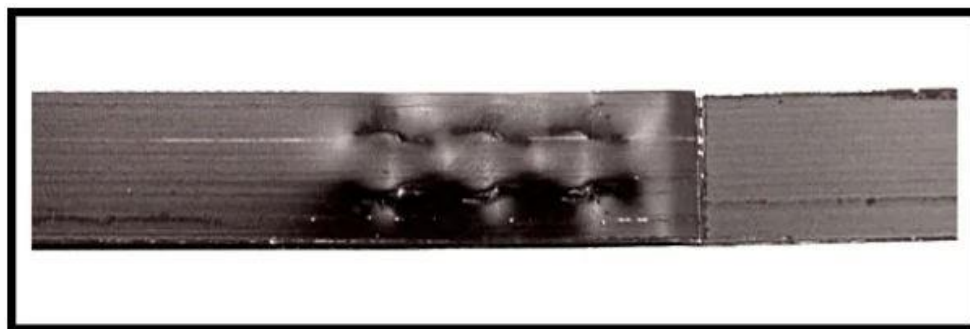
Σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή σε δυνάμεις πρόσκρουσης καθώς και μεγάλη σταθερότητα στην συναρμογή κατά την μεταφορά του φορτίου, χρησιμοποιείται αυτό το είδος συνάρμωσης. Με την βοήθεια ενός πνευματικού ή ενός υδραυλικού συστήματος πίεσης ή ακόμα και ενός χειροκίνητου εργαλείου, το μεταλλικό έλασμα συνθλίβεται μαζί με την προστατευτική σφραγίδα και η παραμόρφωση τους δημιουργεί μικρές πτυχές στο άκρο του. (Εικόνα 4.6). Ο σύνδεσμος που δημιουργείται μετά την πίεση και την παραμόρφωση, προσφέρει δυναμική και στατική αντοχή η οποία αντέχει σε μεγάλες δυνάμεις πρόσκρουσης διατηρώντας έτσι την ακεραιότητα του φορτίου. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ανάλογα τον αριθμό των συναρμολογημάτων, των διαμορφωτικών που εργάζονται μέσα στην κεφαλή της μηχανής, μπορούν να δημιουργηθούν μονοί, διπλοί, ή ακόμα και τριπλοί πτυχωτοί σύνδεσμοι.



Εικόνα 4.6: Απεικόνιση ενός πτυχωτού συνδέσμου με την χρήση προστατευτικής σφραγίδας.

4.3.3 Σύνδεση χωρίς την χρήση προστατευτικής σφραγίδας.

Όταν ο αριθμός των εμπορευμάτων που πρέπει να μεταφερθούν είναι αρκετά μεγάλος και ο χρόνος δεν επιτρέπει την χρήση προστατευτικής σφραγίδας, η συνάρμοση γίνεται χωρίς αυτή (Εικόνα 4.7). Με την χρήση αυτού του τρόπου μπορεί κανείς να εξοικονομήσει πολύ χρόνο και κόστος. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη η ύπαρξη ένας πνευματικού ή υδραυλικού εργαλείου πίεσης το οποίο τυπικά χρειάζεται να έχει τρία συναρμολογήματα διαμορφωτικών εργαλείων έτσι ώστε κατά την σφράγιση του εμπορεύματος, ο τριπλός σύνδεσμος που θα δημιουργηθεί να παρέχει εξίσου την ίδια αντίσταση σε δυνάμεις τριβής και πρόσκρουσης όπως εκείνος που δημιουργείται με την χρήση προστατευτικής σφραγίδας.



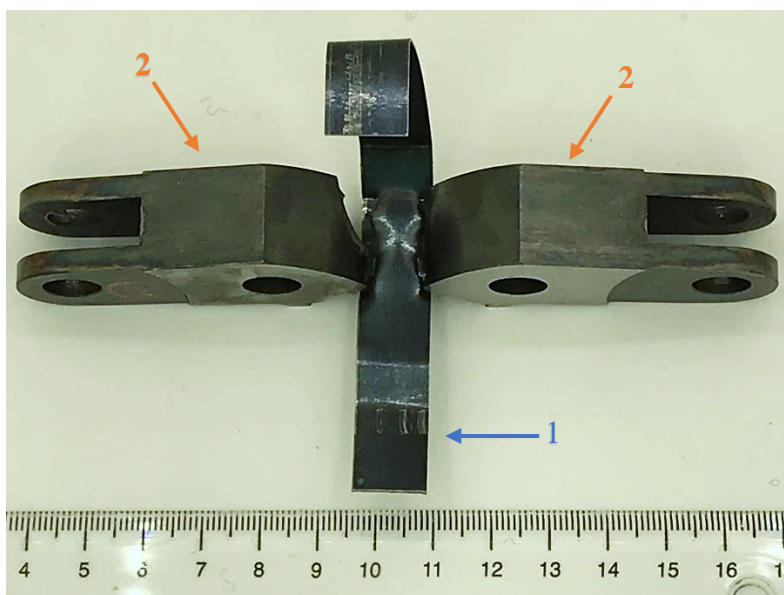
Εικόνα 4.7: Απεικόνιση του συνδέσμου χωρίς την χρήση προστασίας.

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΙΣΤΟΡΙΚΟ

5.1 Εισαγωγή

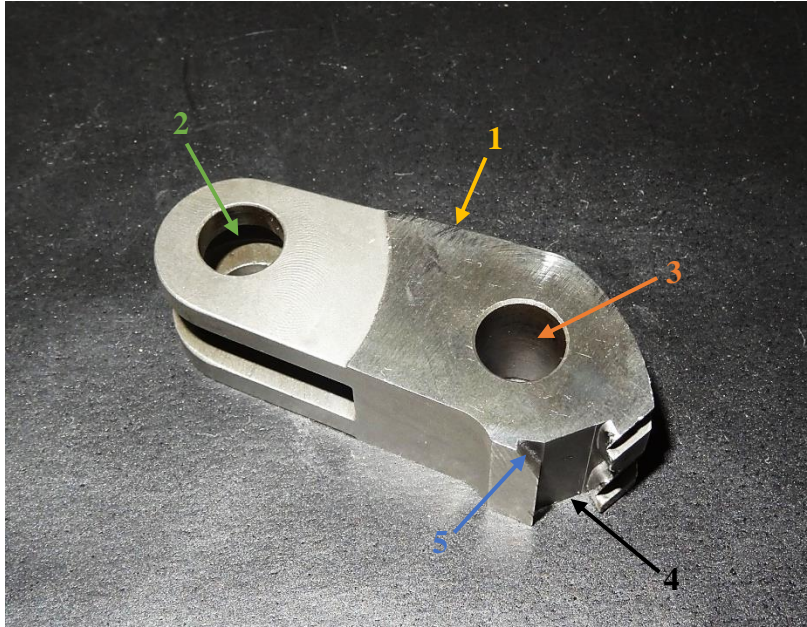
Αντικείμενο της παρούσας ανάλυσης αστοχίας αποτελούν πέντε διαφορετικά συναρμολογήματα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία παραγωγής μεταλλικών ελασμάτων. Το υπό μελέτη εργαλείο χρησιμοποιείται στη συσκευασία συμπαγών μεταλλικών κουλούρων για την οποία χρησιμοποιείται μεταλλικό έλασμα (μ.ε.) (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 5.1). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με σκοπό την διερεύνηση του μηχανισμού που συνέβαλε στην αστοχία των εξαρτημάτων αυτών. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κάθε συναρμολόγημα αποτελεί μια διαφορετική πρόταση στο πρόβλημα που παρουσιάστηκε στο πρωτότυπο εργαλείο. Μελετήθηκαν συνολικά τέσσερις προτάσεις οι οποίες αστόχησαν, προκειμένου να επιτευχθεί η τελική, όπου και λειτουργεί κανονικά χωρίς κάποιο πρόβλημα.



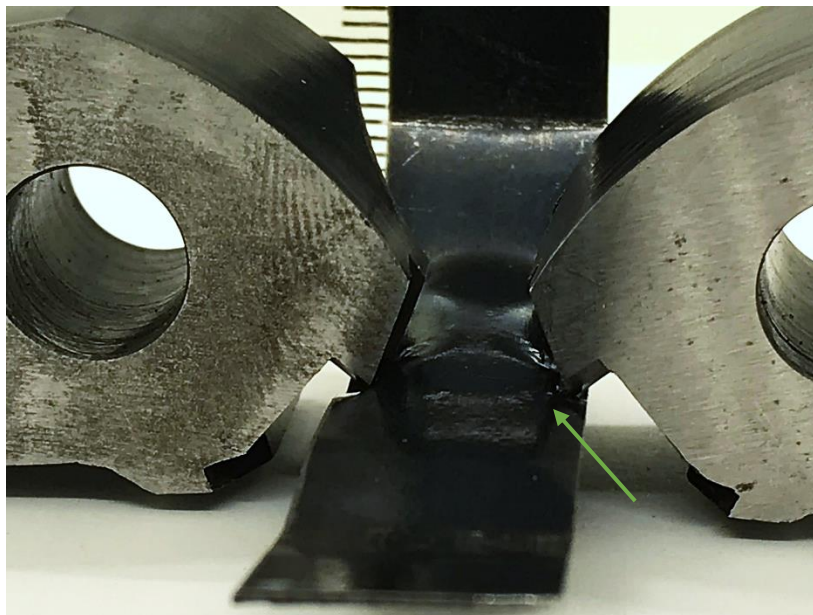
Εικόνα 5.1 Γενική άποψη της συναρμογής και του τρόπου λειτουργίας του εξαρτήματος.

Το συναρμολόγημα αποτελείται από τρία διαφορετικά εξαρτήματα. Τα δυο από αυτά είναι κινούμενα (λεπτομέρεια 2 εικόνα 5.1) ενώ το τρίτο είναι σταθερό (λεπτομέρεια 1 εικόνα 5.3) και συμμετέχει στην δημιουργία διατμητικού τασικού πεδίου για την πλαστική εν ψυχρώ παραμόρφωση του μεταλλικού ελάσματος (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 5.1). Τα κινούμενα μέρη αποτελούνται από το κύριο σώμα (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 5.2) και τις σιαγόνες (λεπτομέρεια 4, Εικόνα 5.2) ενώ φέρουν δυο διάτρητες οπές στο εμπρόσθιο και πίσω μέρος τους. Οι οπές αυτές αποτελούν την άνω (λεπτομέρεια 3, Εικόνα 5.2) και κάτω (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 5.2) συγκράτηση του κυρίου μέρους

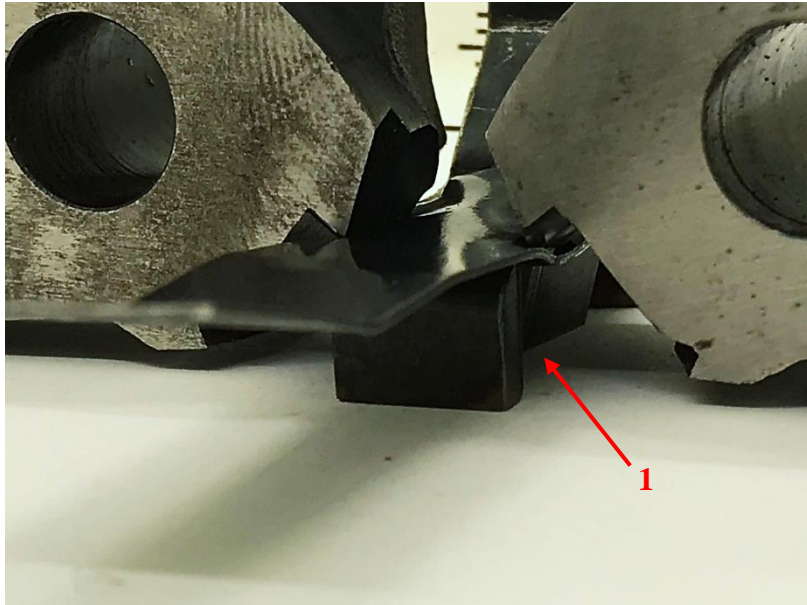
προκειμένου να γίνεται η κίνηση που απαιτείται για την διαμόρφωση του ελάσματος από τις σιαγόνες. Τέλος η διαμόρφωση αυτή πάνω στην σιαγόνα (λεπτομέρεια 5, Εικόνα 5.2) αποτελεί σήμανση ότι πρόκειται για το αριστερό (AP) κινούμενο μέρος του συναρμολογήματος.



Εικόνα 5.2: Απεικόνιση του κινούμενου μέρους (AP) του συναρμολογήματος N.



Εικόνα 5.3: Απεικόνιση της συναρμογής με έμφαση στην διαμόρφωση του μεταλλικού ελάσματος (βέλος).



Εικόνα 5.4: Σταθερό τμήμα της συναρμογής (λεπτομέρεια 1).

Ήδη, στο ιστορικό του εξαρτήματος περιλαμβάνονται στοιχεία όπως, ο χρόνος που χρειάζεται το εξάρτημα να κάνει την συσκευασία κουλούρας μετάλλου ανέρχεται στα 40sec, ενώ στην διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους χρειάζονται 15 τέτοια σετ αυτών των εξαρτημάτων. Είναι βασικό επίσης να επισημανθεί ότι ο χρόνος λειτουργίας των εξαρτημάτων πριν την αστοχία τους ανέρχονται από 3 μέρες έως 3 μήνες. Το εξαιρετικά μεγάλο εύρος στο χρόνο λειτουργίας σε συνδυασμό με τις διαφορετικές προτάσεις χρησιμοποιούμενων υλικών κατά την κατασκευή των ελασμάτων δείχνει την ανάγκη εύρεσης μιας σταθερής λύσης καθώς και την ιδιαιτερότητα στις ανοχές λειτουργίας των τριών εξαρτημάτων μεταξύ τους.

5.2 Μελετούμενα εξαρτήματα αστοχίας

Συνολικά διατέθηκαν από την κατασκευάστρια εταιρεία πέντε (αρχικός σχεδιασμός και άλλα τέσσερα) συναρμολογήματα του κινητού μέρους του εργαλείου καθώς επίσης και τρεις περιπτώσεις μεταλλικού ελάσματος που χρησιμοποιούνταν για την συνάρμωση. Μόνο σε μια περίπτωση είναι διαθέσιμο το σταθερό εξάρτημα. Όλα τα συναρμολογήματα τακτοποιήθηκαν. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία και χαρακτηριστικά είτε της χρονικής στιγμής χρήσης τους είτε ήταν γνωστό το σύνολο της θερμικής ακολουθίας που είχαν υποστεί.

5.2.1 Parent Assembly

Το συγκεκριμένο ζευγάρι κομματιών λειτουργούσε αρχικά πάνω στο μηχάνημα και θεωρείται πως είναι το αρχικό συναρμολόγημα που ο σχεδιαστής του μηχανήματος πρότεινε.



Εικόνα 5.5: Γενική άποψη του κινητού μέρους του συναρμολογήματος (δυο εξαρτήματα) του Parent Assembly – Αρχικός σχεδιασμός.

5.2.2 1st Attempt

Το δεδομένο συναρμολόγημα αποτελεί την πρώτη πρόταση που δόθηκε στο πρόβλημα μετά την αστοχία του μητρικού εργαλείου.



Εικόνα 5.6: Γενική άποψη του κινητού μέρους του συναρμολογήματος (δυο εξαρτήματα) του 1st Attempt – πρώτη πρόταση.

Μαζί με το συναρμολόγημα του 1st Attempt είναι διαθέσιμο και το μεταλλικό έλασμα που χρησιμοποιούνταν την δεδομένη χρονική στιγμή στο οποίο δόθηκε η σήμανση Α (Εικόνα 5.7).



Εικόνα 5.7: Απεικόνιση του μεταλλικού ελάσματος Α του συναρμολογήματος 1st attempt.

5.2.3 N

Μετά την αποτυχία του προηγούμενου κομματιού δόθηκε η τρίτη πρόταση Βασική πληροφορία για το συγκεκριμένο συναρμολόγημα είναι το γεγονός ότι κατά την κατασκευή του κομματιού από λάθος δεν έγινε θερμική κατεργασία πριν την εναζώτωση. Στα επόμενα βήματα της ανάλυσης θα ελεγχθεί αν το εργαλείο έχει υποστεί μόνο εναζώτωση.



Εικόνα 5.8: Γενική άποψη του κινητού μέρους του συναρμολογήματος (δύο εξαρτήματα) του N - δεύτερη πρόταση.

5.2.4 QT+N1

Η δεύτερη πρόταση για την συγκεκριμένη τεχνολογική εφαρμογή. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα εξαρτήματα του κινουμένου μέρους έχουν υποστεί θερμική κατεργασία βαφής και επαναφοράς και κατόπιν εναζώτωση.



Εικόνα 5.9: Γενική άποψη του κινητού μέρους του συναρμολογήματος (δύο εξαρτήματα) του QT + N1 - τρίτη πρόταση.

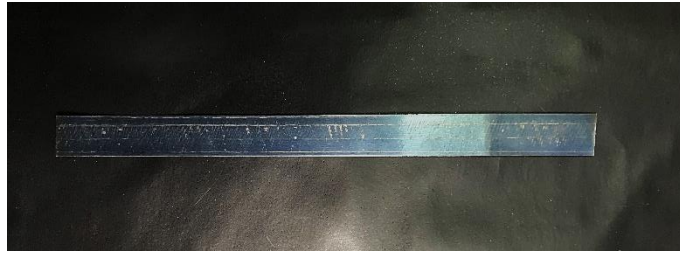
5.2.5 QT+N2

Η τέταρτη πρόταση που δόθηκε στο πρόβλημα είχε και αυτή θερμική κατεργασία βαφής, επαναφοράς και επακολούθως εναζώτωση.



Εικόνα 5.10: Γενική άποψη του κινητού μέρους του συναρμολογήματος (δύο εξαρτήματα) του QT + N2 - τέταρτη πρόταση.

Ταυτόχρονα με το QT+N2 υπάρχουν διαθέσιμα δυο διαφορετικά μεταλλικά ελάσματα στα οποία δόθηκε η σήμανση Β και Γ αντίστοιχα (Εικόνα 5.11 και 5.12).



Εικόνα 5.11: Απεικόνιση του μεταλλικού ελάσματος Β του συναρμολογήματος QT + N2.



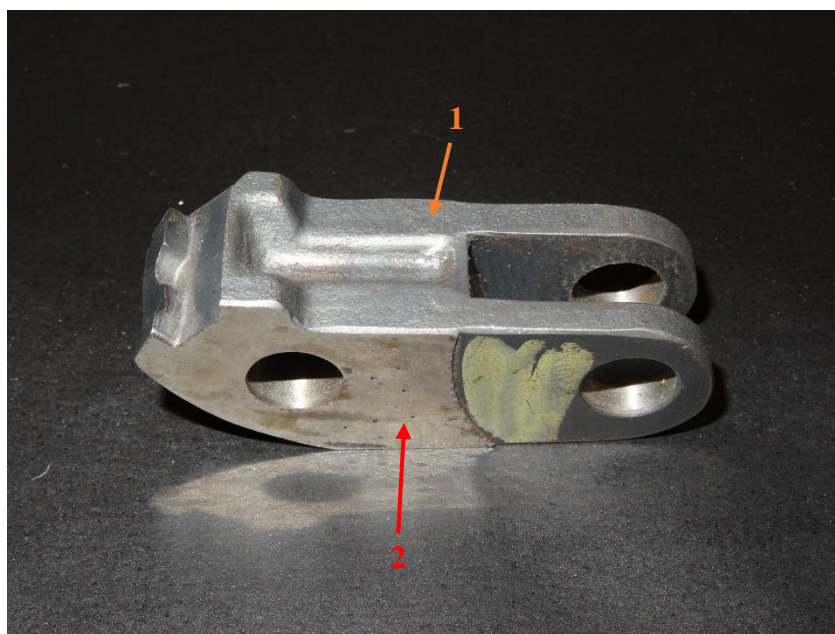
Εικόνα 5.12: Απεικόνιση του μεταλλικού ελάσματος Γ του συναρμολογήματος QT + N2.

6. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ

6.1 Οπτική επιθεώρηση και φωτογραφικό αρχείο

Κατά την παραλαβή των εξαρτημάτων, πραγματοποιήθηκε οπτική επιθεώρηση με γυμνό μάτι με σκοπό την συλλογή όσο των δυνατών περισσότερων δεδομένων και πληροφοριών σχετικά με τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά τους. Ελέγχθηκαν προσεκτικά ως προς το μέγεθος και τη γεωμετρία των τεμαχίων καθώς και τη ποιότητα της επιφάνειάς τους, για την ύπαρξη ρωγμών ή θραύσεων και για οποιοδήποτε άλλο στοιχείο που σχετίζεται με τις φάσεις κατασκευής και τον τρόπο λειτουργίας τους. Όλα τα κομμάτια φωτογραφήθηκαν στο εργαστήριο του εργαστηρίου Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας μεταλλικών Υλικών (Ε.Π.Τ.Υ.Α.) του τμήματος Μηχανολόγων μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.) με την χρήση κινητού τηλεφώνου και επαγγελματικής φωτογραφικής μηχανής.

6.1.1 Parent Assembly



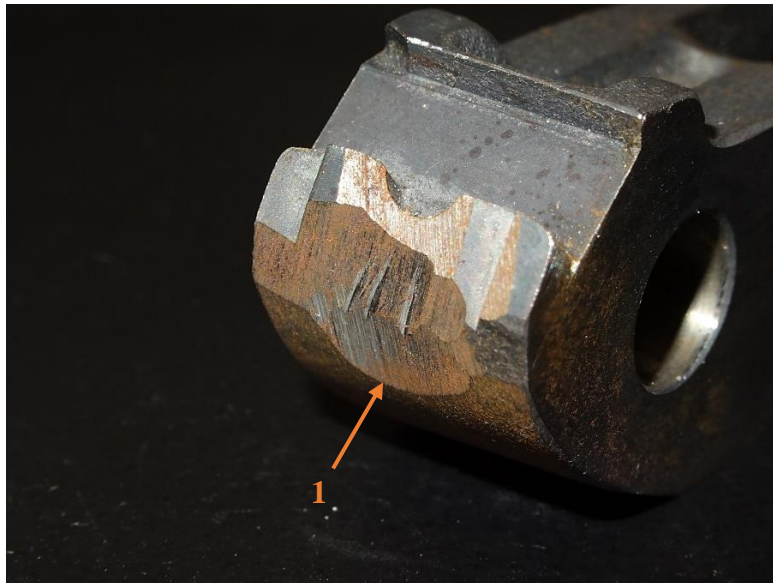
Εικόνα 6.1: Γενική άποψη του κινούμενου εξαρτήματος (ΔΕ) – συναρμολόγημα Parent Assembly.

Το εξάρτημα παρουσιάζει περίπλοκη γεωμετρία με πολλές ακμές και οπές. Η ποιότητα της επιφάνειάς του (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.1) δείχνει πως το συγκεκριμένο εξάρτημα μπορεί να είναι προϊόν εν θερμώ σφυρηλάτησης. Στο πίσω μέρος υπάρχουν δυο οπές μέσα από τις οποίες διέρχεται ένας άξονας με την βοήθεια του οποίου το εξάρτημα στηρίζεται και κινείται. Για τον ίδιο λόγο υπάρχει και η οπή στο μπροστινό του μέρος. Οι δυο πλαϊνές πλευρές εκατέρωθεν έχουν υποστεί λείανση για αποπεράτωση

(λεπτομέρεια 2, Εικόνα 6.1) προκειμένου να επιτευχθούν οι απαραίτητες διαστάσεις και ανοχές που απαιτούνταν για τη συναρμογή.



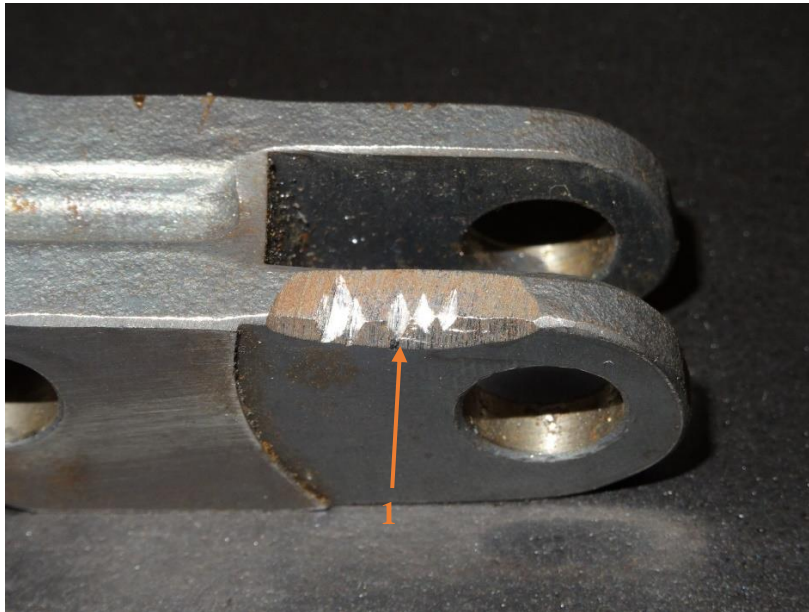
Εικόνα 6.2: Απεικόνιση της σιαγόνας διαμόρφωσης στο κινούμενο εξάρτημα (ΔΕ) – συναρμολόγημα Parent Assembly.



Εικόνα 6.3: Απεικόνιση κοψιμάτων και τροχίσματος στη σιαγόνα διαμόρφωσης (ΔΕ) – συναρμολόγημα Parent Assembly.

Στο ένα τεμάχιο του συναρμολογήματος στο μπροστινό μέρος, παρατηρούνται κοψίματα και τρύχιση τα οποία έχουν προέλθει από την χρήση κοπτικού τροχού (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.3). Εκτιμάται ότι τα κοψίματα αυτά και το τρύχιση έγιναν με σκοπό την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας του εργαλείου ώστε να διευκολυνθεί η εξόλκευση του ελάσματος. Η απόφαση αυτή παραπέμπει στον χειριστή της μηχανής Επίσης στο ίδιο κομμάτι στο πίσω μέρος εμφανίζονται παρόμοια

κοψίματα (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.4). Το τρόχισμα στο πίσω μέρος πιθανά να έγινε για λόγους προσανατολισμού του εξαρτήματος ως προς την θέση λειτουργίας.



Εικόνα 6.4: Απεικόνιση τροχισμάτων στην κάτω περιοχή συγκράτησης – συναρμολόγημα Parent assembly.



Εικόνα 6.5: Επιφάνεια του κινούμενου εξαρτήματος που υπέστη λείανση για αποπεράτωση – συναρμολόγημα Parent Assembly.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι στην επιφάνεια που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση παρατηρούνται σημεία με καφέ απόχρωση. Ο χρωματισμός οφείλεται στην υπερθέρμανση του κομματιού κατά την διαδικασία της αποπεράτωσης η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση της μικροδομής (εκ νέου ωστενιτοποίηση και βαφή εξαρτήματος χωρίς επαναφορά. (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.5).

6.1.2 1st Attempt

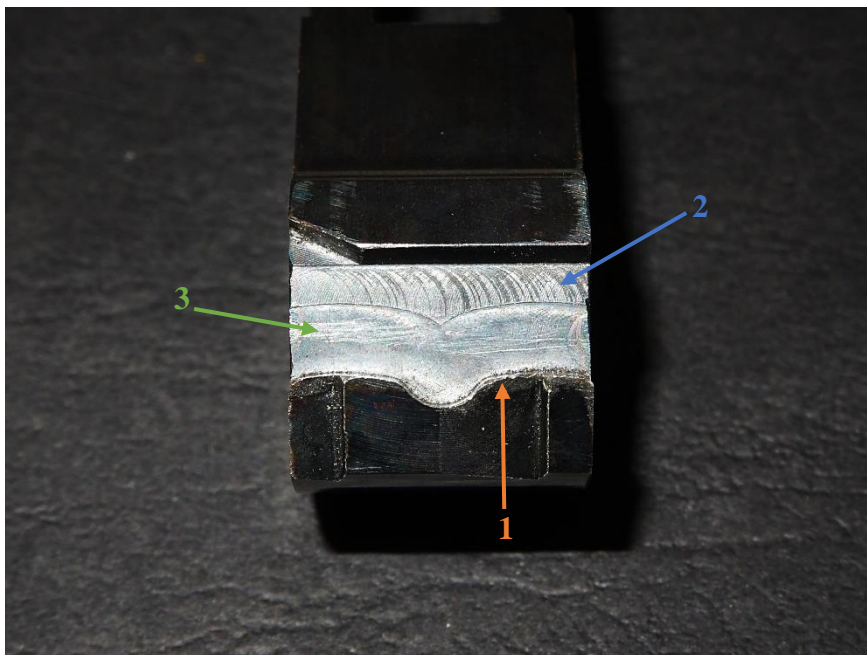


Εικόνα 6.6: Γενική άποψη του κινούμενου εξαρτήματος (ΔΕ) – συναρμολόγηση 1st Attempt.

Σε αυτή την περίπτωση η γεωμετρία αλλάζει από το πρωτότυπο κομμάτι (Parent assembly (Εικόνα 6.1) και η ποιότητα της επιφάνειάς του είναι πολύ διαφορετική αφού το συγκεκριμένο δεν αποτελεί προϊόν σφυρηλάτησης. Η τοπολογία των οπών και των ακμών καθώς και οι εκατέρωθεν επιφάνειες αποπεράτωσης παραμένουν ίδιες. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ο χρωματισμός του εξαρτήματος (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.6) οφείλεται στην θερμική κατεργασία επαναφοράς σε χαμηλή θερμοκρασία μέχρι 300°C. Η ίδια απόχρωση παρατηρείται και στο σταθερό τρίτο εξάρτημα της συναρμογής (Εικόνα 6.7). Αυτό σημαίνει ότι δεν απαιτήθηκε καμία κατεργασία αποπεράτωσης διαστάσεων σε αυτές τις περιοχές των εξαρτημάτων. Συμπερασματικά, ανοχές διαστάσεων υπάρχουν μόνο στις εκατέρωθεν παράλληλες επιφάνειες στο κυρίως σώμα του κινούμενου εξαρτήματος.



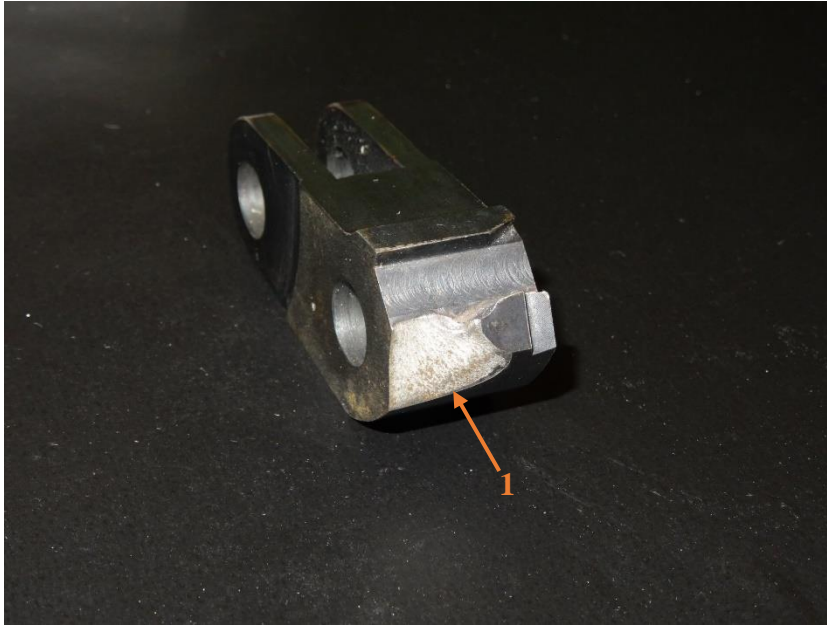
Εικόνα 6.7: Γενική άποψη του σταθερού εξαρτήματος του εργαλείου μορφοποίησης – συναρμολόγημα 1st Attempt.



Εικόνα 6.8: Απεικόνιση της κατεργασμένης μηχανουργικά επιφάνειας στη σιαγόνα του κινούμενου εξαρτήματος (ΔΕ) - συναρμολόγημα 1st attempt.

Κατά την οπτική επιθεώρηση στη περιοχή της διαμόρφωσης στη σιαγόνα του εξαρτήματος παρατηρήθηκαν πολλές μικρές εκλεπίσεις (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.8) υποδηλώνοντας τη χαμηλή δυσθραυστότητα της συγκεκριμένης περιοχής. Εντός της αυλάκωσης στη σιαγόνα, από την οποία διέρχεται το μεταλλικό έλασμα, διακρίνονται έντονες γραμμές μηχανουργικής κατεργασίας (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 6.8) ενώ οι γραμμές φθοράς που διακρίνονται (λεπτομέρεια 3, Εικόνα 6.8) οφείλονται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια κίνησης του μ.ε. μέσα στην αυλάκωση αναπτύσσονται δυνάμεις

τριβής που φθείρουν το τοίχωμα. Αυτό είναι αποτέλεσμα κακής συναρμολόγησης μεταξύ των κινουμένων μερών του εξαρτήματος που οδηγεί στην εσφαλμένη απόσταση μεταξύ τους κατά την λειτουργία. Επίσης, παρατηρείται ολική θραύση (total braking), στη σιαγόνα (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.9) η οποία προήλθε πιθανά λόγω χαμηλής δυσθραυστότητας του υλικού κατασκευής του εξαρτήματος καθώς και την κακή ευθυγράμμιση της όλης συναρμογής.



Εικόνα 6.9: Ολική θραύση της σιαγόνας του κινούμενου μέρους (AP) – Συναρμολόγηση 1st attempt.

Μαζί με το συναρμολόγηση του 1st Attempt εξετάστηκε και το μεταλλικό έλασμα (A) που χρησιμοποιούνταν την δεδομένη χρονική στιγμή (Εικόνα 6.10). Σε όλη την επιφάνεια του μ.ε παρατηρούνται εκδορές (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.10) οι οποίες έχουν δημιουργηθεί μηχανικά πιθανώς κατά την διέλευση του μέσα από τη μηχανή για λόγους αγκύρωσης. Επίσης διακρίνεται το αποτύπωμα που αφήνει το κινούμενο μέρος κατά την στιγμή της συνάρμοσης (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Απεικόνιση του μεταλλικού ελάσματος (Α)– Συναρμολόγηση 1st attempt.

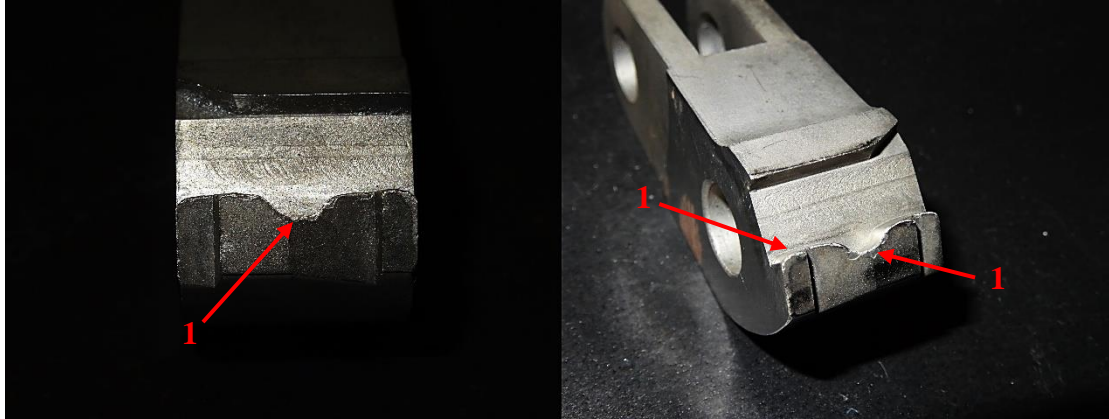
6.1.3 N



Εικόνα 6.11: Γενική άποψη του κινούμενου εξαρτήματος (AP) - συναρμολογήματος N.

Στο εξάρτημα αυτό παρατηρείται πολύπλοκη γεωμετρία επίσης, με τις ίδιες οπές και ακμές όπως και προηγούμενα. Η ποιότητα της επιφάνειας δεν προέρχεται από σφυρηλάτηση. Το χρώμα του υποδεικνύει ότι έχει υποστεί εναζώτωση και η πληροφορία που υπάρχει είναι πως από λάθος σχεδιασμό έχει πραγματοποιηθεί εναζώτωση χωρίς προηγουμένως να έχει υποστεί θερμική κατεργασία ολικής σκλήρυνσης. Στην επιφάνεια της αποπεράτωσης (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.11) σημεία

τα οποία υποδεικνύουν τριβή μεταξύ των συνεργαζόμενων μερών πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει ανάγκη για σφιχτή συναρμογή, με πολύ αυστηρές ανοχές, αλλά και λανθασμένα.



Εικόνα 6.12: Απεικόνιση των εκλεπίσεων στο άνω μέρος της σιαγόνας διαμόρφωσης - συναρμολόγημα N.

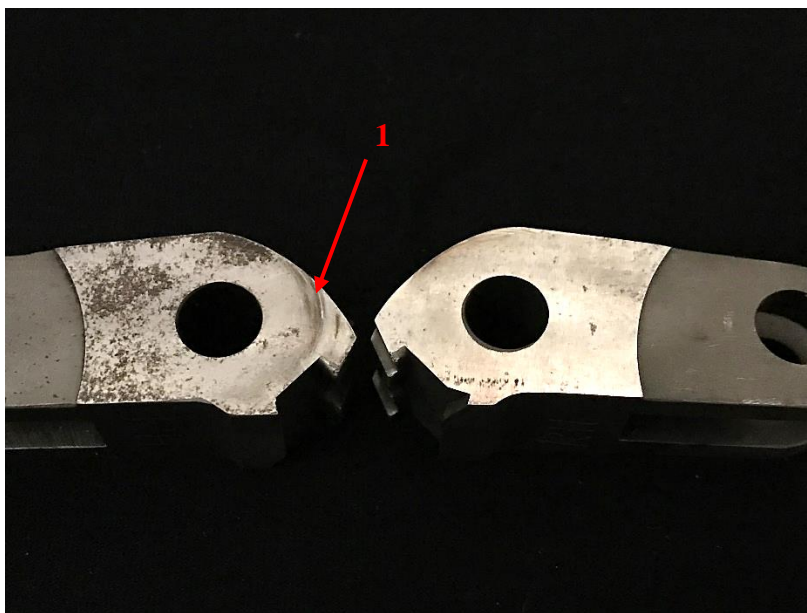
Στην επιφάνεια της σιαγόνας στα σημεία που συμμετέχουν στην διαμόρφωση του μ.ε., παρατηρούνται πολλές εκλεπίσεις (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.12) γεγονός που δικαιολογείται από την υψηλή σκληρότητα που παρουσιάζει το εναζωτωμένο στρώμα σε συνδυασμό με το εφαρμοζόμενο πεδίο των τάσεων κατά τη διαμόρφωση του μ.ε. Μέσα στην αυλάκωση παρατηρούνται τα σημάδια που αφήνει το εργαλείο κατά τη μηχανουργική κατεργασία. Υπάρχει απαραίτητη επαφή μεταξύ του εργαλείου και του μ.ε. για λόγους ευθυγράμμισης εντός της αυλάκωσης. Έτσι, θα έπρεπε η επιφάνεια να έχει πολύ μικρή τραχύτητα για την ελαχιστοποίηση των δυνάμεων τριβής. Η κατεργασία στην περιοχή αυτή αυξάνει τον αριθμό των φάσεων κατασκευής και η φύση της πρώτης αυξάνει συνολικά το κόστος του εξαρτήματος

6.1.4 QT+N1



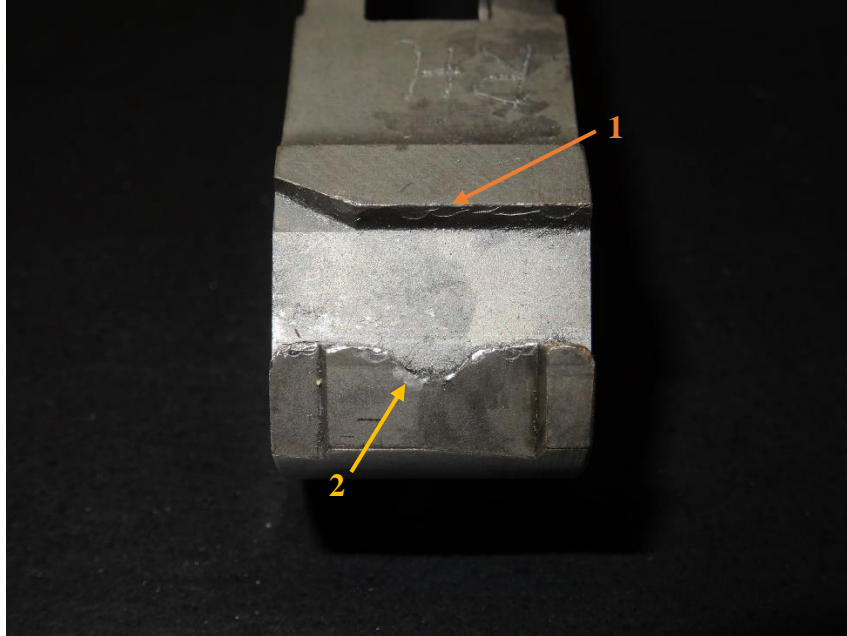
Εικόνα 6.13: Γενική άποψη του κινούμενου εξαρτήματος (ΔΕ) - συναρμολόγημα QT+N1.

Παρατηρείται η ίδια γεωμετρία με την προηγούμενη υποψήφια λύση, με πολλές σπές και ακμές. Η ποιότητα της επιφάνειας του δεν μοιάζει με αυτή του σφυριλατημένου. Το εξάρτημα είναι προϊόν μηχανουργικής κατεργασίας. Το συγκεκριμένο εξάρτημα έχει υποστεί θερμική κατεργασία βαφής και επαναφοράς και κατόπιν έχει υποβληθεί σε εναζώτωση.



Εικόνα 6.14: Απεικόνιση της φθοράς στην πλευρική επιφάνεια στο άνω μέρος της σιαγόνας - συναρμολόγημα QT+N1.

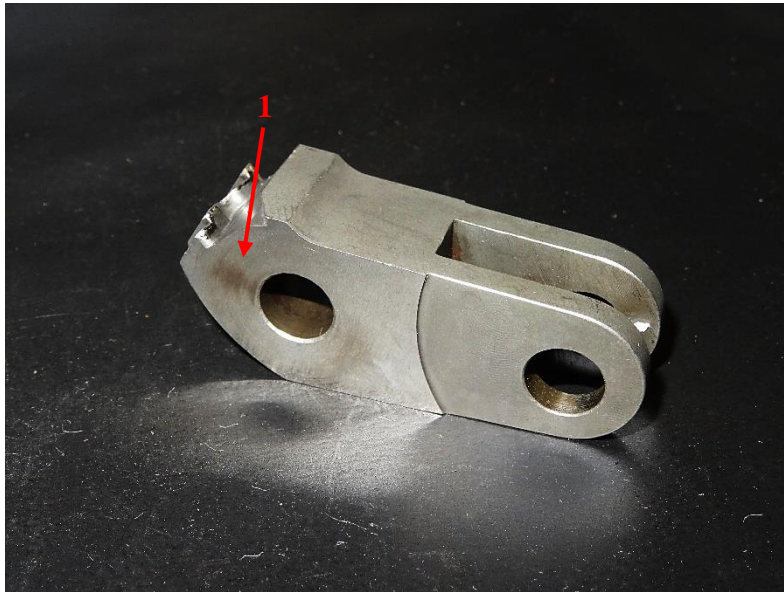
Παρατηρείται ότι στην επιφάνεια αποπεράτωσης το κομμάτι εμφανίζει σημάδια φθοράς (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.15) τα οποία παραπέμπουν την ύπαρξη δυνάμεων τριβής λόγω κακής διαστασιακής μελέτης.



Εικόνα 6.15: Απεικόνιση άνω μέρους της σιαγόνας του κινούμενου εξαρτήματος (ΔΕ) – συναρμολόγημα QT+N1.

Όπως και στις προηγούμενες δυο περιπτώσεις, στο άνω τμήμα της σιαγόνας του εξαρτήματος υπάρχουν εκτεταμένες εκλεπίσεις οι οποίες οφείλονται στην ψαθυρότητα της εναζώτωσης δεδομένου ότι το συναρμολόγημα δέχεται μηχανικές φορτίσεις στο άνω μέρος του (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 6.15). Η εκλέπιση που εμφανίζει στο κάτω μέρος του (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.15) υποδεικνύει ακόμα περισσότερο την ψαθυρότητα της εναζώτωσης.

6.1.5 QT+N2



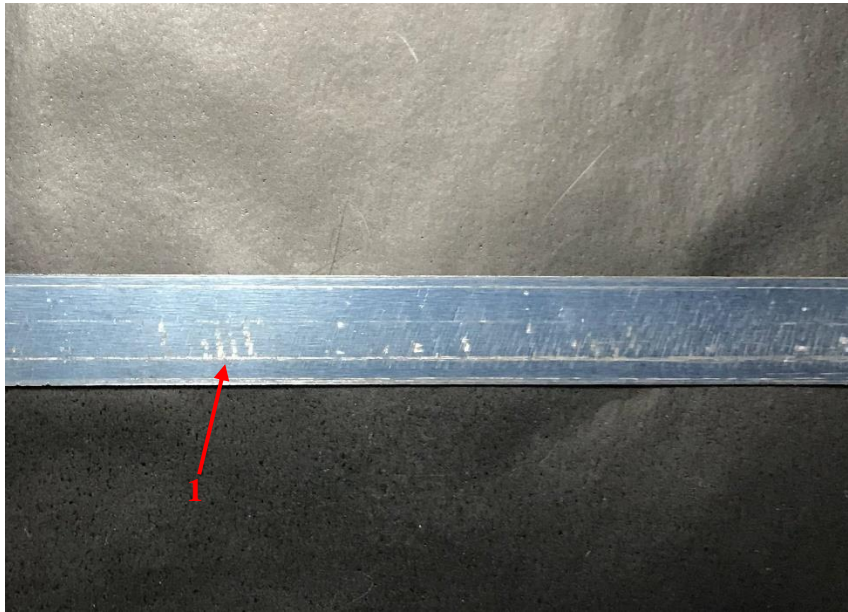
Εικόνα 6.16: Γενική άποψη του κινούμενου εξαρτήματος - συναρμολόγημα QT+N2. Η γεωμετρία είναι ίδια, με τις ίδιες οπές και ακμές. Η ποιότητα της επιφάνειας δείχνει ότι το εξάρτημα έχει προέλθει από μηχανουργική κατεργασία. Το συγκεκριμένο εξάρτημα έχει υποστεί βαφή, επαφωρά και κατόπιν εναζώτωση για τη σκλήρυνση της επιφάνειας του. Παρατηρούνται σημάδια τριβής στην πλευρική επιφάνεια του κυρίως σώματος και στη σιαγόνα, χαρακτηριστικό κακής συναρμογής κατά την λειτουργία (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.16).



Εικόνα 6.17: Απεικόνιση άνου μέρους σιαγόνας του κινούμενου εξαρτήματος (AP) - συναρμολόγημα QT+N2.

Όπως και στις άλλες περιπτώσεις έτσι και εδώ παρατηρείται μεγάλη πυκνότητα εκλεπίσεων, οι οποίες οφείλονται στην ψαθυρότητα της εναζώτωσης (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 6.17). Επίσης, μέσα στην αυλάκωση στην οποία κινείται το μεταλλικό έλασμα παρατηρούνται σημάδια φθοράς στο σημείο επαφής του εξαρτήματος με το μ.ε. (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 6.17).

Μαζί με το QT+N2 εξετάστηκαν και τα μεταλλικά ελάσματα (B), (Γ), (Εικόνες 6.18 και 6.179). Παρατηρείται ότι σε όλο το μήκος της επιφάνειας υπάρχουν σημάδια παραμόρφωσης (λεπτομέρεια 1, Εικόνες 6.18 και 6.19) τα οποία έχουν προέλθει κατά την διέλευση του μεταλλικού ελάσματος μέσα από την μηχανή. Επιπλέον στο μ.ε (Γ) παρατηρούνται σημάδια λείανσης στην επιφάνεια του.



Εικόνα 6.18: Απεικόνιση του μεταλλικού ελάσματος (B) – Συναρμολόγημα QT+N2.



Εικόνα 6.19: Απεικόνιση του μεταλλικού ελάσματος (Γ) – Συναρμολόγημα QT+N2.

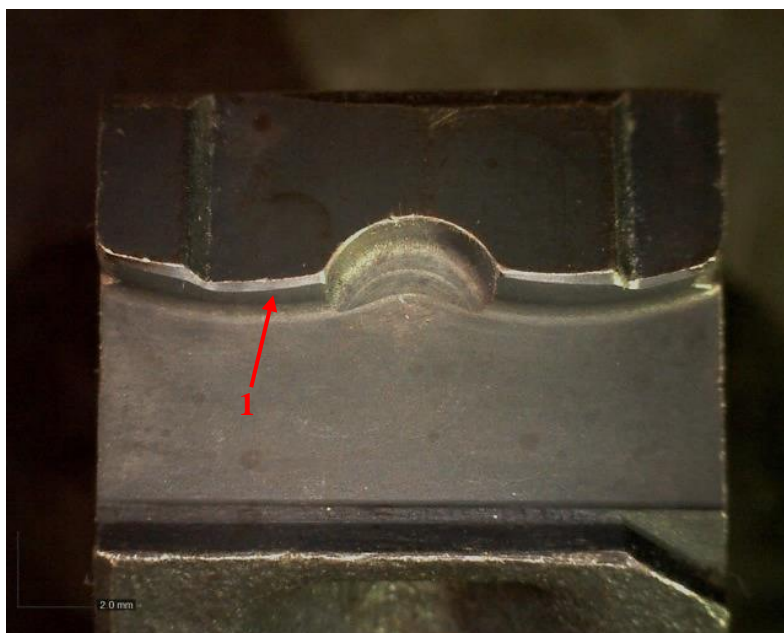
7. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΑ

7.1 Μακροσκοπική εξέταση επιφανειών θραύσης

Αμέσως μετά την οπτική επιθεώρηση τα τεμάχια καθαρίστηκαν και υποβλήθηκαν σε μακροσκοπική εξέταση με την χρήση στερεοσκοπίου έτσι ώστε να συλλεχθούν πληροφορίες σχετικά με το είδος και τον τρόπο με τον οποίο προκλήθηκαν οι επιφάνειες θραύσης και οι εκλεπίσεις των κινούμενων σιαγόνων. Η μακροσκοπική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Ε.Π.Τ.Υ.Λ.) του τμήματος Μηχανολόγων μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.) με την χρήση φορητού στερεοσκοπίου Dimo – Lite Pro / Pro 2 AM4000/AD4000 Series 1.3 Megapixel.

7.1.1 Parent Assembly

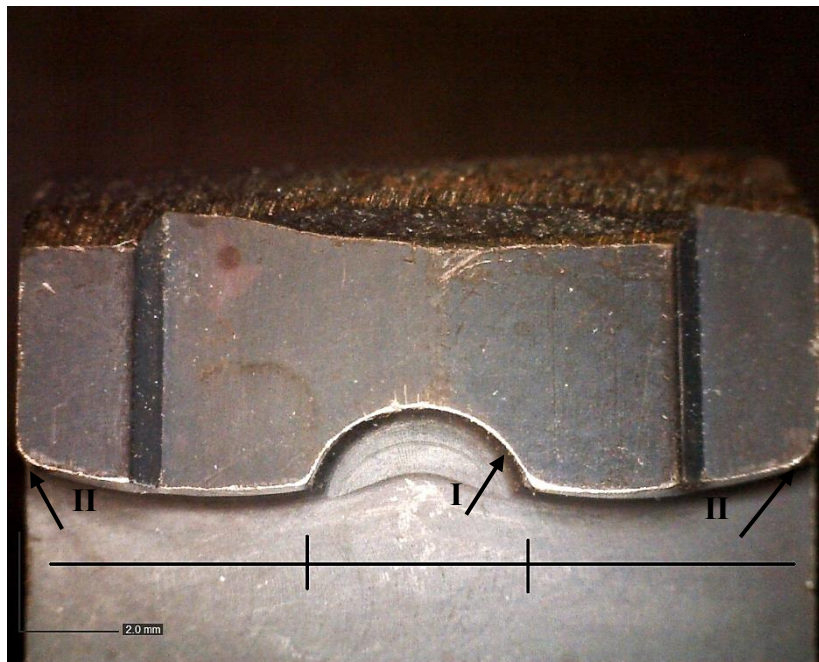
Στον μακροσκοπικό έλεγχο υπεβλήθησαν και τα δυο κομμάτια του συναρμολογήματος και προέκυψαν οι παρακάτω φωτογραφίες. Υπενθυμίζεται ότι κάθε συναρμολόγηση απαρτίζεται από δυο κινούμενα μέρη τα οποία αναγνωρίζονται μέσω της διαμόρφωσης που υπάρχει στο μπροστινό τμήμα της σιαγόνας («κεφάλαιο 5»).



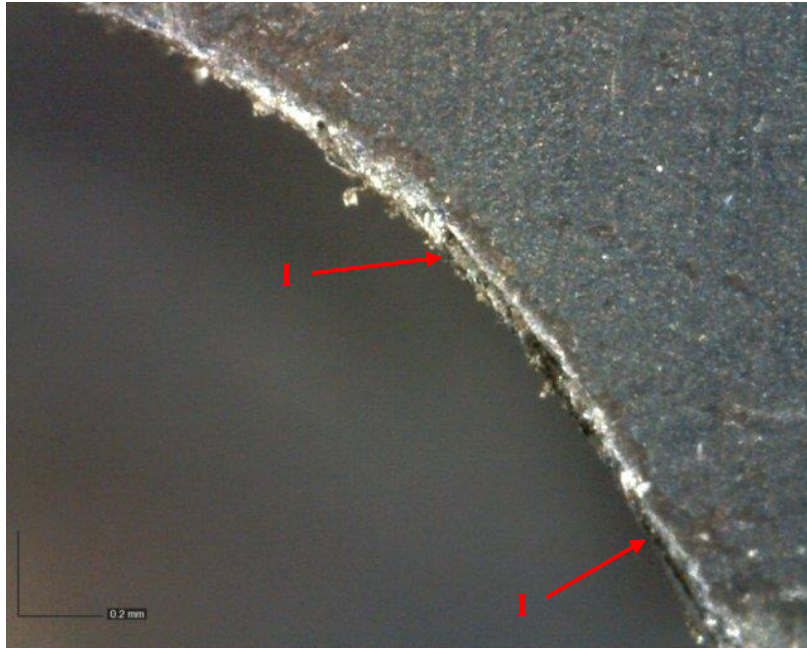
Εικόνα 7.1: Περιοχή διαμόρφωσης ελάσματος – γενική άποψη σιαγόνας (ΔΕ) - συναρμολόγηση Parent Assembly (20x Μεγέθυνση).

Η αυξημένη φωτεινότητα (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.1) στις ακμές του κομματιού σχετίζεται με την ύπαρξη υψηλών δυνάμεων τριβής κατά την διαμόρφωση του

ελάσματος. Η περιοχή αυξημένης φωτεινότητας οριοθετεί και την περιοχή λειτουργίας (διαμόρφωσης) του εξαρτήματος. Το στρογγύλεμα τους δείχνει ότι το εξάρτημα έχει φθαρεί μετά από ορισμένο χρόνο λειτουργίας. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση του εξαρτήματος (Εικόνα 7.2) ορίζονται δυο διαφορετικές περιοχές για την μελέτη της επιφάνειας διαμόρφωσης του εξαρτήματος. Η περιοχή δημιουργίας θλιπτικής ίνας στο διαμορφωμένο έλασμα (Περιοχή I) ή π.θ. Η περιοχή δημιουργίας εφελκυστικής ίνας στο διαμορφωμένο έλασμα (Περιοχή II) όπου ουσιαστικά περιλαμβάνει τα δυο άκρα στις ακμές διαμόρφωσης.



Εικόνα 7.2: Απεικόνιση των δυο περιοχών διαμόρφωσης του ελάσματος στην ακμή της σιαγόνας (ΔΕ) του σετ Parent Assembly. (x30 Μεγέθυνση).



Εικόνα 7.3: Ακμή διαμόρφωσης του εργαλείου – περιοχή δημιουργίας θλιπτικής ίνας – συναρμολόγημα Parent Assembly (210x Μεγέθυνση)

Κατά την απεικόνιση της π.θ. παρατηρούνται μικροριγματώσεις στην ακμή του εργαλείου (λεπτομέρεια I, Εικόνα 7.3). Η συσσώρευση των μικροριγματώσεων οδηγεί στην αποκόλληση υλικού με αποτέλεσμα την φθορά του εργαλείου το οποίο πλέον είναι ακατάλληλο προς χρήση.



Εικόνα 7.4: Ακμή διαμόρφωσης του εργαλείου – περιοχή δημιουργίας εφελκυστικής ίνας – συναρμολόγημα Parent Assembly (230x μεγέθυνση).

Στην π.ε. του εργαλείου παρατηρείται η έναρξη μιας ρωγμής στη γωνία της ακμής και η εξέλιξη της κατά μήκος αυτής. Οι π.ε. της ακμής διαμόρφωσης παραλαμβάνουν περισσότερο πολύπλοκες κατανομές φόρτισης, συνδυασμό θλιπτικών και διατμητικών τάσεων, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η συγκράτηση του ελάσματος είναι ανοικτού τύπου. Η ανάπτυξη ριγματώσεων κατά μήκος της ακμής διαμόρφωσης οφείλεται στην κατανομή των τάσεων, σε συνδυασμό με κακή συνάρμοση ή χαμηλή δυσθραυστότητα του υλικού κατασκευής του εργαλείου. Το συγκεκριμένο συναρμολόγημα αποτελεί προϊόν σφυρηλάτησης. Συνεπώς, έχει χρησιμοποιηθεί χάλυβας δεκτικός στη συγκεκριμένη κατεργασία. Στη μελέτη της μικροδομής κατά την μικροσκοπική ανάλυση θα διαπιστωθεί αν το υλικό έχει χρησιμοποιηθεί ως έχει μετά την σφυρηλάτηση ή αν έχει υποστεί κάποια επιπλέον κατεργασία εκτός της λείανσης για αποπεράτωση των παράλληλων πλευρών. Δεδομένου ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτούνται διαστασιακές ανοχές στο σώμα του εξαρτήματος που δεν καλύπτονται από σφυρήλατα προϊόντα, η λειτουργία του εξαρτήματος καθίσταται δυσχερής.



Εικόνα 7.5: Απεικόνιση περιοχής διαμόρφωσης – άνω μέρος σιαγόνας (ΔΕ) – συναρμολόγημα Parent Assembly (20x μεγέθυνση).

Όπως προαναφέρθηκε στο σημείο αυτό υπήρξε η χρήση κοπτικού τροχού με σκοπό είτε την ταυτοποίηση της τοπολογίας του εξαρτήματος είτε τη δημιουργία περιοχής αγκύρωσης που θα βοηθήσει στην διαμόρφωση του ελάσματος (Εικόνα 7.5).



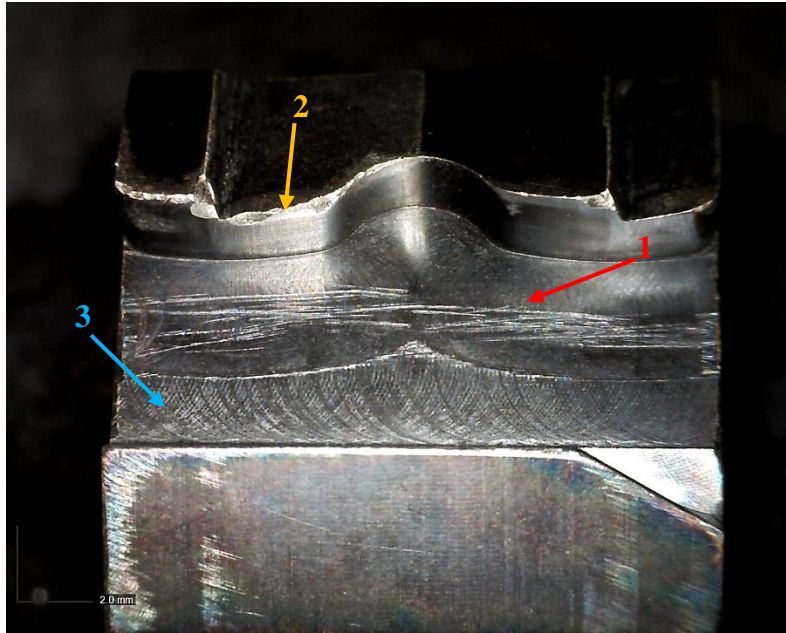
Εικόνα 7.6: Περιοχή διαμόρφωσης – κεφαλή σιαγόνας (ΔΕ) – συναρμολόγημα Parent Assembly (30x μεγέθυνση).

Κατά την απεικόνιση της π.θ. παρατηρούνται τα ίχνη (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.6) χρήσης του κοπτικού τροχού (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.7) καθώς και μικροριγματώσεις η προέλευση των οποίων τεκμηριώθηκε παραπάνω (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 7.7).



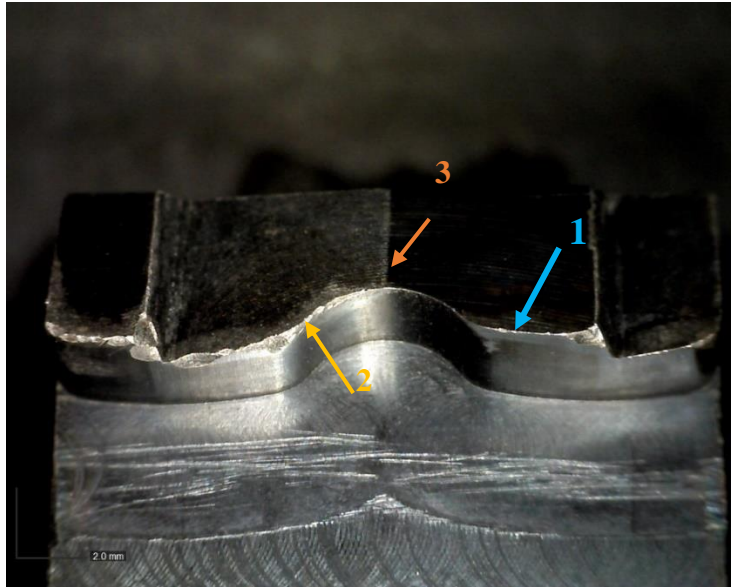
Εικόνα 7.7: Ακμή διαμόρφωσης του εργαλείου – περιοχή δημιουργίας θλιπτικής ίνας – συναρμολόγημα Parent Assembly (230x μεγέθυνση).

7.1.2 1st Attempt

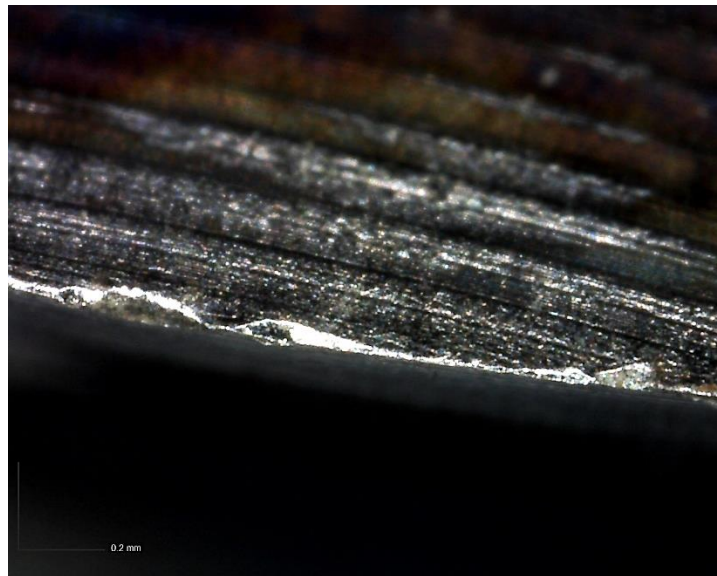


Εικόνα 7.8: Περιοχή διαμορφωσης – γενική αποψη σιαγονας (ΔΕ) - συναρμολογημα 1st Attempt (20x Μεγέθυνση).

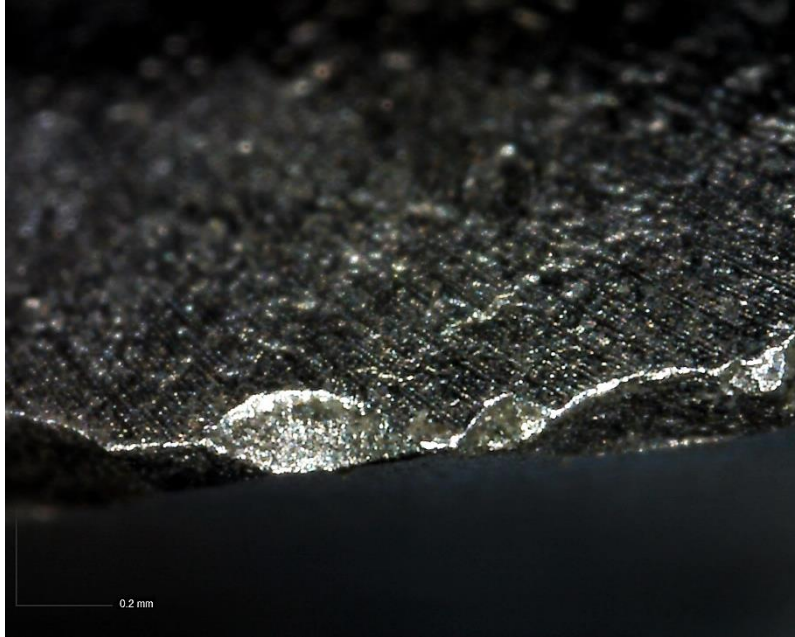
Κατά μήκος της πάνω ακμής διαμόρφωσης (λεπτομέρεια 2, Εικόνες 7.8 και 7.9) παρατηρείται υψηλή πυκνότητα εκλεπίσεων/θραύσεις και στρογγυλεύσεις της. Το φαινόμενο των εκλεπίσεων είναι έντονο, μακροσκοπικά αντιληπτό, το οποίο παρατηρείται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με το εξάρτημα Parent Assembly. Κακή συναρμογή κατά τη λειτουργία και ακατάλληλο υλικό είναι οι επικρατέστερες αιτίες για την απώλεια λειτουργίας αυτού του εξαρτήματος. Εντός της αυλάκωσης από όπου διέρχεται το έλασμα υπάρχουν σημάδια φθοράς (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.8) λόγω λανθασμένης επαφής ελάσματος – εργαλείου από λανθασμένο υπολογισμό διαστασιακών ανοχών και διαστάσεων της εφαρμογής. Επίσης παρατηρούνται σημάδια μηχανουργικής κατεργασίας ξεχρονδρίσματος, πιθανά από φρέζα ή κέντρο κατεργασίας (λεπτομέρεια 3, Εικόνα 7.8). Η επιφάνεια αυτή θα πρέπει να έχει πολύ μικρή τραχύτητα με σκοπό την ελαχιστοποίηση της ανάπτυξης δυνάμεων τριβής μεταξύ του εξαρτήματος και του ελάσματος.



Εικόνα 7.9: Αποτύπωση των δυο περιοχών διαμόρφωσης του ελάσματος στην ακμή της σιαγόνας (ΔΕ) σε μεγαλύτερη μεγέθυνση - συναρμολογημα 1st Attempt. (30x Μεγέθυνση).



Εικόνα 7.10: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας εφελκυστικής ίνας – συναρμολόγημα 1st Attempt (230x Μεγέθυνση).



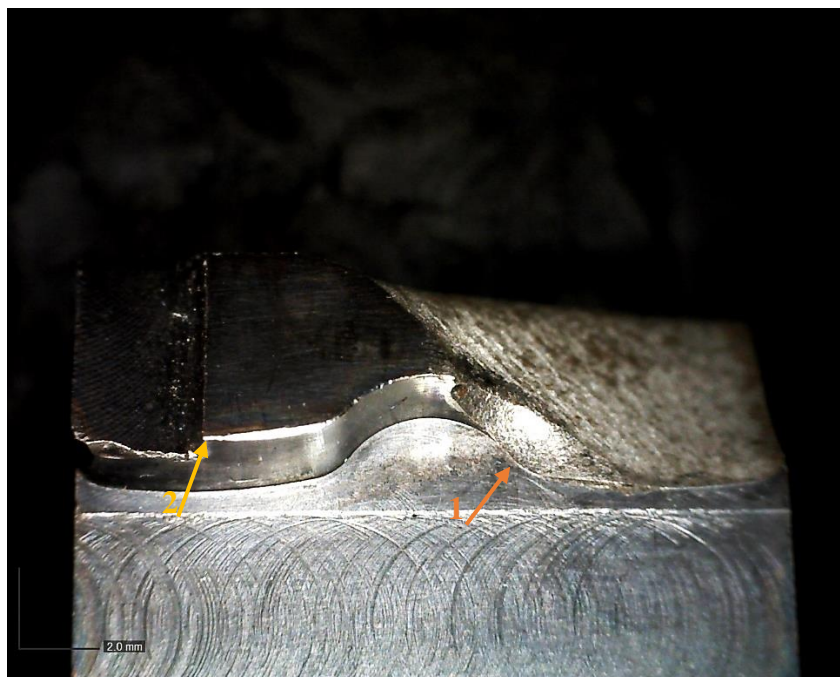
Εικόνα 7.11: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας θλιπτικής ίνας – συναρμολόγημα 1st Attempt (230x μεγέθυνση).



Εικόνα 7.12: Ελλειπής μηχανουργική κατεργασία – κατατομή της κεφαλής της σιαγόνας (ΔΕ) – συναρμολόγημα 1st Attempt (230x μεγέθυνση).

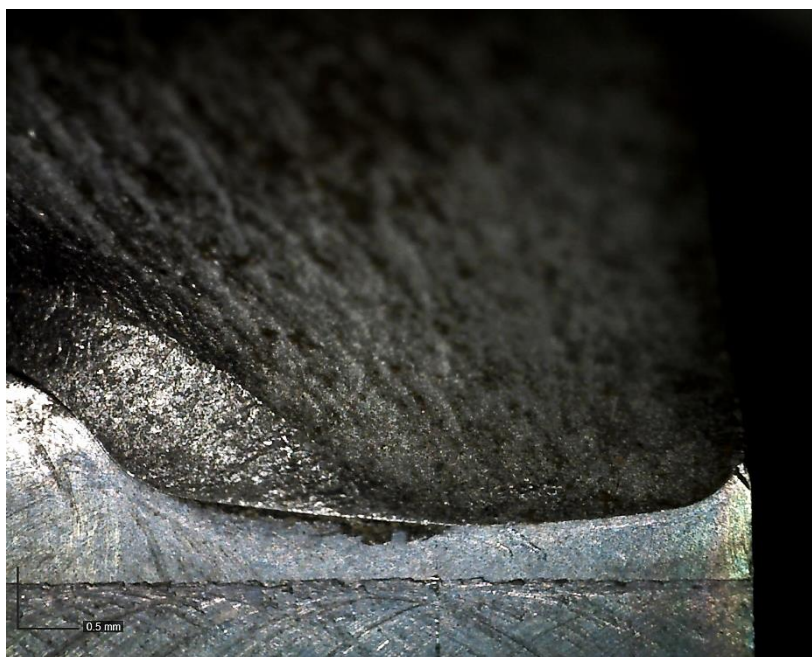
Κατά την απεικόνιση της π.ε παρατηρούνται μικροριγματώσεις αλλά και μεγάλη τραχύτητα επιφάνειας της ακμής λόγω μηχανουργικής κατεργασίας (Εικόνα 7.10), αποτέλεσμα των κρουστικών φορτίων στα οποία υποβάλλεται η ακμή κατά την λειτουργία της. Η κακή ποιότητα επιφάνειας στην ακμή επιτείνει το πρόβλημα των θραύσεων και μειώνει σημαντικά το χρόνο λειτουργίας του εξαρτήματος λόγω φθοράς.

Κατά την απεικόνιση της π.θ εκλεπίσεις εμφανίζονται κατά μήκος της ακμής οι οποίες συσχετίζονται με την ψαθυρότητα της επιφάνειας της ακμής του εξαρτήματος. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η μηχανουργική κατεργασία κατά το στάδιο της κατασκευής του εξαρτήματος είναι εξόχου σημαντικότητας, για τον λόγο αυτόν απαιτούνται στενές ανοχές διαστάσεων, ποιότητα επιφάνειας πλευρών και συγκεκριμένες γεωμετρίες σε επιφάνειες του εξαρτήματος. Γενικότερα, στο συγκεκριμένο εξάρτημα παρατηρούνται ατέλειες γεωμετρίας κατά την μηχανουργική διαδικασία (εικόνα 7.12).



Εικόνα 7.13: Περιοχή διαμόρφωσης – κεφαλή σιαγόνας (AP) – συναρμολόγηση 1st Attempt. (30x Μεγέθυνση).

Το πρόβλημα είναι ακόμα μεγαλύτερο στο (AP) εξάρτημα του συναρμολογήματος, αφού παρατηρείται ολική θραύση της ακμής διαμόρφωσης του μεταλλικού ελάσματος. Αυτή η θραύση ωφελείται στην άνιση κατανομή της φόρτισης του εξαρτήματος (κρουστικά φορτία) που προέρχεται από την λανθασμένη συναρμογή των κινούμενων μερών σε σχέση με το διαμορφούμενο έλασμα. Η έναρξη της θραύσης βρίσκεται εντός της αυλάκωση σε σημείο που ευνοεί την ανάπτυξη υψηλών τάσεων (ελλείψεις καμπύλη) κατά την λειτουργία (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.13). Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση παρατηρείται πως η έναρξη της θραύσης βρίσκεται ανάμεσα στις δυο ακμές (Εικόνα 7.14) με ανάποδο τόξο καμπυλότητας. Στην περιοχή δημιουργίας της εφελκυστικής ίνας απεικονίζονται αποκολλήσεις και μικροριγματώσεις.

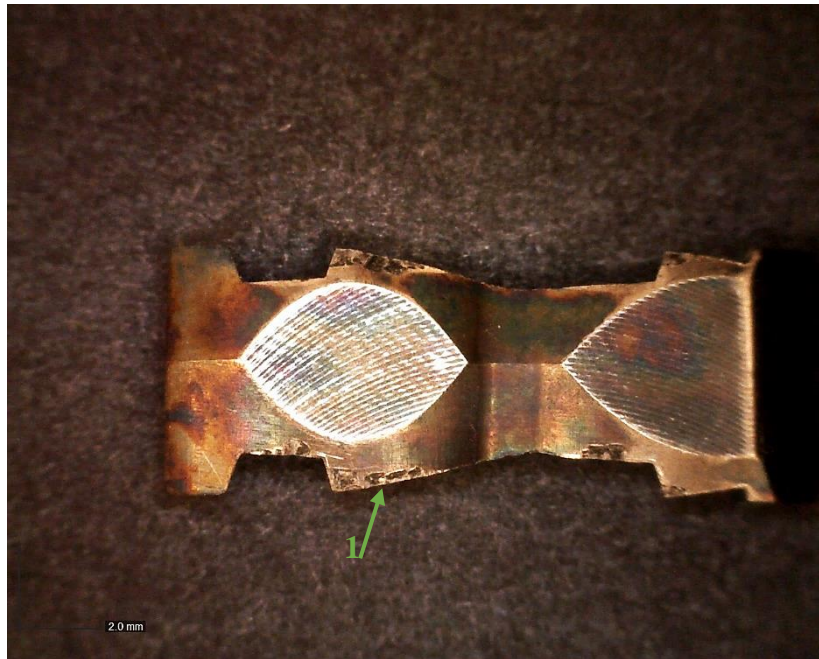


Εικόνα 7.14: Περιοχή θραύσεως – κεφαλή σιαγόνας (AP) – συναρμολόγημα 1st Attempt (60x μεγέθυνση).



Εικόνα 7.15: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας εφελκυστικής ίνας – συναρμολόγημα 1st (230x μεγέθυνση).

Στο συγκεκριμένο συναρμολόγημα διατίθεται σταθερό εξάρτημα (Εικόνα 7.15) το οποίο είναι και σταθερό κομμάτι της συναρμογής και παίζει βασικότατο ρόλο στην μορφοποίηση του μεταλλικού ελάσματος και στην εξόλκευση αυτού.



Εικόνα 7.16: Σταθερό εξάρτημα διαμόρφωσης – γενική άποψη - συναρμολόγηση 1st Attempt. (20x Μεγέθυνση).

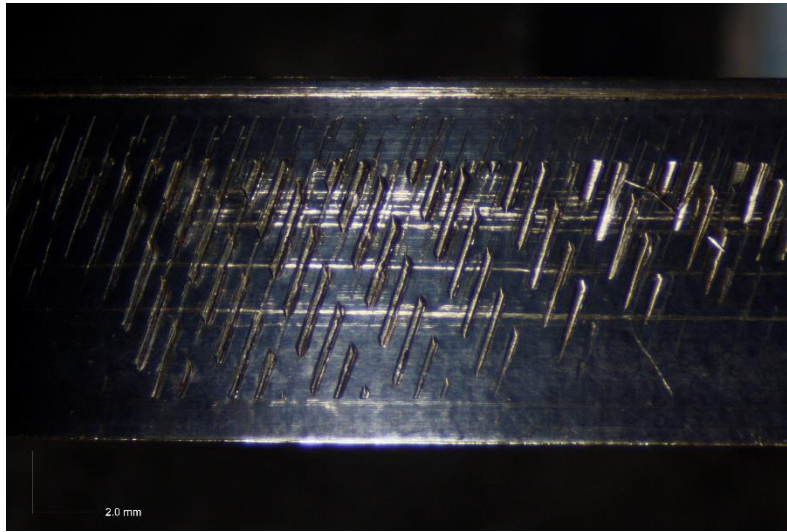
Στο σταθερό μέρος εμφανίζονται σημάδια καταπόνησης και αποκολλήσεις στην επιφάνεια του σε συγκεκριμένα σημεία που υπάρχουν ακμές (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.16). Σε μεγέθυνση απεικονίζονται τα σημεία αποκόλλησης αλλά και η ύπαρξη μικροθραύσεων. Εκτιμάται ότι η συνένωση τους οδηγεί σε αποκολλήσεις, ενδεικτικό κακής συναρμογής και χαμηλής δυσθραυστότητα του χάλυβα κατασκευής.



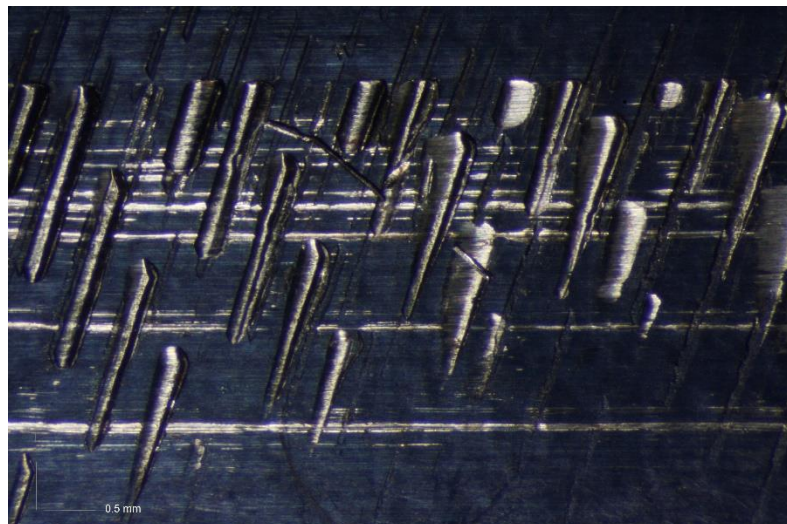
Εικόνα 7.17: Σταθερό εξάρτημα διαμόρφωσης – απεικόνιση αποκολλήσεων και θραύσεων στην ακμή λειτουργίας 1st Attempt. (60x Μεγέθυνση).

Είναι πιθανόν λόγο κακής ευθυγράμμισης να υπήρχε επαναλαμβανόμενη κρούση μεταξύ των τριών κομματιών της συναρμογής. Έτσι λοιπόν αντί να έχουν πλήρη επαφή με το μεταλλικό έλασμα, σε μερικά σημεία υπήρχε επαφή μεταξύ τους. Αυτό σε συνδυασμό με την χαμηλή δυσθραυστότητα της επιφανείας οδήγησε στην εκλέπιση και στην ρηγματώδη των ακμών των εξαρτημάτων.

Μαζί με το συναρμολόγημα του 1st Attempt υποβλήθηκε σε στερεοσκοπική ανάλυση και το μεταλλικό έλασμα (A) που χρησιμοποιούνταν την δεδομένη χρονική στιγμή.



Εικόνα 7.18: Απεικόνιση παραμορφώσεων στο μεταλλικό έλασμα (A) - συναρμολόγημα 1st Attempt. (20x Μεγέθυνση).



Εικόνα 7.19: Απεικόνιση παραμορφώσεων στο μεταλλικό έλασμα (A) - συναρμολόγημα 1st Attempt. (60x Μεγέθυνση).

Στο μεταλλικό έλασμα (A) παρατηρούνται σε όλη την επιφάνεια του πλαστικές παραμορφώσεις οι οποίες έχουν γίνει από αντίστοιχο μηχανήμα ενώ, πιθανά μπορεί να έχουν και προωθητικούς λόγους. Δεδομένου ότι υπάρχουν αυστηρές ανοχές και διαστάσεις η κακή ευθυγράμμιση του ελάσματος έχει ως αποτέλεσμα το τελευταίο να έρχεται ενδεχομένως σε επαφή με τα ράουλα κύλισης. Η επαφή αυτή δημιουργεί δυνάμεις τριβής οι οποίες προκαλούν την παραμόρφωση της επιφάνειας του.

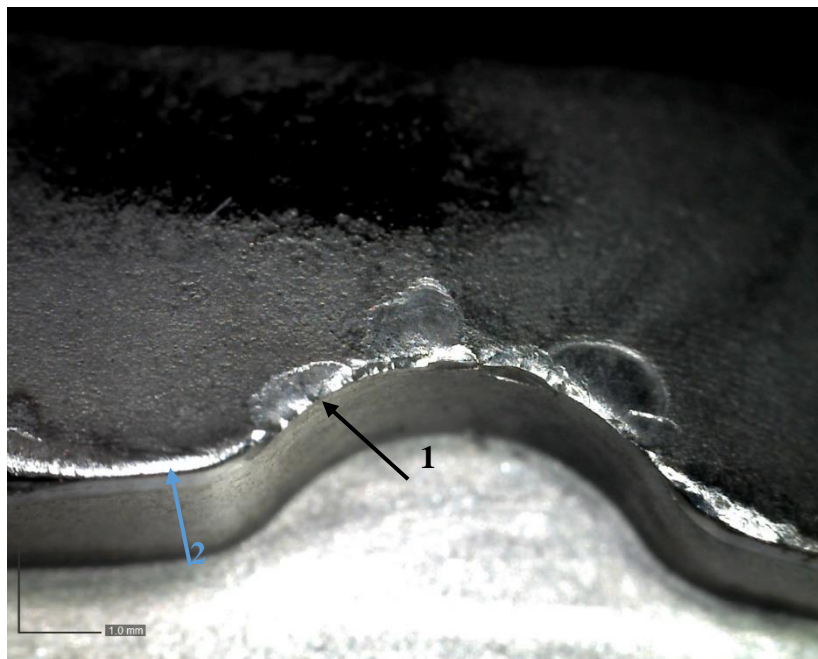
7.1.3 N



Εικόνα 7.20: Περιοχή διαμόρφωσης – κεφαλή σιαγόνας (AP) – συναρμολόγημα N (20x μεγέθυνση).

Σύμφωνα με το ιστορικό του συναρμολογήματος από λανθασμένο σχεδιασμό έχει υποστεί εναζώτωση χωρίς πρώτα να έχει υποβληθεί σε θερμική κατεργασία σκλήρυνσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι να παρουσιάζει μεγάλη διαφορά σκληρότητας μεταξύ της επιφάνειας και του πυρήνα. Η πληροφορία αυτή θα τεκμηριωθεί κατά την δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης όπου θα υπάρξει σαφής εικόνα για την σκληρότητα του εξαρτήματος. Παρατηρούνται εκλεπίσεις (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.21) και στρογγύλεμα στην ακμή του εργαλείου (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 7.21), ενδεικτικό ψαθυρότητας αλλά και εφαρμογής υψηλών δυνάμεων τριβής κατά τη λειτουργία του. Στη συγκεκριμένη επιφάνεια θραύσης παρατηρούνται δυο διαφορετικές περιοχές. Στις δυο περιοχές της εφελκιστικής ίνας διαπιστώνεται κυρίως φθορά, ενώ στην περιοχή της θλιπτικής ίνας υπάρχουν κυρίως εκλεπίσεις. Απεικονίζεται επίσης πίστα φθοράς

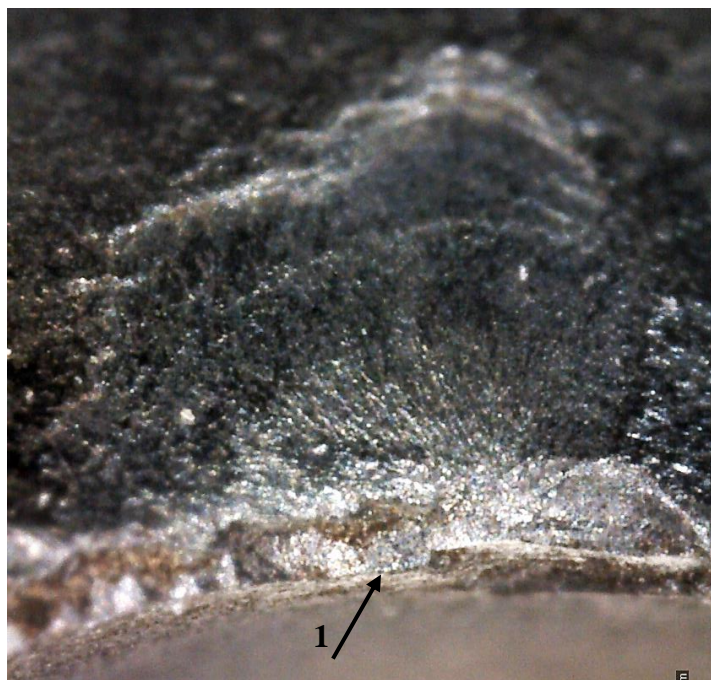
στην επιφάνεια επαφής μεταξύ του μ.ε. και του εξαρτήματος ενδεικτικό ύπαρξης επαφής λόγω κακής συναρμογής. Η επιφάνεια της αύλακας έχει πολύ μεγάλη τραχύτητα μετά από τη μηχανουργική κατεργασία γεγονός που επιδεινώνει (μεγαλώνει) το συντελεστή τριβής μεταξύ εργαλείου και μ.ε.



Εικόνα 7.21: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχές δημιουργίας εφελκυστικής και θλιπτικής ίνας – συναρμολόγημα (60x μεγέθυνση).

Όπως ήταν αναμενόμενο οι εκλεπίσεις έχουν και εδώ την ίδια μορφή. Απεικονίζεται η έναρξη της θραύσης (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.22) η οποία εξελίσσεται με την απομάκρυνση υλικού σχηματίζοντας εάν ημικύκλιο στην ακμή διαμόρφωσης του εξαρτήματος. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου κατά τη λειτουργία, συγκεντρωμένα φορτία έχουν ασκηθεί σε γειτονικά σημεία πάνω στην ακμή δημιουργώντας εκτεταμένες περιοχές απομάκρυνσης υλικού (Εικόνα 7.23). Η μορφή των εκλεπίσεων (chipping) είναι η ίδια έχοντας αυτό το συγκεκριμένο σχήμα. Είναι ο μηχανισμός θραύσης κατά τον οποίο ένα μεταλλικό τεμάχιο θρυμματίζεται σε μορφή φλούδας και μπορεί να ωφελείται σε πολλές αιτίες με βασικότερη την επαναλαμβανομένη κρούση. Επίσης είναι χαρακτηριστικό αστοχιών όπου έχει επιλεχθεί λανθασμένο υλικό το οποίο διαθέτει χαμηλή δυσθραυστότητα. Για παράδειγμα όταν δυο μεταλλικές πλάκες συγκρούονται παράγουν κρουστικά κύματα, γνωστά και ως κύματα συμπίεσης τα οποία ανακλώνται πάνω στις ίδιες τις πλάκες. Τα κύματα αυτά δρουν ακόμα πιο σοβαρά πάνω σε επιφάνειες και ακμές στις οποίες υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Εμφανίζεται συνήθως σε σημεία στα οποία υπάρχουν μεταλλικές αρθρώσεις

ή κινούμενα μεταξύ τους μέρη καθώς και σε σημεία ρωγμών στα οποία οι τάσεις είναι υψηλές και κατά τη λειτουργία του εξοπλισμού εμφανίζονται οι μέγιστες διατμητικές τάσεις [50]. Με βάση την πληροφορία του χρήστη, η πολύ μεγάλη διαφορά σκληρότητας πυρήνα – επιφάνειας λόγω εναζώτωσης, δημιουργεί προϋπόθεση για την “glass on snow” θραύση στις ακμές διαμόρφωσης κατά την λειτουργία της μηχανής [51].

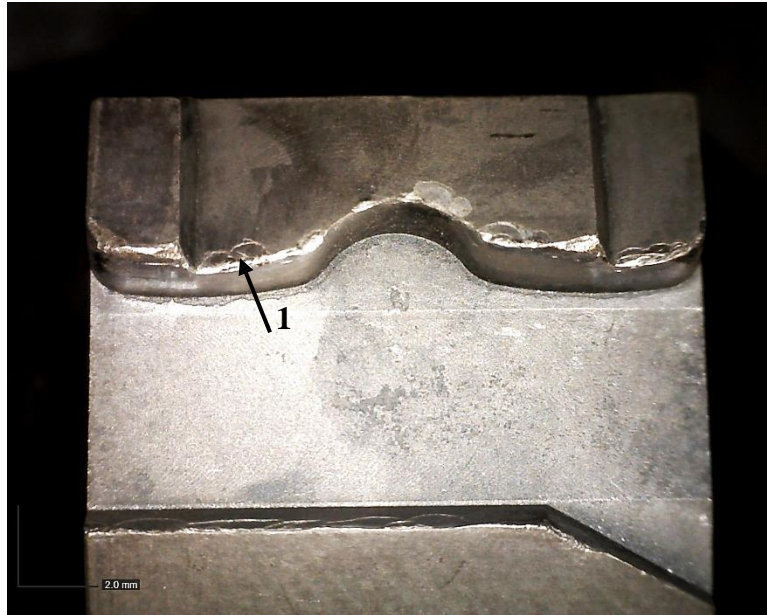


Εικόνα 7.22: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – δημιουργίας θλιπτικής ίνας, έναρξη και εξέλιξη θραύσης – συναρμολόγημα N (230x μεγέθυνση).



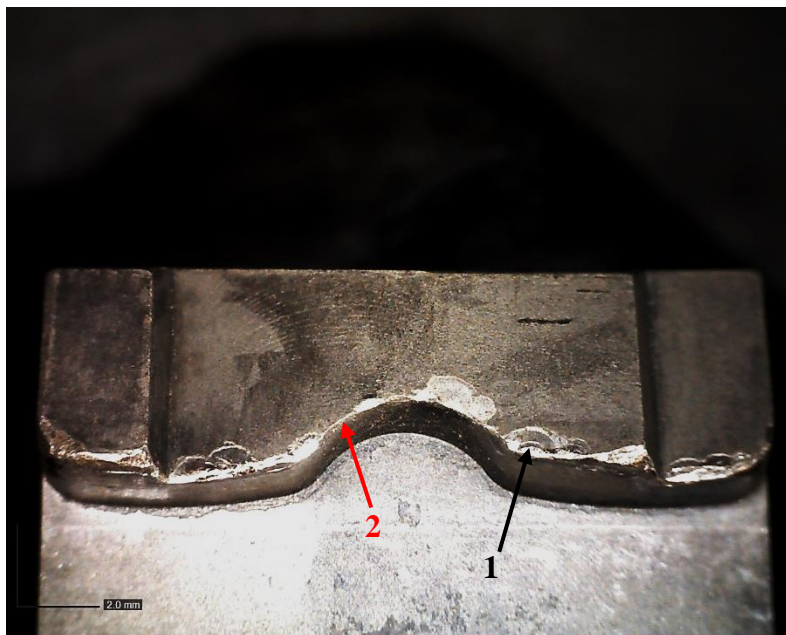
Εικόνα 7.23: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – δημιουργίας εφελκιστικής ίνας, γειτονικά σημεία φθοράς – συναρμολόγημα N (230x μεγέθυνση).

7.1.4 QT+N1



Εικόνα 7.24: Περιοχή διαμόρφωσης - κεφαλή σιαγονας (ΔΕ) - συναρμολόγημα QT+N1 (20x Μεγέθυνση).

Στο συγκεκριμένο συναρμολόγημα δηλώνεται ότι έχει γίνει θερμική κατεργασία βαφής και επαναφοράς και αμέσως μετά έχει γίνει επιφανειακή σκλήρυνση με εναζώτωση. Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν εκλεπίσεις (λεπτομέρεια 1, Εικόνες 7.24 και 7.25), σε όλο το μήκος της ακμής διαμόρφωσης.



Εικόνα 7.25: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχές δημιουργίας εφελκιστικής και θλιπτικής ίνας – συναρμολόγημα QT+N1 (30x μεγέθυνση).



Εικόνα 7.26: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας εφελκιστικής ινας – συναρμολόγημα QT+N1 (60x μεγέθυνση).

Επισημαίνεται ότι υπάρχουν σημεία κατά μήκος της ακμής διαμόρφωσης τα οποία φαίνονται να μην έχουν υποστεί κάποια παραμόρφωση ή θραύση (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 7.25). Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση της περιοχής αυτής παρατηρείται πως η πλευρά παρουσιάζει εκτενείς ριγματώσεις και αποκολλήσεις έχοντας χάσει πλήρως το αρχικό της σχήμα (Εικόνα 7.27). Οι εκλεπίσεις είναι το αποτέλεσμα εφαρμογής συγκεντρωμένου φορτίου κατά την λειτουργία σε περιοχές με ή χωρίς αποκολλήσεις, αλλά ωφελείται κυρίως στην χαμηλή δυσθραυστότητα που παρουσιάζει συνεργατικά η βαφή και η επιφανειακή σκλήρυνση. (εικόνα 7.28).



Εικόνα 7.27: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – αλλοίωση της επιφάνειας κατά μήκος της ακμής – συναρμολόγημα QT+N1 (210x μεγέθυνση).



Εικόνα 7.28: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας εφελκιστικής ινας – συναρμολόγημα QT+N1 (190x μεγέθυνση).

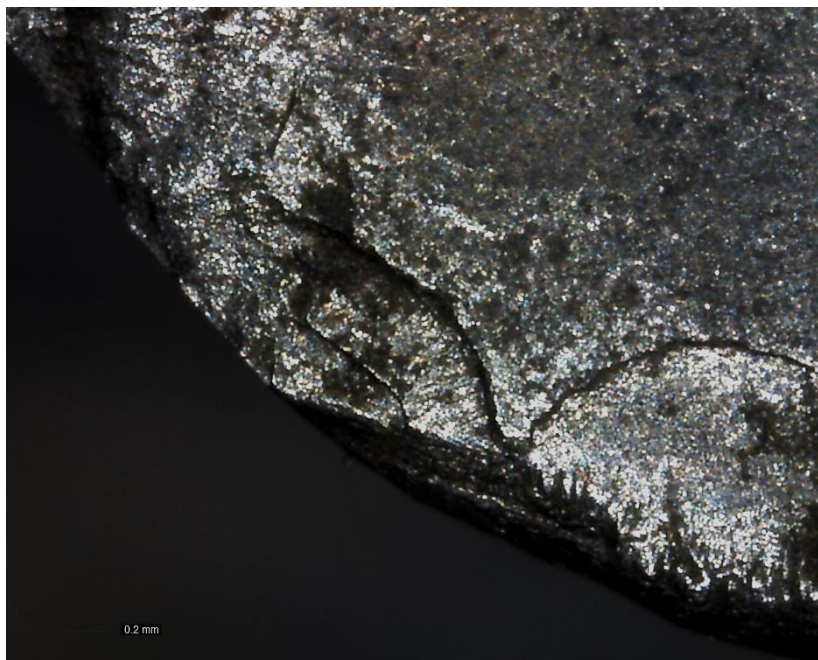


Εικόνα 7.29: Περιοχή διαμόρφωσης – κεφαλή σιαγόνας (ΔΕ) - συναρμολόγημα QT+N1 (30x μεγέθυνση)

Παρατηρείται και εδώ εκτεταμένη εκλέπιση. Αυτό ωφελείται στο γεγονός ότι η εναζώτωση είναι ακατάλληλη για την συγκεκριμένη εφαρμογή λόγω της πολύ υψηλής σκληρότητας και ψαθυρότητα που αποκτά η επιφάνεια ειδικά σε αυτούς τους εργαλειοχάλυβες. Όπως προαναφέρθηκε ακόμα και αν το εξάρτημα δεν εμφανίσει εκλέπιση σε κάποια σημεία της ακμής διαμόρφωσης, η επιφάνεια λόγω τη μικρής αντοχής σε κρούση παρουσιάζει ριγματώσεις και αποκολλήσεις με αποτέλεσμα την τελική της αλλοίωση πράγμα που παρατηρείται και στο δεύτερο κομμάτι (Εικόνα 7.29).



Εικόνα 7.30: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας θλιπτικής ινας – συναρμολόγημα QT+N1 (230x μεγέθυνση).



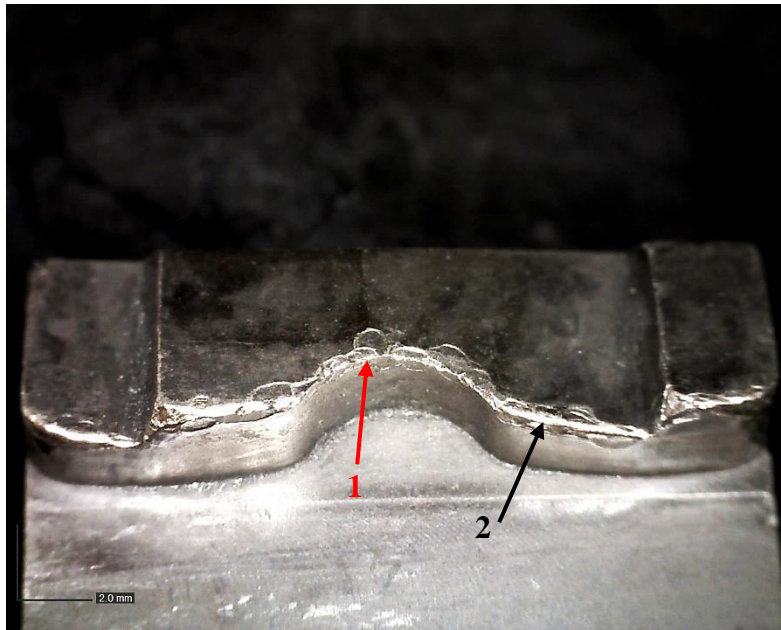
Εικόνα 7.31: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας εφελκιστικής ινας – συναρμολόγημα QT+N1 (230x μεγέθυνση).

7.1.5 QT+N2



Εικόνα 7.32: Περιοχη διαμορφωσης – κεφαλη σιαγονας (AP) – συναρμολογημα QT+N2 (20x Μεγέθυνση).

Αυτό το συναρμολόγημα έχει υποστεί βαφή και επαναφορά και κατόπιν εναζώτωση για την επιφανειακή του σκλήρυνση. Παρατηρούνται εκτεταμένες εκλεπίσεις κατά μήκος της ακμής διαμόρφωσης (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.33) καθώς και ρωγμές και σπασίματα (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 7.33).



Εικόνα 7.33: Περιοχή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχές δημιουργίας εφελκυστικής και θλιπτικής ίνας – συναρμοσμένο QT+N2 (30x Μεγέθυνση).



Εικόνα 7.34: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας θλιπτικής ίνας – συναρμολόγηση QT+N2 (60x Μεγέθυνση).

Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, απεικονίζονται οι εκλεπίσεις (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.34) και τα σπασίματα που υπάρχουν στην ακμή του εξαρτήματος όπου και σε αυτή την περίπτωση σχετίζονται: α) με τα εφαρμοζόμενα κρουστικά φορτία πάνω στο μ.ε., β) με την ευθυγράμμιση όλης της συναρμογής καθώς και γ) με τις απαιτήσεις που θα πρέπει να υπάρχουν για ενός τέτοιου είδους διαμόρφωσης.



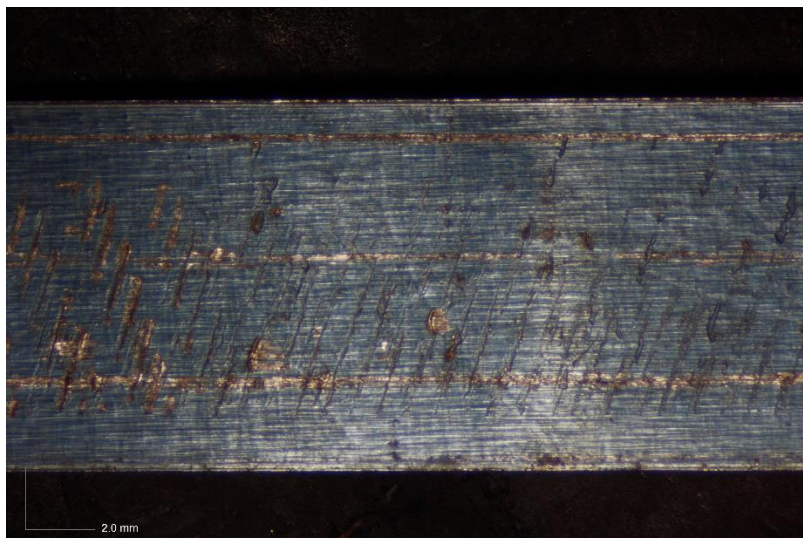
Εικόνα 7.35: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας θλιπτικής ίνας, λεπτομέρεια 1 εικόνας 7.34 – συναρμολόγημα QT+N2 (230x μεγέθυνση).



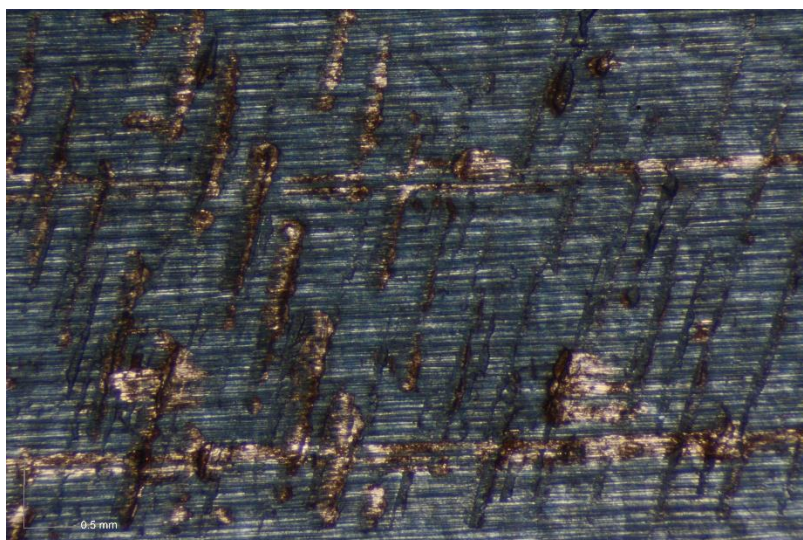
Εικόνα 7.36: Ακμή διαμόρφωσης εργαλείου – περιοχή δημιουργίας εφελκιστικής ίνας – συναρμολόγημα QT+N2 (230x μεγέθυνση).

Στην ακμή διαμόρφωσης, ταυτόχρονα με τις εκλεπήσεις παρατηρούνται ριγματώσεις (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 7.39) οι οποίες έχουν συμβεί και αυτές από την διαφορά σκληρότητας και την επαναλαμβανομένη καταπόνηση του εξαρτήματος.

Μαζί με το συναρμολόγημα του QT+N2 υποβλήθηκαν σε στερεοσκοπική ανάλυση και τα μεταλλικά ελάσματα (B), (Γ).



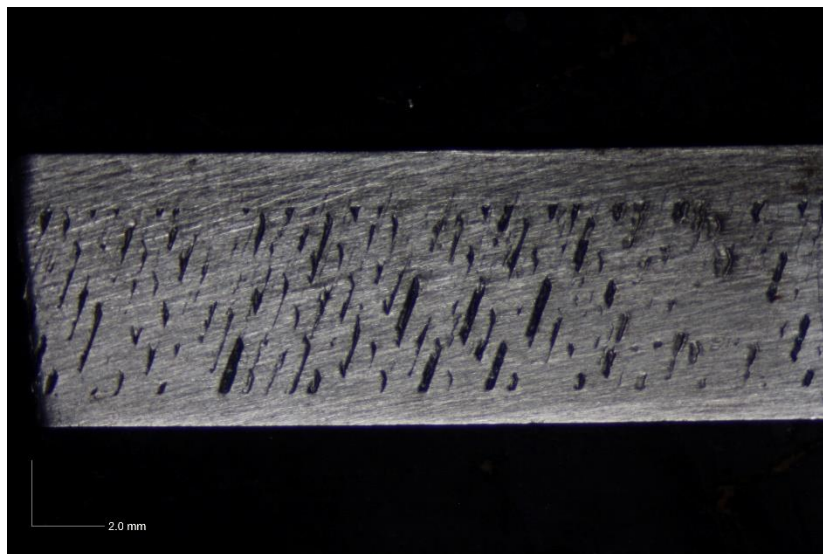
Εικόνα 7.37: Απεικόνιση παραμορφώσεων στο μεταλλικό έλασμα (B) - συναρμολόγημα QT+N2. (20x Μεγέθυνση).



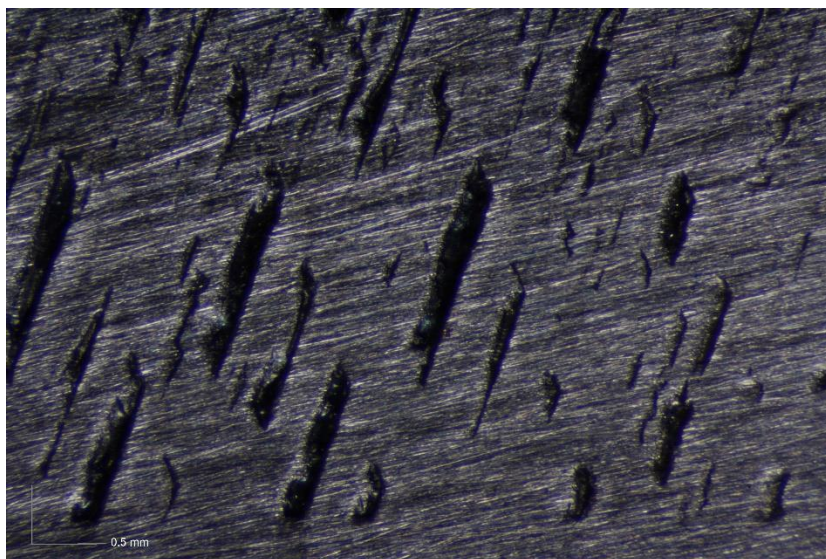
Εικόνα 7.38: Απεικόνιση παραμορφώσεων στο μεταλλικό έλασμα (B) - συναρμολόγημα QT+N2. (60x Μεγέθυνση).

Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται παραμορφώσεις στην επιφάνεια του μεταλλικού ελάσματος (Εικόνες 7.37 και 7.38). Αυτό πιθανά να δημιουργείται κατά την διέλευση του ελάσματος μέσα από την μηχανή ή να γίνεται σε προηγούμενη φάση κατεργασίας του μ.ε. Στα σημεία στα οποία έχουν δημιουργηθεί παραμορφώσεις εντοπίζεται έντονη διάβρωση. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση του μεταλλικού ελάσματος (Γ). Στην επιφάνεια παρατηρούνται παραμορφώσεις λόγω της κακής ευθυγράμμισης και ανοχών που υπάρχουν κατά την λειτουργία (Εικόνα 7.39). Επίσης παρατηρείται ότι η επιφάνεια του μ.ε. (Γ) έχει υποστεί λείανση. Στην περίπτωση του

μ.ε (Α) και (Β) ο χρωματισμός της εξωτερικής επιφάνειας παραπέμπει σε κάποια κατεργασία παθητικοποίησης του προκειμένου να υπάρχει αντοχή στην διάβρωση.



Εικόνα 7.39: Απεικόνιση παραμορφώσεων στο μεταλλικό έλασμα (Γ) - συναρμολόγημα QT+N2. (20x Μεγέθυνση).



Εικόνα 7.40: Απεικόνιση παραμορφώσεων στο μεταλλικό έλασμα (Γ) - συναρμολόγημα QT+N2. (60x Μεγέθυνση).

7.2 Συμπερασματικά

Η περιοχή της ακμής διαμόρφωσης του μεταλλικού ελάσματος υπόκεινται σε συνθέτες καταπονήσεις λόγω της φύσης της μορφοποίησης, των διαστασιακών απαιτήσεων και των απαιτήσεων κατά την συναρμολόγηση (ευθυγράμμιση).

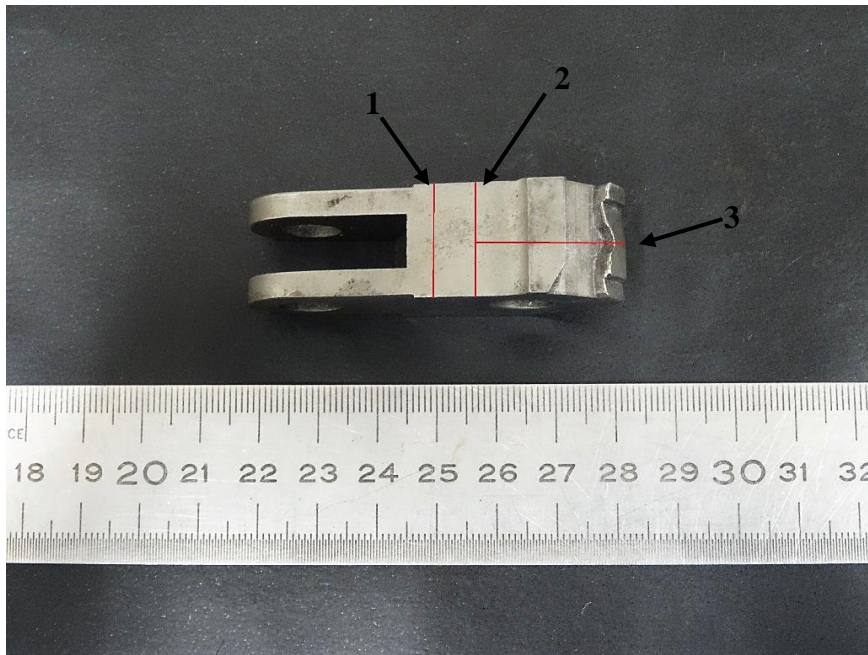
Οι επιφάνειες θραύσης στα πέντε διαφορετικά εξαρτήματα μπορούν να χωριστούν ουσιαστικά σε τρεις κατηγορίες με βάση κοινά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν. Έτσι στο συναρμολόγημα του Parent Assembly παρουσιάζεται εκτενής φθορά σε όλη την επιφάνεια της ακμής διαμόρφωσης, η οποία έχει προέλθει από συνδυασμό ριγματώσεων και πλαστικής παραμόρφωσης. Το εξάρτημα αναμένεται να παρουσιάσει πολύ σύντομο χρόνο λειτουργίας. Το 1st Attempt παρουσιάζει ολική θραύση στο ένα εξάρτημα και εκλεπίσεις στην ακμή διαμόρφωσης χωρίς εμφανείς περιοχές πλαστικής παραμόρφωσης. Η αστοχούμενη επιφάνεια της ακμής παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά. Το ίδιο συμβαίνει και με το τρίτο σταθερό εξάρτημα της βάσης. Τα N, QT+N1, QT+N2, παρουσιάζουν εκλεπίσεις, αποκολλήσεις, και ριγματώσεις στην επιφάνεια της ακμής διαμόρφωσης. Στις περιπτώσεις των QT+N1, QT+N2 οι εκλεπίσεις εκτείνονται στις περιοχές θλιπτικών και εφελκυστικών ινών, ενώ στην περίπτωση του N οι εκλεπίσεις περιορίζονται στην περιοχή της θλιπτικής ίνας. Η ανάλυση των θραύσεων των επιφανειών της ακμής όλων των περιπτώσεων δείχνει ότι έχουν λάβει χώρα θραύσεις οφειλόμενες σε πλαστική παραμόρφωση και ψαθυρότητα.

8 Προετοιμασία δοκιμίων για κοπή

Οι καταστρεπτικές δοκιμές που θα πραγματοποιηθούν κατά την μελέτη αστοχίας είναι: δοκιμή μικροσκληρότητας, χημική ανάλυση του υλικού και μικροσκοπική ανάλυση μέσω οπτικού μεταλλογραφικού μικροσκοπίου. Για τη μελέτη αυτή θα επιλεγεί από κάθε συναρμολόγημα ένα κινούμενο εξάρτημα, όπου από το οποίο θα προκύψει ένας αριθμός δειγμάτων για κάθε περίπτωση.

8.1 Επιλογή δειγμάτων

Για τον λόγο ότι όλα τα δείγματα έχουν την ίδια σχεδόν γεωμετρία. Σε ένα κομμάτι από κάθε σετ θα γίνουν δυο και τρεις κοπές αντίστοιχα αν αυτό έχει υποστεί ή όχι εναζώτωση (Εικόνα 8.1) .



Εικόνα 8.1: Αναπαράσταση κοπών για κάθε κομμάτι .(1) κοπή νούμερο 1, (2) κοπή νούμερο 2, (3) κοπή νούμερο 3.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.1 θα γίνουν δυο διαδοχικές κοπές σε ένα κομμάτι από κάθε συναρμολόγημα. Οι πρώτες κοπές που θα γίνουν θα είναι κοινές σε κάθε κομμάτι και θα είναι η κοπή νούμερο 1 (λεπτομέρεια 1, Εικόνα 8.1) και η κοπή νούμερο 2 (λεπτομέρεια 2, Εικόνα 8.1). Σε όσα κομμάτια υπάρχει η πληροφορία ότι έχουν υποστεί εναζώτωση θα γίνει και μια τρίτη κοπή (λεπτομέρεια 3, Εικόνα 8.1) προκειμένου να μελετηθεί το προφίλ εναζώτωσης στην τομή του τεμαχίου. Πριν την κοπή κρίθηκε αναγκαίο να δοθεί σε κάθε κομμάτι του κάθε συναρμολογήματος ένας αύξοντας

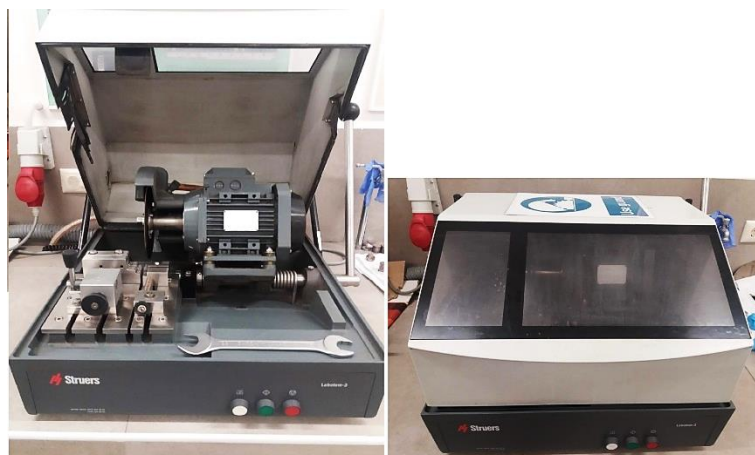
αριθμός (πίνακας 8.1) ο οποίος θα αποτελεί και την ιχνηλασιμότητα του μέχρι το τέλος της διαδικασίας.

Πίνακας 8.1: Αύξοντας αριθμός δοκιμών

Όνομα Σετ	α/α	
1st attempt	1	
	2	
N	3	3.1
	4	
Parent	5	
	6	
QT+N1	7	7.1
	8	
QT+N2	9	9.1
	10	

Στα αριστερή πλευρά του πίνακα βρίσκονται οι ονομασίες του κάθε συναρμολογήματος ενώ η μεσαία στήλη αφορά όλα τα εξαρτήματα που υπάρχουν και τον αύξοντα αριθμό τους από το ένα έως και το 10. Οι αριθμοί οι οποίοι έχουν την κόκκινη σήμανση είναι τα κομμάτια τα οποία αποφασίστηκε να κοπούν. Έτσι λοιπόν για παράδειγμα από το συναρμολόγημα του parent assembly θα κοπεί το ένα κομμάτι και θα προκύψει ένα δοκίμιο με μοναδιαίο αριθμό, το δοκίμιο 1 κ.ο.κ. Στην περίπτωση των συναρμολογημάτων QT+N2, QT+N1 και N θα προκύψουν δυο δοκίμια από κάθε κομμάτι διότι έχουν υποστεί εναζώτωση. Έτσι λοιπόν για παράδειγμα στο συναρμολόγημα του N θα γίνουν δυο κοπές από τις οποίες θα προκύψει ένα δοκίμιο με μοναδιαίο αριθμό το 3 και αμέσως μετά θα γίνει άλλη μια κοπή από την οποία θα προκύψει άλλο ένα δοκίμιο το 3.1 κ.ο.κ.

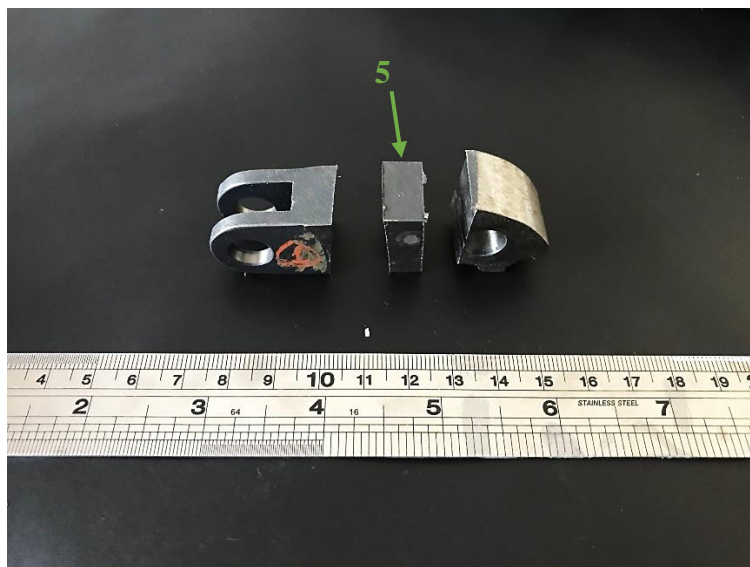
Όλα τα δοκίμια κόπηκαν μέσα στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Χρησιμοποιήθηκε κοπτικό παραγωγής δειγμάτων της εταιρίας Struers Lobotom – 3, type: 05326146, Serial/No: 5321698 ενώ το μοτέρ που χρησιμοποιεί ανήκει στην ABS MOTORS No: 80709893/6, Classification: F (εικόνα 8.2). Κατά την κοπή χρησιμοποιήθηκε διάλυμα απιονισμένου νερού με ψυκτικό μέσο της ίδιας εταιρείας.



Εικόνα 8.2: Μηχάνημα κοπής Struers Lobotom-3 στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών.

8.1.1 Parent Assembly

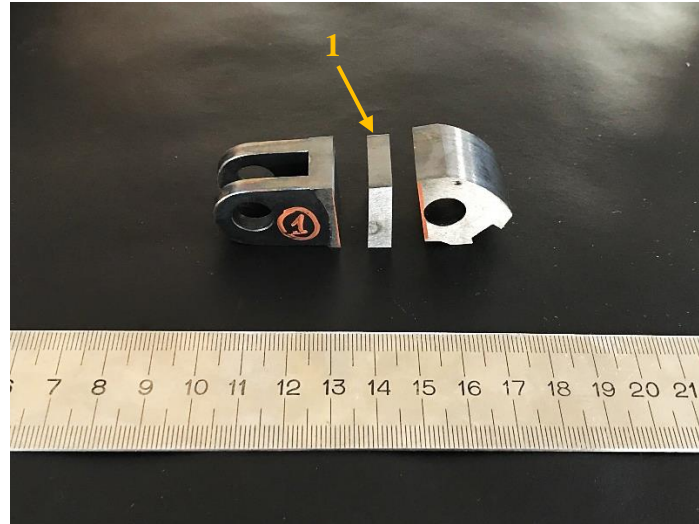
Όπως και στο 1st attempt έτσι και σε αυτή την περίπτωση θα γίνουν δυο κοπές θα προκύψει ένα δοκίμιο προς εξέταση με μοναδιαίο αριθμό 5 (εικόνα 8.5). Το δοκίμιο αυτό θα εξεταστεί ως προς την σκληρότητα του και την μικροδομή του με οπτική μικροσκοπία.



Εικόνα 8.3: Κοπές για το συναρμολόγημα του Parent Assembly και δοκίμιο No 5.

8.1.2 1st attempt

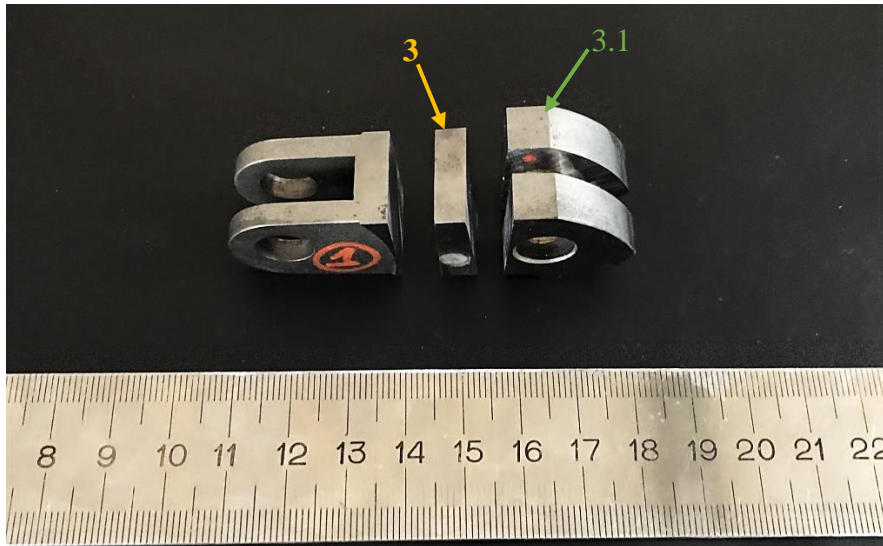
Στο συγκεκριμένο συναρμολόγημα έγιναν μόνο οι δυο πρώτες κοπές (εικόνα 8.1) δεδομένου ότι δεν έχει υποστεί εναζώτωση. Από τις κοπές αυτές προέκυψε ένα δοκίμιο με μοναδιαίο αριθμό 1, (Εικόνα 8.3) το οποίο θα εξεταστεί ως προς τη σκληρότητα και τη μικροδομή του.



Εικόνα 8.4: Κοπές στο συναρμολόγημα του 1st attempt και δοκίμιο 1.

8.1.3 N

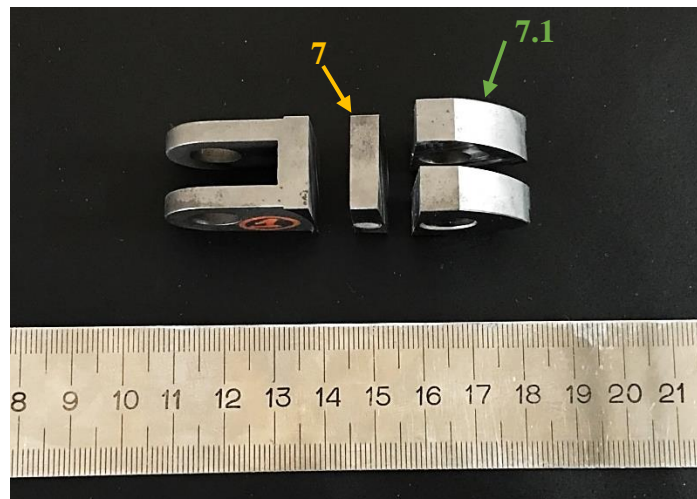
Το συγκεκριμένο είναι εκείνο το συναρμολόγημα που κατά την παραγωγική διαδικασία έγινε λάθος και υποβλήθηκε σε εναζώτωση χωρίς πρώτα να έχει υποστεί θερμική κατεργασία στην μάζα του, με αποτέλεσμα να έχει ένα πολύ μαλακό εσωτερικό και μια πολύ σκληρή. Έτσι λοιπόν από τις κοπές αυτές προέκυψαν δυο δοκίμια με μοναδιαίο αριθμό 3 και 3.1 τα οποία θα εξεταστούν αργότερα ως προς την σκληρότητα τους και την μικροδομή τους. Σε κάθε περίπτωση η τρίτη κοπή έγινε ώστε να εξεταστεί στην τομή του δείγματος, η εκτενής εκλέπιση που εμφανίζεται στο μπροστινό του τμήμα όταν αυτό έχει υποστεί εναζώτωση.



Εικόνα 8.5: Κοπές στο συναρμολόγημα του N και δοκίμιο 3 και 3.1.

8.1.4 QT+N1

Από τις πληροφορίες που έχουμε για το συναρμολόγημα αυτό γνωρίζουμε ότι έχει υποστεί εναζώτωση, για τον λόγο αυτό θα γίνουν και σε αυτή την περίπτωση τρεις κοπές από τις οποίες θα προκύψουν δυο δοκίμια προς εξέταση με μοναδιαίο αριθμό 7 και 7.1. Τα δυο δοκίμια θα εξεταστούν ως προς την μικροδομή τους, την σκληρότητα τους και ως προς την εκλέπιση της ακμής διαμόρφωσης.

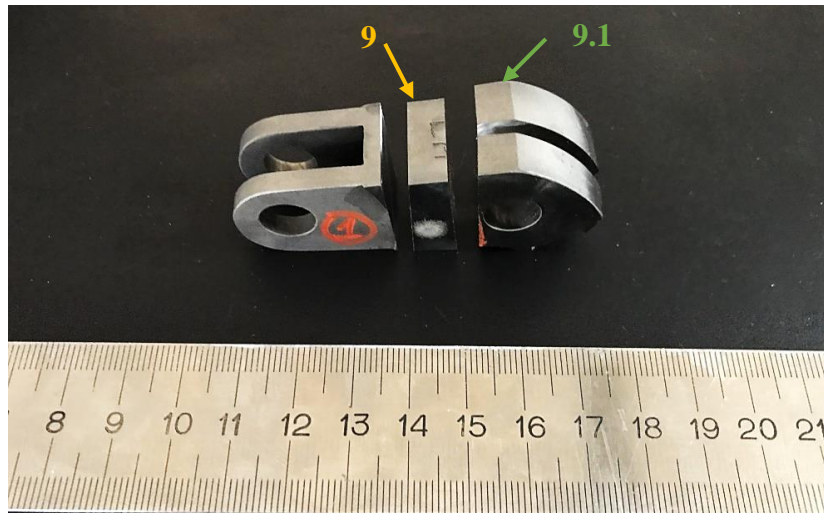


Εικόνα 8.6: Κοπές για το συναρμολόγημα του QT+N1 και δοκίμια 7 και 7.1.

8.1.4 QT+N2

Το συγκεκριμένο συναρμολόγημα έχει υποστεί εναζώτωση οπότε θα χρειαστεί να εξεταστεί το προφίλ της εναζώτωσης κατά την οπτική μικροσκοπία, για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν τρεις κοπές. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις

εναζώτωσης έτσι και εδώ θα γίνουν τρεις κοπές και θα προκύψουν δυο δοκίμια 9 και 9.1 αντίστοιχα προς εξέταση.



Εικόνα 8.7: Κοπές για το συναρμολόγημα του QT+N2 και δοκίμια 9 και 9.1.

9. ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Σε κάθε κομμάτι που επιλέχθηκε να κοπεί από κάθε συναρμολόγημα έγινε χημική ανάλυση προκειμένου να τακτοποιηθεί ο χάλυβας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του. Τα δείγματα που επιλέχθηκαν για χημική ανάλυση είναι τα 1, 3, 5, 7, 9. Όσον αφορά τα δείγματα 3, 7, 9 τα οποία αφορούν τα σετ QT+N2, QT+N1 και N αντίστοιχα γνωρίζουμε από το ιστορικό τους ότι έχει χρησιμοποιηθεί ο χάλυβας UNIMAX της εταιρία UDDEHOLM το οποίο θα επαληθευθεί και κατά την χημική ανάλυση των δειγμάτων.

Η μελέτη της χημικής ανάλυσης έγινε στην εταιρία SPECTRUM LABS S.A. στο τμήμα των μεταλλουργικών δοκιμών υπό τις οδηγίες της Κας. Κουκούλη Μαριάννας. Χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος ατομικής εκπομπής (Atomic Emission Spectroscopy) τύπου GNR MetaLAB 75-80J AES ενώ όλες οι χημικές αναλύσεις που έγιναν και η διαδικασία που ακολουθήθηκε έγινε βάση προδιαγραφών [44].

Πίνακας 9.1: Χημική ανάλυση δειγμάτων

Specimen	1st attempt (1)	N (3)	Parent (5)	QT+N1 (7)	QT+N2 (9)
Element (%)					
C	0.85	0.50	0.50	0.413	0.342
Si	0.259	0.176	0.302	0.164	0.155
Mn	1.84	0.499	0.48	0.427	0.424
P	0.019	0.013	0.027	0.013	0.013
S	0.012	0.0036	0.0053	0.0026	0.0029
Cr	0.272	5.15	1.97	5.07	5.09
Ni	0.014	0.092	1.76	0.071	0.073
Mo	0.016	2.22	0.095	2.22	2.22
Al	0.01	0.026	0.021	0.019	0.024
Cu	0.031	0.114	0.11	0.054	0.055
Co	<0.0010	0.022	0.015	0.02	0.021
Ti	0.0011	0.0023	0.0032	0.002	0.002
Nb	<0.0010	0.0083	<0.0010	0.0074	0.0072
V	0.064	0.55	0.0072	0.52	0.52
W	0.038	0.043	0.06	0.038	0.041
Sn	0.0043	0.0052	0.0078	0.0025	0.0021
Zr	<0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015	<0.0015
Ta	<0.0070	<0.0070	<0.0070	<0.0070	<0.0070
Fe	96.5	89.6	94.5	90.0	90.0

9.1 Ταυτοποίηση του υλικού με βάση την χημική ανάλυση

Αμέσως μετά την χημική ανάλυση των δειγμάτων θα ακολουθήσει η ταυτοποίηση τους έτσι ώστε να βρεθεί και να επαληθευθεί σε ποια κατηγορία χάλυβα ανήκουν.

9.1.1 Parent Assembly (5).

Βάσει των αποτελεσμάτων του πίνακα 9.1 καταλήξαμε ότι το υλικό κατασκευής του δείγματος Νο 5 είναι ο χάλυβας 16444 κατά το Czech Standards Institute. Ο παρακάτω πίνακας 9.2 δείχνει τη τυπική σύσταση του χάλυβα σύμφωνα με τα πρότυπα AISI, DIN, BS και GB.

Πίνακας 9.2: Τυπική χημική σύσταση του χάλυβα 16444 κατά CSN

Element %	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	V	Mo
EN	0.30-0.38	0.50-0.80	Max 0.025	Max 0.035	Max 0.40	1.3-1.7	1.3-1.7	...	0.15-0.30
34CrNiMo6									
AISI	0.37-0.43	0.60-0.80	0.035	0.04	0.15-0.30	0.70-0.90	1.65-2.00	...	0.20-0.30
4340									
DIN	0.30-0.38	0.40-0.70	≤0.025	≤0.025	0.15-0.40	1.40-1.70	1.30-1.70	0.10-0.25	0.15-0.30
34CrNiMo6V									
BS	0.36-0.44	0.45-0.70	Max 0.35	Max 0.40	0.10-0.35	1.00-1.40	1.30-1.70	...	0.20-0.35
817M40									
GB/T	0.30-0.37	0.60-1.00	0.035	0.035	0.30-0.60	1.40-1.70	1.40-1.70	...	0.15-0.35
ZG34CrNiMo									

Ο 16444 κατά CSN είναι χυτοχάλυβας ελαφρά κραμματωμένοι χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ο οποίος περιέχει Χρώμιο (Cr), Νικέλιο (Ni), και Μολυβδαίνιο (Mo). Είναι γνωστό ότι έχει την δυνατότητα να αναπτύξει πολύ καλές μηχανικές αντοχές μετά την θερμική κατεργασία ενώ ταυτόχρονα διατηρεί πολύ καλή συμπεριφορά έναντι της κόπωσης. Είναι ένας ευρέως διαδεδομένος χάλυβας ο οποίος ανάλογα την θερμική του κατεργασία μπορεί να αναπτύξει διαφορετικές ιδιότητες πράγμα που τον καταστεί κατάλληλο για πολλές διαφορετικές εφαρμογές ενώ συνήθως χρησιμοποιείται μετά από σφυρηλάτηση. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές βρίσκουν έδαφος στην αεροπορική βιομηχανία όπως είναι η κατασκευή εξαρτημάτων για το σύστημα προσγείωσης των αεροπλάνων αλλά ακόμα και στη ναυτιλία όπως κατασκευή αξόνων, βιδών και κοχλιών για τους κινητήρες των πλοίων. [54]

9.1.2 1st Attempt (1)

Ο πίνακας 9.1 δείχνει τη χημική σύσταση όλων των δειγμάτων. Βάσει των αποτελεσμάτων εκτιμάται ότι το υλικό κατασκευής του δείγματος Νο1 είναι ο χάλυβας O2 ενώ ο πίνακας 9.3 δείχνει τη τυπική σύσταση του χάλυβα.

Πίνακας 9.3 Τυπική χημική σύσταση του χάλυβα O2 κατά ASTM A681

Element %	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Mo
EN	0.85-0.95	1.80-2.20	0.03	0.03	0.10-0.40	0.20-0.50	0.05-0.20	...
90MnCrV8								
AISI	0.85-0.95	1.40-1.80	0.03	0.03	Max 0.50	Max 0.50	Max 0.30	Max 0.30
O2								
DIN	0.85-0.95	1.80-2.20	0.03	0.03	0.10-0.40	0.20-0.50	0.05-0.20	...
ISO4957								
1.2842								
BS 4659	0.85-0.95	1.50-1.80	0.035	0.035	Max 0.40	...	Max 0.25	...
B02								
GB	0.85-0.95	1.70-2.00	0.03	0.03	Max 0.40	...	0.10-0.25	...
9Mn2V								

Ο O2 κατά ASTM είναι ένας χάλυβας εργαλείων βαφής σε λάδι και συνήθως εμπορεύεται στην ανοιχτή κατάσταση του και χαρακτηρίζεται από πολύ καλή ανθεκτικότητα. Έχει πολύ καλή αντίσταση στην τριβή και έχει την ιδιότητα να διατηρεί τις ακμές του ανέπαφες κατά την λειτουργία του ως κοπτικό εργαλείο. Η σκληρότητα του μπορεί να φτάσει έως και τα 63-65 HRC πράγμα που του επιτρέπει να έχει αρκετά καλή συμπεριφορά ως κοπτικό εργαλείο στην διαμόρφωση λαμαρινών έως 6mm ενώ η χρήση του στην βιομηχανία του πλαστικού και του χαρτιού είναι ευρέως διαδεδομένη [52]. Η τυποποίηση του κατά AISI είναι O2 ή T31502, κατά DIN είναι 90MnCrV8, κατά BS είναι B02 και το W. Nr του είναι 1.2842 [53].

9.1.3 Δείγμα N (3), QT+N1 (7), QT+N2 (9).

Τα συναρμολογήματα των QT+N2, QT+N1, N είναι γνωστό ότι έχουν κατασκευαστεί από τον χάλυβα UNIMAX της εταιρίας UDDEHOLM με την εξής τυπική χημική σύσταση (πίνακας 9.4). Πρόκειται για χάλυβα με κραματικές προσθήκες Χρωμίου (Cr), Μολυβδαίνιου (Mo) και Βαναδίου (V).

Πίνακας 9.4 Ονομαστική χημική σύσταση UDDEHOLM

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
UNIMAX	0.50	0.20	0.50	5.0	2.3	0.5

Ο UNIMAX είναι χάλυβας εργαλείων κατασκευασμένος με την μέθοδο ESR (Electroslag Remelting). Οι χάλυβες εργαλείων είναι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία. Η ύπαρξη κραματικών στοιχείων έχει ως

αποτέλεσμα την συσσώρευση πολλών ακαθαρσιών και ξένων σωματιδίων κατά την διαδικασία της παραγωγής τους. Έτσι λοιπόν για την βελτίωση της μικροδομής του χάλυβα απαιτείται η εφαρμογή της μεθόδου παρασκευής με τήξη σταγόνα – σταγόνα και διέλευση μέσω ηλεκτροαγώγιμης σκωρίας, Electroslag Remelting (ESR) κατά την οποία το κράμα του μετάλλου τήκεται ξανά με την διαφορά ότι αμέσως μετά γίνεται σταδιακός ελεγχόμενος ρυθμός στερεοποίησης πράγμα που βοηθά, στην ομοιομορφία της χημικής σύστασης και της κρυσταλλικής δομής. Έτσι λοιπόν ο συγκεκριμένος χάλυβας χαρακτηρίζεται από αντοχή συνδυασμένη με μεγάλη ολκιμότητα [55]. Η αντοχή του στην φθορά είναι πολύ καλή ενώ όσον αφορά τις θερμικές κατεργασίες χαρακτηρίζεται από ελάχιστες διαστασιακές μεταβολές, από μεγάλη σκληρότητα και αντοχή στην κόπωση σε μεγάλες θερμοκρασίες. Επίσης το τελικό προϊόν που θα προκύψει, έχει την ιδιότητα της στιλβωσιμότητας προκειμένου να επιτευχθεί η απαραίτητη ποιότητα επιφάνειας. Μερικές εφαρμογές του είναι η κατασκευή καλουπιών σε γραμμές παραγωγής για την κατασκευή πλαστικών και συνθετικών πλαστικών. Επίσης χρησιμοποιείται σε εν ψυχρώ εφαρμογές ως κοπτικό εργαλείο ή ως μέσο σφυρηλάτησης [56].

9.1.4 Μεταλλικά ελάσματα Α, Β, Γ.

Πίνακας 9.5: Χημική σύσταση μεταλλικών ελασμάτων

Specimen	A	B	Γ
Element (%)			
C	0.097	0.152	0.162
Si	0.02	0.036	0.039
Mn	0.374	0.249	0.251
P	0.012	0.014	0.015
S	0.012	0.0078	0.009
Cr	0.128	0.039	0.039
Ni	0.043	0.073	0.077
Mo	0.031	0.039	0.039
Al	0.041	0.039	0.041
Cu	0.034	0.174	0.168
Co	0.0072	0.012	0.012
Ti	0.0018	0.0018	0.0018
Nb	<0.0010	<0.0010	<0.0010
V	<0.0010	<0.0010	<0.0010
W	0.086	0.092	0.092
Sn	0.071	0.022	0.011
Zr	0.0074	0.079	0.0081
Ta	<0.0070	<0.0070	<0.0070
Fe	99.0	98.9	98.9

Τα μεταλλικά ελάσματα Β και Γ είναι από το ίδιο υλικό. Διαφοροποίηση παρουσιάζει το υλικό του μεταλλικού ελάσματος Α. Πρόκειται για έναν χάλυβα χαμηλού άνθρακα και χαμηλής κραμάτωσης. Είναι οι χάλυβες οι οποίοι ενδείκνυνται για περαιτέρω μηχανική κατεργασία. Με βάση το ποσοστό του άνθρακα που περιέχεται αποκτούν διαφορετικές ιδιότητες και πεδίο χρήσης. Ενδεικτικά αν ο άνθρακας είναι μέχρι 0.15% ο χάλυβας έχει καλή πλαστικότητα και κατεργασιμότητα, καλή μηχανική αντοχή και χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή ελασμάτων. Η προσθήκη σε επίπεδο μικροκραμάτωσης, του Χρωμίου (Cr) στην περίπτωση του Α αλλά και η προσθήκη του Χαλκού (Cu), ενισχύει την διαμορφωσιμότητα των συγκεκριμένων ελασμάτων διατηρώντας τις μηχανικές ιδιότητες εντός προδιαγραφόμενων ορίων. Οι συγκεκριμένοι χάλυβες δεν μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία για την

σκλήρυνση της μάζας τους. Για να επιτευχθούν υψηλές σκληρότητες θα πρέπει να διαμορφωθούν εν ψυχρώ.

10. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟ, ΛΕΙΑΝΣΗ, ΣΤΙΑΒΩΣΗ

10.1 Εγκιβωτισμός Δοκιμίων

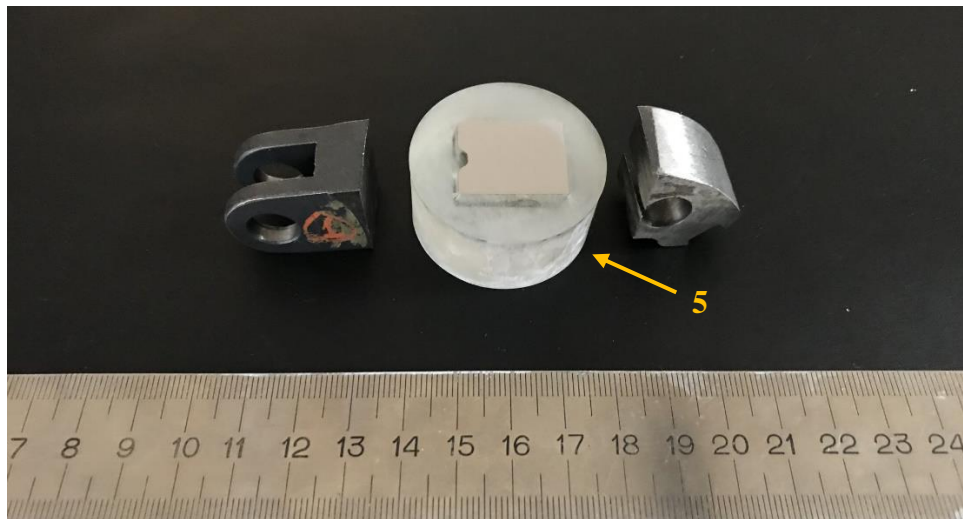
Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την κοπή των δοκιμίων στα δοκίμια τα οποία έχουν εναζώτωση θα γίνει μια επιπλέον κοπή προκειμένου να είναι εφικτό να δούμε στην τομή να απεικονισθούν οι εκλεπίσεις της επιφάνειας σε επίπεδο μικροσκοπίας. Έτσι λοιπόν συνολικά έχουν προκύψει οκτώ δοκίμια τα οποία μετά την κοπή προετοιμάστηκαν προκειμένου να εγκιβωτιστούν. Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας PRESI και αποτελείται από δυο συστατικά, μια πούδρα και έναν καταλύτη (Εικόνα 10.1). Η πούδρα είναι η KM U COLD RESIN ACRYLIC RESIN με Ref. Product: 00041410 και Lot No: 39921 και ο καταλύτης είναι ο KM U COLD RESIN ACRYLIC CATALYST με Ref Product: 00041420 και Lot No: 39951.



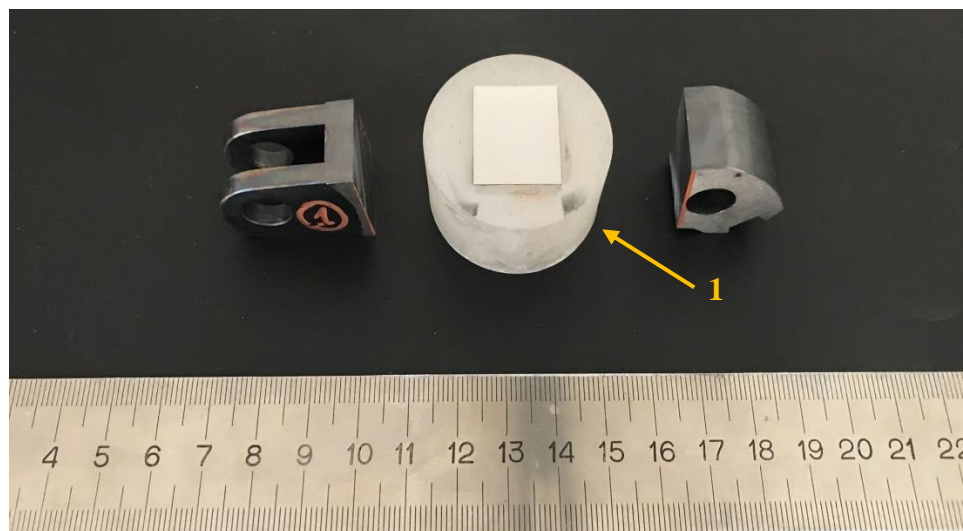
Εικόνα 10.1: Ρητίνη δυο συστατικών εταιρίας PRESI

Τα δυο συστατικά αναμιγνύονται και αναδεύονται έως ότου να ομογενοποιηθούν και αμέσως μετά γίνεται έγχυση σε πλαστικό καλούπι μαζί με το προς εγκιβωτισμό δοκίμιο. Από αυτή την διαδικασία προέκυψαν οκτώ εγκιβωτισμένα δοκίμια τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

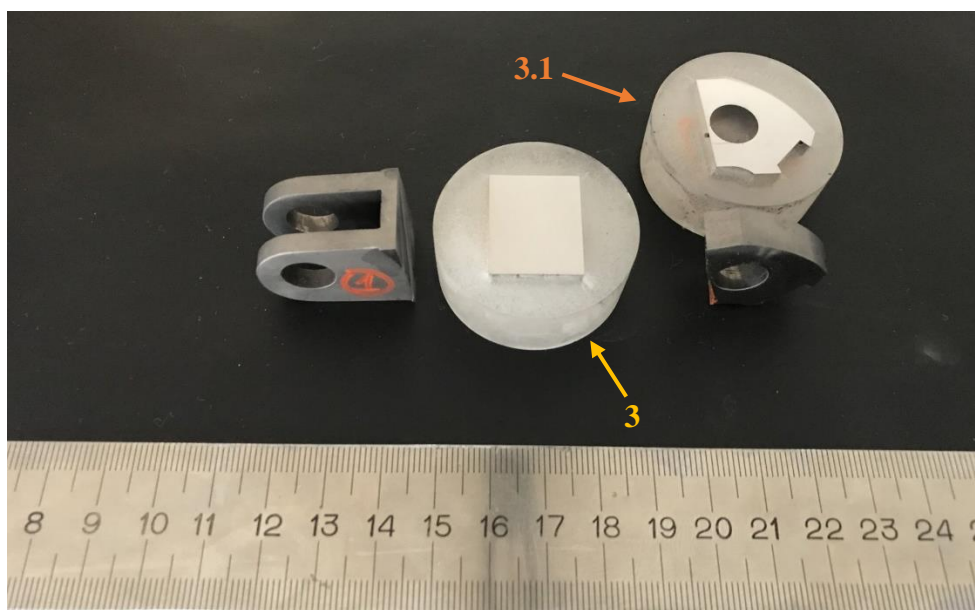
10.1.1 Φωτογραφίες δοκιμίων μετά τον εγκιβωτισμό



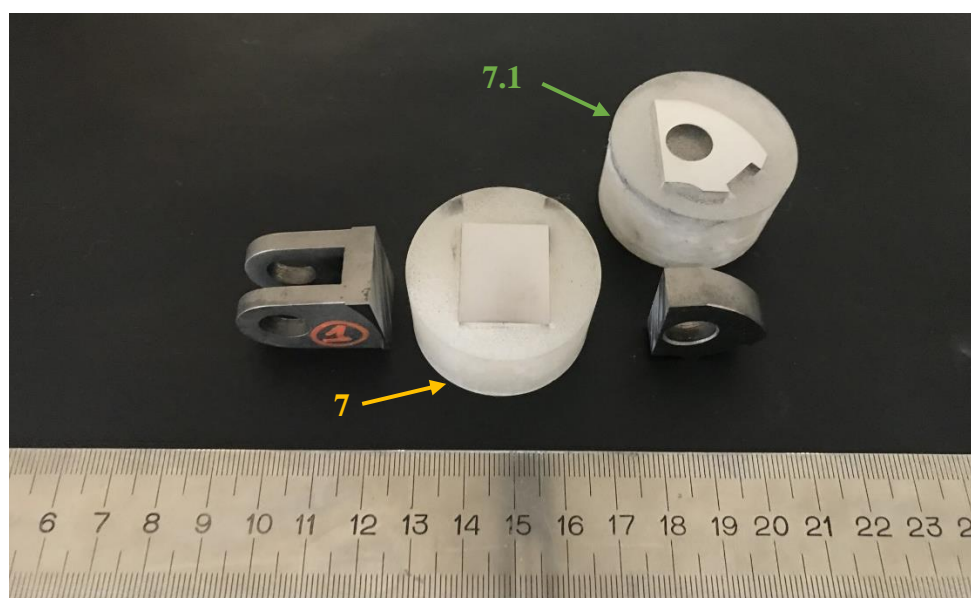
Εικόνα 10.2: Δοκίμιο από το συναρμολόγημα Parent Assembly μετά από κοπή και εγκιβωτισμό.



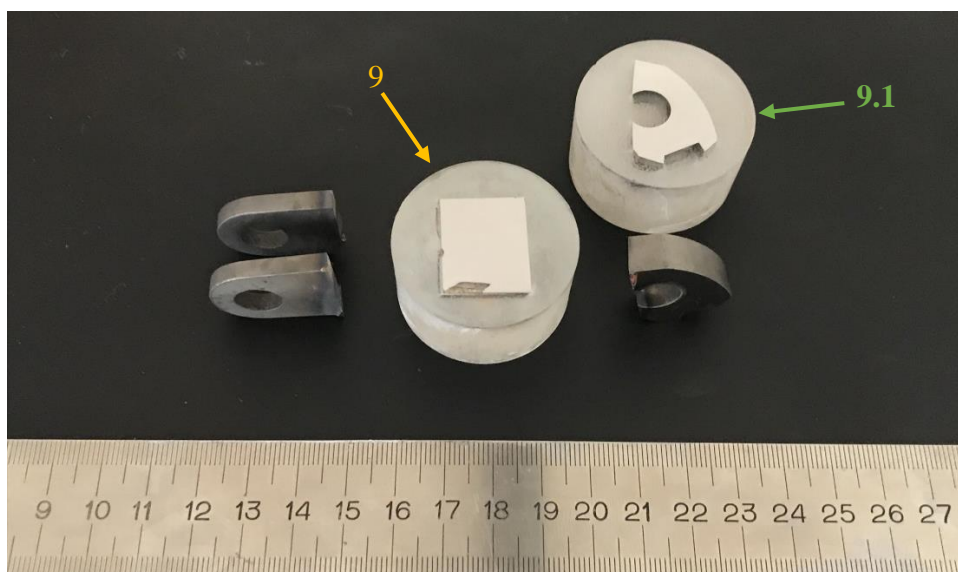
Εικόνα 10.3: Δοκίμιο από το συναρμολόγημα 1st Attempt μετά από κοπή και εγκιβωτισμό.



Εικόνα 10.4: Δοκίμιο από το συναρμολόγημα N μετά από κοπή και εγκιβωτισμό.



Εικόνα 10.5: Δοκίμιο από το συναρμολόγημα QT+N1 μετά από κοπή και εγκιβωτισμό.



Εικόνα 10.6: Δοκίμιο από το συναρμολόγημα QT+N2 μετά από κοπή και εγκιβωτισμό.

10.2 Λείανση και στίλβωση Δοκιμίων

Αμέσως μετά τον εγκιβωτισμό ακολούθησε λείανση και στίλβωση μέχρι το 1 μ m των δοκιμίων με σκοπό να γίνει η διαδικασία της μικροσκληρομέτρησης. Οι λειάνσεις έγιναν εντός της εταιρίας SPECTRUMLABS με την χρήση λειαντικού σταθερού τροχού της εταιρίας BUEHLER και τύπο METASERV 3000, Model No: 95-2910 και Serial No: 653-MG3V-10246, με σταθερές στροφές 230rpm ενώ χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά P120, P180, P240, P320, P600, P1000 της ίδιας εταιρίας.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η στίλβωση των δοκιμίων η οποία ολοκληρώθηκε σε τέσσερα στάδια. Τα δυο πρώτα στάδια των 6 μ m και 3 μ m πραγματοποιήθηκαν στο τριβείο BUEHLER METASERV 3000 (Εικόνα 10.6α) χρησιμοποιώντας πολυκρυσταλλική πάστα διαμαντιού για 6 μ m και 3 μ m με στίλβωτικά πανιά της εταιρίας PRESI καθώς και λιπαντικό μέσο της ίδιας εταιρείας (Batch No: 10024-16-0760). Τα δυο στάδια των 1 μ m και 0.3 μ m πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Ε.Π.Τ.Υ.Λ.) του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.), στο μηχάνημα PRESI MECAPOL P262 (Εικόνα 10.6β) με την χρήση αιωρήματος αλουμίνης STRUERS DP-Paste M για 1 μ m και STRUERS DP-Paste M 0.25 μ m αντίστοιχα με την χρήση STRUERS DP-Lubricant Blue απιονισμένου ως μέσο λίπανσης. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σε σταθερές στροφές 150rpm και

μετά από κάθε στάδιο η επιφάνεια καθαριζόταν προσεκτικά με την χρήση απιονισμένου νερού και αλκοόλης.



Εικόνα 10.6: Στα αριστερά λειαντικό τριβείο εταιράς BUHLER METASERV 3000 (α), και δεξιά λειαντικό τριβείο της εταιρείας PRESI MECAPOL P262 (β).

11. ΔΟΚΙΜΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

11.1 Γενικές Πληροφορίες

Όπως έχει αναφερθεί η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την ανάλυση αστοχίας πέντε εξαρτημάτων τα οποία λειτουργούσαν εντός κεφαλής με σκοπό την διαμόρφωση μεταλλικού ελάσματος (τσέρκι) κατά την διαδικασία της συσκευασίας προϊόντων. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν πέντε δείγματα από τα οποία μετά τις κοπές προέκυψαν οκτώ δοκίμια προς εξέταση. Για την δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης χρησιμοποιήθηκαν πέντε δοκίμια από τα οποία επιλέχθηκε να γίνουν μετρήσεις στον πυρήνα τους, έτσι ώστε να ελεγχθεί η τιμή και η ομοιογένεια της σκληρότητας, ενώ πραγματοποιήθηκαν επίσης και δυο μετρήσεις του προφίλ στο καθένα (σε ορισμένες περιπτώσεις παραπάνω) έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν κάποια από αυτά έχουν υποστεί κάποια θερμική κατεργασία επιφάνειας. Στις περιπτώσεις που είναι γνωστό ότι το αντίστοιχο συναρμολόγημα έχει υποστεί εναζώτωση θα μπορέσει να δημιουργηθεί ένα προφίλ εναζώτωσης ώστε να ελεγχθεί το βάθος που έχει εισχωρήσει και αν αυτό είναι αποδεκτό.

Η δοκιμή μικροσκληρομέτρησης πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Ε.Π.Τ.Υ.Λ.) του τμήματος Μηχανολόγων μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.). Έγινε χρήση του μικροσκληρομέτρου Shimadzu Type M. με Serial No: 341-64278 (Εικόνα 11.1), οι μετρήσεις έγιναν με πρότυπο βάρος 200gr με διάρκεια φόρτισης τα 15sec σύμφωνα με την προδιαγραφή του E384-11.



Εικόνα 11.1: Μικροσκληρόμετρο Shimadzu στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Ε.Π.Τ.Υ.Λ.).

11.2 Επαλήθευση Μικροσκληρομέτρου

Πριν την δοκιμή πραγματοποιήθηκε έμμεση επαλήθευση του οργάνου προκειμένου να διαπιστωθεί στο σφάλμα και η Επαναληψιμότητά του. Για την διαδικασία της επαλήθευσης χρησιμοποιήθηκαν τρία πρότυπα πλακίδια σε διαφορετικά εύρη σκληρότητας όπως αναφέρεται μέσα στο πρότυπο ASTM E384. Για να κατασκευαστεί η καμπύλη διόρθωσης πάρθηκαν μετρήσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 11.1: Μετρήσεις προτύπων δοκιμών για την δημιουργία καμπύλης διόρθωσης

Μέσος Όρος Διαγωνίων (μm)						
A/A	700,7 HV0.2 → 23.0 (μm)		455,0 HV0.2 → 28.55 (μm)		158,3 HV0.2 → 48.4 (μm)	
1	692,04	23,15	417,64	29,80	142,87	50,95
2	698,06	23,05	416,24	29,85	143,15	50,90
3	686,10	23,25	429,08	29,40	136,11	52,20
4	686,10	23,25	423,30	29,60	134,30	52,55
5	683,16	23,30	432,01	29,30	137,42	51,95
6	704,15	22,95	432,01	29,30	134,82	52,45
7	704,15	22,95	429,08	29,40	134,30	52,55
8	707,23	22,90	424,74	29,55	137,42	51,95
9	701,10	23,00	424,74	29,55	137,16	52,00
10	701,10	23,00	414,85	29,90	137,42	51,95
Σύνολο	6963,19	230,80	4243,69	295,65	1374,99	519,45
Μέση Τιμή	696,32	23,08	424,37	29,57	137,50	51,95

Έγινε μέτρηση των αποτυπωμάτων και κατόπιν μέσω της εξίσωσης (11.1) έγινε μετατροπή των αποτυπωμάτων αυτών στην επιθυμητή σκληρότητα σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E384. Με την χρήση των εξισώσεων (11.2) και (11.3) βρέθηκε η Επαναληψιμότητα R% το σφάλμα E% αντίστοιχα τα οποία τοποθετήθηκαν στον πίνακα 11.2.

$$HV = 1.8544 * \left(\frac{P}{d^2}\right) \quad (11.1), \text{ όπου το } P \text{ σε (kg) και το } d \text{ σε } \mu\text{m}$$

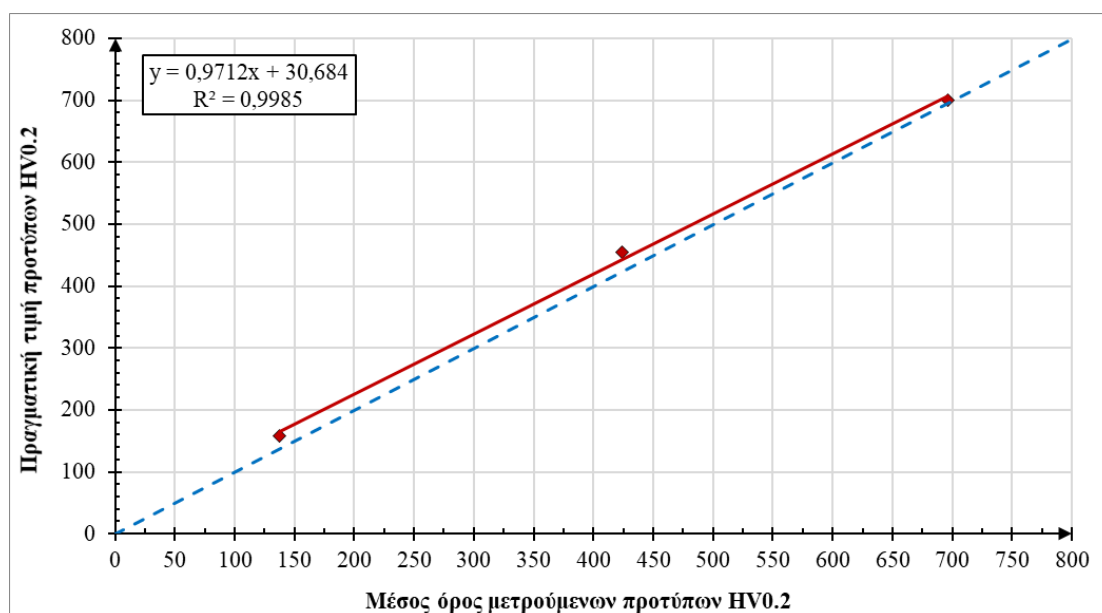
$$R = 100 * \frac{(d_{\max} - d_{\min})}{d_{\text{mean}}} \quad (11.2), \text{ όπου το } d \text{ σε } \mu\text{m}$$

$$\%E = 100 * \frac{d_{\text{mean}} - d_{\text{real}}}{d_{\text{mean}}} \quad (11.3), \text{ όπου το } d \text{ σε } \mu\text{m}$$

Πίνακας 11.2: Επαναληψιμότητα και σφάλμα προτύπων δοκιμίων.

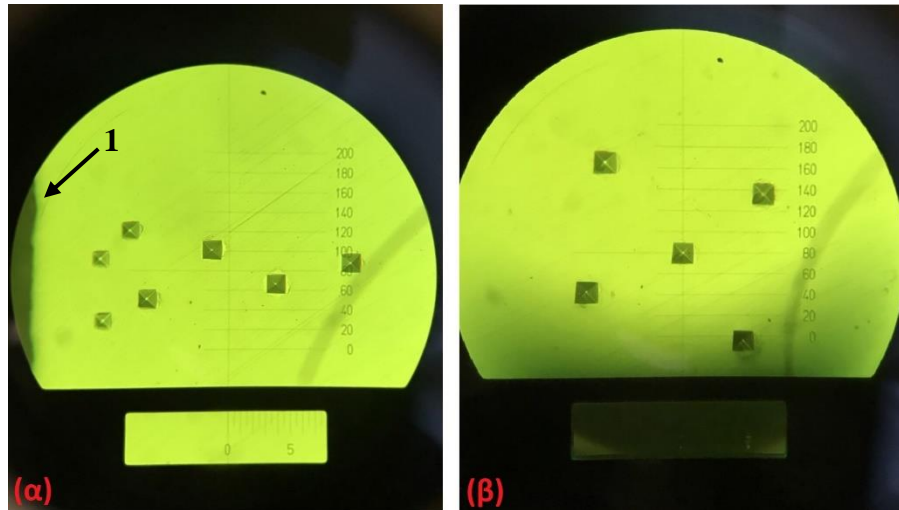
Επαναληψιμότητα και Σφάλμα προτύπων δοκιμίων			
Πρότυπα δοκίμια	158.3 HV0.2	455.0 HV0.2	700.7 HV0.2
Επαναληψιμότητα [R]	3.18% < 13%	2.03% < 5%	1.73% < 4%
Σφάλμα [E]	6,82% > 2%	2,59% > 2%	0,35% < 2%

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 11.2 καταλήγουμε ότι η Επαναληψιμότητα είναι εντός των επιτρεπτών ορίων τα οποία ορίζονται μέσα στο πρότυπο E384 στον πίνακα A2.1, ενώ το σφάλμα είναι εκτός ορίων για μικρές και μεσαίες τιμές σκληρότητας. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η διόρθωση των τιμών, μέσω τη καμπύλης διόρθωσης, όλης της κλίμακας.



Εικόνα 11.2: Καμπύλη βαθμονόμησης μικροσκληρόμετρου Shimadzu.

Όπως προαναφέρθηκε θα χρησιμοποιηθούν πέντε δοκίμια για την δοκιμή της μικροσκληρότητας. Θα παρθούν μετρήσεις σκληρότητας στο πυρήνα του δοκιμίου για τον έλεγχο της ομογένειας του υλικού καθώς και τη σχέση του δοκιμίου με τα υπόλοιπα όσον αφορά το εσωτερικό του ενώ στη συνέχεια θα ληφθούν μετρήσεις ξεκινώντας από την επιφάνεια προς τον πυρήνα έτσι ώστε να διαμορφωθεί ένα προφίλ μικροσκληρότητας. Παρακάτω φαίνονται μερικά αποτυπώματα στο κέντρο (Εικόνα 11.3β) του δοκιμίου καθώς και στην άκρη (Εικόνα 11.3β). Είναι αντιληπτό πως τα αποτυπώματα που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου είναι πολύ μικρότερα συγκριτικά με αυτά που βρίσκονται προς το εσωτερικό



Εικόνα 11.3: Δοκίμιο 7 (α) Αποτυπώματα κοντά στην επιφάνεια, Δοκίμιο 3 (β) Αποτυπώματα στο κέντρο και στην επιφάνεια (λεπτομέρεια 1).

11.3 Μετρήσεις Σκληρότητας

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι πίνακες με τις μετρήσεις σκληρότητας που πάρθηκαν στο κέντρο και στο προφίλ των δοκιμίων σε δυο διαφορετικές πλευρά

11.3.1 Parent Assembly

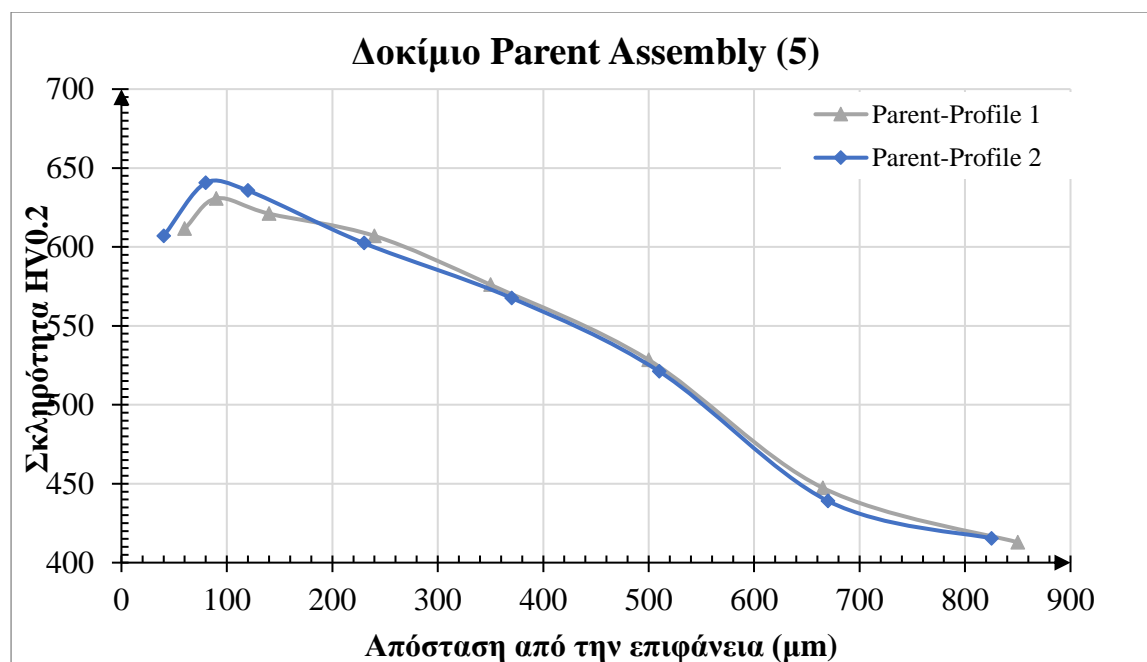
Πίνακας 11.3: Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων στο κέντρο του δοκιμίου Parent Assembly (5).

CENTER Parent Assembly (5)					
d_1 (μm)	d_2 (μm)	$d_{\text{M.O.}}$ (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} ($\Delta\text{ιορθ}$)	HRC
30,2	30,4	30,30	406,6	425,6	43.2
30,0	30,5	30,25	406,6	425,6	43.2
30,2	30,1	30,15	409,4	428,2	43.5
30,6	30,8	30,70	396,1	415,4	42.3
30,4	30,7	30,55	398,7	417,9	42.5

Πίνακας 11.4: Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων στο προφίλ του δοκιμίου Parent Assembly (5).

Profile 1 Parent Assembly (5)							Profile 2 Parent Assembly (5)						
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC
60	24,9	25,0	24,95	598,2	611,6	55,9	40	25,4	24,7	25,05	593,4	607,0	55,7
90	24,6	24,5	24,55	617,9	630,8	56,9	80	24,7	24,0	24,35	628,1	640,7	57,3
140	24,4	25,2	24,80	607,9	621,1	56,4	120	24,7	24,2	24,45	623,0	635,7	57,1
240	25,1	25,0	25,05	593,4	607,0	55,7	230	25,3	24,9	25,10	588,7	602,4	55,4
350	25,7	25,8	25,75	561,5	576,0	53,9	370	26,0	25,8	25,90	552,9	567,6	53,4
500	26,9	27,1	27,00	512,5	528,5	51,0	510	27,2	27,2	27,20	505,0	521,1	50,5
665	28,8	30,2	29,50	429,1	447,4	45,1	670	30,1	29,5	29,80	420,5	439,0	44,4
850	30,6	30,9	30,75	393,5	412,9	42,0	825	30,2	31,1	30,65	396,1	415,4	42,3

Στην εικόνα 11.4 θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα προφίλ των δυο πλευρών του δοκιμίου 5. Πρέπει να τονιστεί ότι το συγκεκριμένο εξάρτημα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα 16444 κατά CSN.



Εικόνα 11.4: Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου Parent Assembly (5).

- Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ικανοποιητική ομοιομορφία στη σκληρότητα του πυρήνα η οποία διαμορφώνεται από 415.4-425.6HV_{0.2}. Δεδομένου ότι ο συγκεκριμένος χάλυβας παραδίδεται ως πρώτη ύλη με σκληρότητα 248HB ή 22 HRC περίπου, στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι αποτέλεσμα θερμικής κατεργασίας [54].

- Όσον αφορά το προφίλ μικροσκληρότητας και εδώ παρατηρείται πολύ μεγάλη ομοιογένεια ως προς τις δυο πλευρές του, με την σκληρότητα να ξεκινά από 640-520HV_{0.2} ή 57.3-50.5HRC στην επιφάνεια του και να ισορροπεί στα 415HV_{0.2} ή 42.3HRC στο υπόβαθρο. Όπως έχει προαναφερθεί («Κεφάλαιο 9.1.1») ο συγκεκριμένος χάλυβας χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία μετά από σφυρηλάτηση καθότι η δομή του και η χημική του σύσταση ευνοεί πολύ την διαδικασία. Η αυξημένη σκληρότητα του, από την επιφάνεια μέχρι και το βάθος των 0.5mm ωφελείται στην σφυρηλάτηση που έχει υποστεί κατά τη διαδικασία της παραγωγής του.

11.3.2 1st Attempt

Πίνακας 11.5: Μετρήσεις μικροσκληρότητας στο κέντρο του δοκιμίου 1 (1st Attempt)

CENTER 1st Attempt (1)					
d₁ (μm)	d₂ (μm)	d_{M.O.} (μm)	HV_{0.2}	HV_{0.2} (Διορθ)	HRC
23,3	23,4	23,35	683,2	694,2	59.9
23,4	23,0	23,20	689,1	699,9	60.1
23,4	24,1	23,75	660,3	672,0	58.9
23,2	23,4	23,30	689,1	699,9	60.1
23,6	23,7	23,65	665,9	677,4	59.1
23,7	23,7	23,70	660,3	672,0	58.9
23,4	23,9	23,65	665,9	677,4	59.1

Είναι γνωστό από τη χημική ανάλυση, ότι το συγκεκριμένο κομμάτι είναι κατασκευασμένο από χάλυβα O2 κατά AISI. Δεδομένου ότι ο συγκεκριμένος χάλυβας λόγω τη χημικής του σύστασης και της χαμηλής του κραμάτωσης δεν ενδείκνυται για εναζώτωση, έγιναν μετρήσεις μόνο στο κέντρο. Η έλλειψη κραματικών στοιχείων κατά την διαδικασία της εναζώτωσης θα δημιουργήσει μια πολύ ψαθυρή επιφάνεια χωρίς αυτό να σημαίνει ότι θα επιτευχθεί η επιθυμητή σκληρότητα [30]. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι υπάρχει πολύ μεγάλη ομοιογένεια σκληρότητας, στον πυρήνα η οποία είναι αρκετά αυξημένη λόγω της θερμικής κατεργασίας που έχει υποστεί ο χάλυβας κατά την κατασκευή του εξαρτήματος. Κρίνοντας από το χρώμα

που έχει το συναρμολόγημα («Κεφάλαιο 6.1.2») και την σκληρότητα του, μπορεί κάποιος να καταλάβει ότι έχει υποστεί βαφή μάζας και επαναφορά περίπου στους 250 – 280 °C. Βιβλιογραφικά ο συγκεκριμένος χάλυβας αποκτά σκληρότητα ίση με 60HRC μετά την επαναφορά στους 250 °C.

11.3.3 N

Πίνακας 11.6: Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων στο κέντρο του δοκιμίου N (3)

CENTER N (3)					
d₁ (μm)	d₂ (μm)	d_{M.O.} (μm)	HV_{0.2}	HV_{0.2} (Διορθ)	HRC
28,7	28,9	28,80	450,3	468,0	46.8
28,9	28,5	28,70	453,4	471,0	47.0
28,8	28,8	28,80	450,3	468,0	46.8
28,8	29,0	28,90	447,1	465,0	46.5
29,1	28,4	28,75	450,3	468,0	46.8

Πίνακας 11.7: Αποτελέσματα μικροσκληρότητας προφίλ της μιας πλευράς του δοκιμίου N (3)

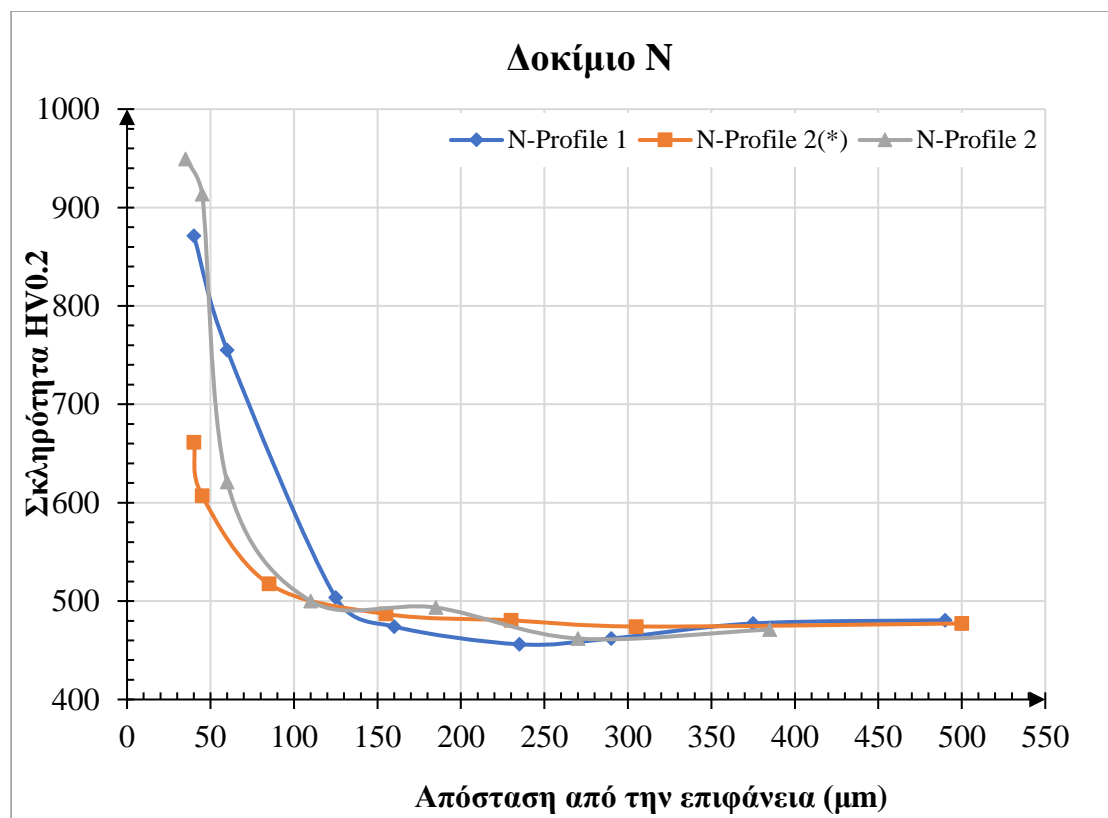
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	Profile 1 N (3)						Profile 2 N (3)						
	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC	
40	20,6	20,8	20,70	865,6	871,4	66.2	35	19,6	20,0	19,80	946,0	949,4	68.0
60	22,0	22,7	22,35	745,8	755,0	62.3	45	20,0	20,4	20,20	908,9	913,4	67.3
125	27,4	28,0	27,70	486,9	503,5	49.3	60	24,2	25,3	24,75	607,9	621,1	56.4
160	27,9	29,2	28,55	456,6	474,1	47.2	110	27,9	27,7	27,80	483,4	500,1	49.1
235	28,9	29,4	29,15	438,0	456,0	45.8	185	27,7	28,3	28,00	476,5	493,4	48.7
290	28,6	29,3	28,95	444,1	462,0	46.3	270	29,1	28,9	29,00	444,1	462,0	46.3
375	27,9	29,0	28,45	459,8	477,3	47.5	385	28,5	28,8	28,65	453,4	471,0	47.0
490	27,9	28,9	28,40	463,1	480,4	47.7							

Πίνακας 11.8: Αποτελέσματα μικροσκληρότητας προφίλ στο δοκίμιο 3 (N)

Profile 2 N(3)						
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθ)	HRC
40	24,1	23,8	23,95	649,3	661,3	58.4
45	25,1	25,0	25,05	593,4	607,0	55.7
85	27,8	26,7	27,25	501,3	517,5	50.3
155	28,1	28,3	28,20	469,7	486,9	48.1
230	28,3	28,5	28,40	463,1	480,4	47.7
305	28,5	28,7	28,60	456,6	474,1	47.2
500	28,4	28,5	28,45	459,8	477,3	47.5

Κατά την διαδικασία λήψης μετρήσεων στο προφίλ του δοκιμίου παρατηρήθηκε ότι η σκληρότητα της εναζώτωσης σε βάθος 40 και 45μm, είναι πολύ χαμηλότερη (λεπτομέρεια με κόκκινο στον Πίνακα 11.8) από εκείνη που κανονικά έχει το δοκίμιο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν στον πίνακα 11.7. Διαπιστώνεται ότι το πρόβλημα εντοπίζεται μόνο στην επιφάνεια καθώς οι μετρήσεις που αφορούν το εσωτερικό του δοκιμίου, έχουν πάρα πολύ καλή ομοιογένεια. Η χαμηλή σκληρότητα σε εκείνο το σημείο μπορεί να ωφελείται στην διαδικασία αποπεράτωσης ή στην διαδικασία εναζώτωσης πράγμα που θα διαπιστωθεί κατά την επόμενη φάση της μικροσκοπικής ανάλυσης του δοκιμίου.

Στην εικόνα 11.5 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα σκληρότητας για το προφίλ των δυο πλευρών του δοκιμίου N το οποίο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα UNIMAX.



Εικόνα 11.5: Προφίλ μικροσκληρότητας δοκιμίου N(3).

- Με βάση τα αποτελέσματα σκληρότητας που προκύπτουν στο υπόβαθρο του δοκιμίου γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει μια πολύ καλή ομοιογένεια του υλικού η οποία κυμαίνεται από 465-471HV_{0.2}. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έρχεται ως πρώτη ύλη με ονομαστική σκληρότητα 185 HB ή 89.5 HRB, από αυτό μπορεί κανείς να βγάλει το συμπέρασμα ότι ο συγκεκριμένος χάλυβας με σκληρότητα 47HRC στο υπόβαθρο του είναι αποτέλεσμα βαφής και επαναφοράς [56].
- Το εξάρτημα N, σε αντίθεση με από που δόθηκε ως αρχική πληροφορία, φαίνεται να έχει υποστεί βαφή σε σκληρότητα περίπου στα 47HRC και έχει εναζωτωθεί αντίστοιχα. Βάσει των δυο προφίλ μικροσκληρότητας, το βάθος, είναι ομοιογενές στα 120μm περίπου με μέγιστη τιμή σκληρότητας τα 949.4HV_{0.2} περίπου 68HRC ενώ σταδιακά φθίνει μέχρι την περιοχή των 471HV_{0.2} ή 47HRC περίπου. Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή του υλικού, το βάθος είναι μεγαλύτερο από την παραμονή 1h στους 580°C σε μπάνιο αλάτων. Είναι γνωστό ότι η παραμονή στο μπάνιο εναζώτωσης ήταν για τουλάχιστον 3h στους 580°C. Η αποκτημένη σκληρότητα είναι φαινομενικά αρκετά μικρότερη από αυτή που προβλέπει ο κατασκευαστής. Δεν διευκρινίζεται το βάθος από την επιφάνεια όπου

μετρήθηκε η σκληρότητα του στρώματος. Με βάση τη μετρούμενη σκληρότητα στα 35 και 40 μm από την επιφάνεια η σκληρότητα δύναται να φτάσει τα 1160HV_{0.2} [56]. Το βάθος θεωρείται αποδεκτό για το συγκεκριμένο μέσο εναζώτωσης και το χρόνο παραμονής.

11.3.4 QT+N1

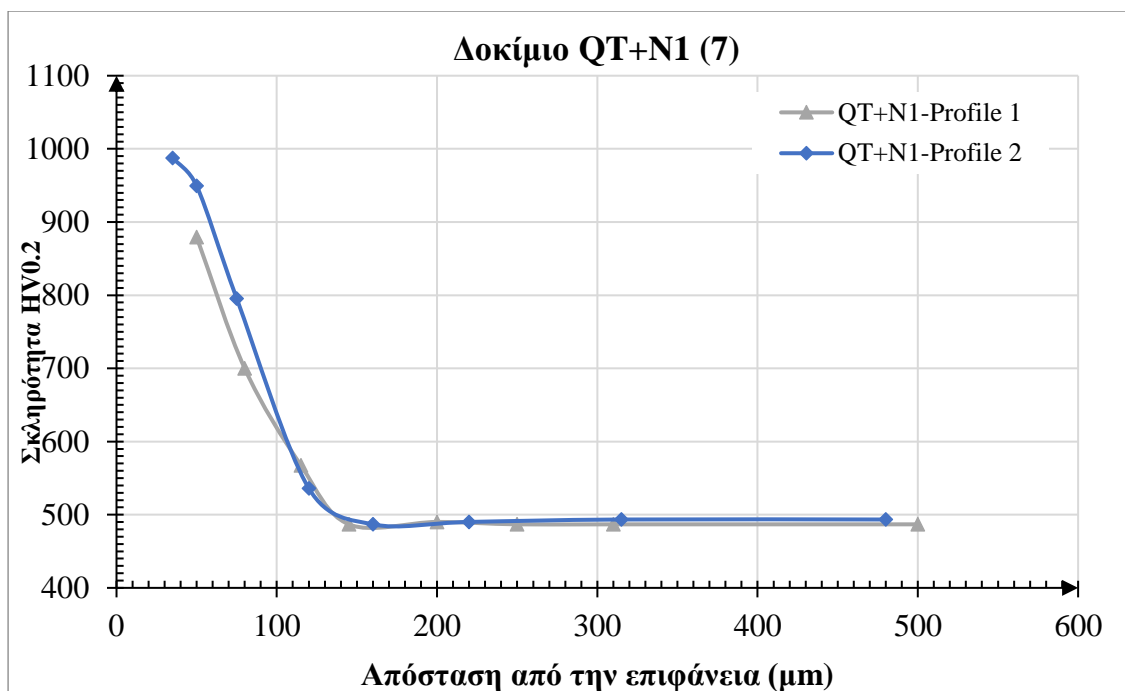
Πίνακας 11.9: Αποτελέσματα μικροσκληρότητας κέντρου δοκιμίου QT+N1 (7)

CENTER QT+N1 (7)					
d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} ($\Delta\text{ιορθ}$)	HRC
28,1	27,4	27,75	483,4	500,1	49.1
27,7	27,2	27,45	494,0	510,5	49.8
28,0	28,1	28,05	473,1	490,1	48.4
28,2	28,2	28,20	469,7	486,9	48.1
27,9	28,2	28,05	473,1	490,1	48.4
27,7	27,9	27,80	483,4	500,1	49.1
27,8	27,7	27,75	483,4	500,1	49.1

Πίνακας 11.8: Αποτελέσματα σκληρότητας στο προφίλ των δυο πλευρών του δοκιμίου QT+N1 (7).

Profile 1 QT+N1 (7)							Profile 2 QT+N1 (7)						
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} ($\Delta\text{ιορθ}$)	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} ($\Delta\text{ιορθ}$)	HRC
50	20,7	20,6	20,65	874,0	879,5	66.4	35	19,7	19,2	19,45	985,4	987,7	68.7
80	23,3	23,2	23,25	689,1	699,9	60.1	50	19,9	19,7	19,80	946,0	949,4	68.1
115	25,9	25,9	25,90	552,9	567,6	53.4	75	21,3	21,7	21,50	787,6	795,6	63.8
145	27,8	28,6	28,20	469,7	486,9	48.1	120	26,6	26,8	26,70	520,2	535,9	51.4
200	28,3	27,9	28,10	473,1	490,1	48.4	160	28,0	28,3	28,15	469,7	486,9	48.1
250	28,2	28,2	28,20	469,7	486,9	48.1	220	28,2	28,0	28,10	473,1	490,1	48.4
310	28,1	28,2	28,15	469,7	486,9	48.1	315	27,7	28,3	28,00	476,5	493,4	48.7
500	28,1	28,3	28,20	469,7	486,9	48.1	480	27,6	28,4	28,00	476,5	493,4	48.7

Στην εικόνα 11.6 θα παρουσιαστούν οι καμπύλες σκληρότητας προφίλ για τις δυο πλευρές του δοκιμίου QT+N1 (7) το οποίο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα Uddeholm UNIMAX.



Εικόνα 11.6: Γράφημα προφίλ μικροσκληρότητας για τις δυο πλευρές του δοκιμίου QT+N1(7).

- Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις και εδώ φαίνεται ότι υπάρχει εξαιρετική ομοιομορφία στην σκληρότητα του κέντρου του δοκιμίου, η οποία διαμορφώνεται στα 486.9-510.5 HV_{0.2} ή 48.1- 49.8HRC. Από το αποτέλεσμα αυτό διαπιστώνεται ότι ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε έχει υποστεί βαφή και επαναφορά.
- Από τις μετρήσεις προφίλ που έγιναν επιβεβαιώνεται ότι το δοκίμιο έχει υποστεί σκλήρυνση επιφάνειας μέσω εναζώτωσης. Το βάθος της φθάνει μέχρι τα 150μm και χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη ομοιογένεια. Η σκληρότητα ξεκινά από την επιφάνεια με μια τιμή από 987.7-879 HV_{0.2} ή 68.5-66.4HRC και καταλήγει σε τιμές από 486.9-493.4 HV_{0.2} ή 48.1-48.7HRC οπου και σταθεροποιείται. Η σκληρότητα της εναζώτωσης στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη.

11.3.5 QT+N2

Πίνακας 11.9 Αποτελέσματα μικροσκληρότητας κέντρου δοκιμίου QT+N2 (9)

CENTER QT+N2 (9)					
d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC
28,8	28,4	28,60	456,6	474,1	47.2
28,7	28,4	28,55	456,6	474,1	47.2
28,4	28,4	28,40	463,1	480,4	47.7
28,2	28,9	28,55	456,6	474,1	47.2
28,3	28,4	28,35	463,1	480,4	47.7
28,3	28,4	28,35	463,1	480,4	47.7
28,5	28,2	28,35	463,1	480,4	47.7

Πίνακας 11.10 Αποτελέσματα μικροσκληρότητας προφίλ για την μια πλευρά του δοκιμίου QT+N2 (9)

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	Profile 1 QT+N2 (9)						Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	Profile 1 QT+N2 (9)					
	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC		d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC
60	20,6	20,2	20,40	891,2	896,2	66.9	40	19,6	19,8	19,70	955,7	958,9	68.3
85	23,0	23,3	23,15	695,0	705,7	60.3	80	21,6	21,4	21,50	882,3	887,6	66.6
100	25,3	24,8	25,05	593,4	607,0	55.7	115	26,3	26,0	26,15	544,4	559,4	52.9
165	28,0	27,9	27,95	476,5	493,4	48.7	175	27,8	28,1	27,95	476,5	493,4	48.7
230	28,0	28,0	28,00	476,5	493,4	48.7	270	28,1	28,0	28,05	473,1	490,1	48.4
285	27,9	28,3	28,10	473,1	490,1	48.4	410	28,3	27,9	28,10	473,1	490,1	48.4
420	28,5	28,2	28,35	463,1	480,4	47.7							

Πίνακας 11.11: Αποτελέσματα μικροσκληρότητας προφίλ για την δεύτερη πλευρά του δοκιμίου QT+N2 (9).

Profile 1 QT+N2 (9)							Profile 1 QT+N2 (9)						
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC
60	20,6	20,2	20,40	891,2	896,2	66.9	40	19,6	19,8	19,70	955,7	958,9	68.3
85	23,0	23,3	23,15	695,0	705,7	60.3	80	21,6	21,4	21,50	882,3	887,6	66.6
100	25,3	24,8	25,05	593,4	607,0	55.7	115	26,3	26,0	26,15	544,4	559,4	52.9
165	28,0	27,9	27,95	476,5	493,4	48.7	175	27,8	28,1	27,95	476,5	493,4	48.7
230	28,0	28,0	28,00	476,5	493,4	48.7	270	28,1	28,0	28,05	473,1	490,1	48.4
285	27,9	28,3	28,10	473,1	490,1	48.4	410	28,3	27,9	28,10	473,1	490,1	48.4
420	28,5	28,2	28,35	463,1	480,4	47.7							

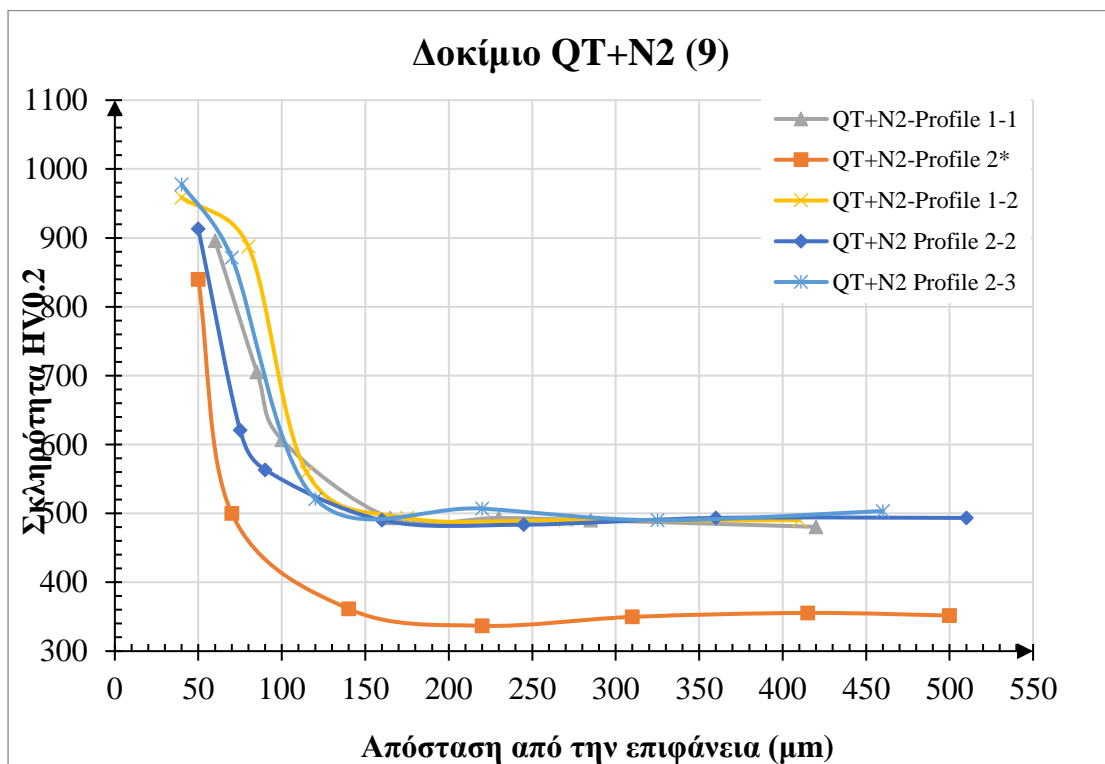
Πίνακας 11.12: Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων δεύτερης πλευράς δοκιμίου QT+N2 (9)

Profile 2 QT+N2 (9)						
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV _{0.2}	HV _{0.2} (Διορθ)	HRC
50	24,7	25,0	24,85	833,0	839,7	65.2
70	25,6	27,4	27,80	483,4	500,1	49.1
140	32,8	33,4	33,10	340,6	361,4	36.8
220	34,7	34,0	34,35	315,2	336,8	37.0
310	33,4	33,9	33,65	328,5	349,7	35.4
415	33,7	33,0	33,35	334,5	355,5	33.9
500	33,5	33,7	33,60	330,5	351,6	35.7

Κατά την διαδικασία λήψης των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι στη μια πλευρά του δοκιμίου υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά σκληρότητας (λεπτομέρεια με κόκκινο στον Πίνακα 11.12) σχετικά με το προφίλ εναζώτωσης, σε σχέση με τα υπόλοιπα προφίλ. Επιβεβαιώνεται μέσω των άλλων προφίλ η ύπαρξη θερμικής κατεργασίας εναζώτωσης, σε βάθος 120μm. Η σκληρότητα μειώνεται πολύ απότομα και σταθεροποιείται στην τιμή μεταξύ των 336.8-361.4 HV_{0.2} ή 34-36.8 HRC. Προκειμένου να υπάρξει βεβαιότητα σχετικά με τις τιμές του προφίλ αποφασίστηκε να ληφθούν περισσότερες

μετρήσεις στο προφίλ του δοκιμίου. Αυτή η πτώση της σκληρότητας μπορεί να ωφελείται είτε στην κατεργασία αποπεράτωσης είτε στο γεγονός ότι στο συγκεκριμένο σημείο υπάρχει ελάττωμα στην μικροδομή του υλικού. Το γεγονός αυτό θα εξεταστεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο όπου μέσω της μικροσκοπίας θα γίνει σαφές το πρόβλημα στο συγκεκριμένο σημείο.

Στην Εικόνα 11.7 απεικονίζονται οι καμπύλες των διάφορων προφίλ στις δυο πλευρές του υλικού. Πρέπει να τονισθεί ότι ο χάλυβας κατασκευής του συγκεκριμένου δοκιμίου είναι ο Uddeholm UNIMAX.



Εικόνα 11.7: Αναπαράσταση καμπυλών σκληρότητας για το προφίλ των πλευρών του δοκιμίου QT+N2(9).

- Όπως και στις άλλες περιπτώσεις έτσι και σε αυτή η σκληρότητα στο κέντρο του δοκιμίου χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ομοιογένεια. Η σκληρότητα κυμαίνεται από 474.1-480.4 HV_{0.2} ή 47.2-47.7HRC. γεγονός που υποδεικνύει ότι το υπόβαθρο έχει υποστεί βαφή και επαναφορά.
- Οι ληφθείσες μετρήσεις επιβεβαιώνουν την ύπαρξη εναζώτωσης εφόσον από τα Ιστορικά δεδομένα αναφέρεται ότι το υλικό έχει υποστεί επιφανειακή κατεργασία σκλήρυνσης. Η σκληρότητα της επιφάνειας ξεκινά από 978.1-839.7 HV_{0.2} και σε βάθος περίπου 150μm αρχίζει να σταθεροποιείται σε τιμές από 480.4-503.5 HV_{0.2} ή 47.7-49.3HRC όπου και σταθεροποιείται. Η επιφάνεια

του δοκιμίου χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ομοιογένεια γεγονός που όπως προαναφέρθηκε ενισχύθηκε από την ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε.

11.5.6 Μεταλλικά Ελάσματα

Η δοκιμή σκληρομέτρησης των μεταλλικών ελασμάτων πραγματοποιήθηκε εντός του εργαστήριου της εταιρείας SPECTRUMLABS S.A. Έγινε χρήση του σκληρόμετρου WILSON WOLPERT DIATESTOR 2RC με Serial No: 8501 0012/111 (Εικόνα 11.8), οι μετρήσεις έγιναν με πρότυπο βάρος 10kg με διάρκεια φόρτισης τα 12sec σύμφωνα με την προδιαγραφή του EN ISO 6507-1. Η συσκευή διακριβώνεται ως προς την εφαρμοζόμενη δύναμη και ως προς την τιμή σκληρότητας κατά το EN ISO 6507-2 με αριθμό πιστοποιητικού M4-191212-12.



Εικόνα 11.8: Απεικόνιση σκληρόμετρου WILSON WOLPERT DIATESTOR 2RC.
[49]

Πίνακας 11.13 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων μεταλλικών ελασμάτων.

Α				Β				Γ			
d ₁	d ₂	d _{M.O.}	HV ₁₀	d ₁	d ₂	d _{M.O.}	HV ₁₀	d ₁	d ₂	d _{M.O.}	HV ₁₀
0.26	0.26	0.26	274	0.265	0.265	0.265	264	0.27	0.27	0.27	254
0.255	0.265	0.26	274	0.26	0.27	0.27	254	0.27	0.27	0.27	254
0.26	0.26	0.26	274	0.265	0.275	0.26	274	0.26	0.26	0.26	274
0.275	0.265	0.27	254	0.26	0.27	0.265	264	0.265	0.265	0.265	264
0.26	0.26	0.26	274	0.27	0.27	0.27	254	0.265	0.255	0.26	274

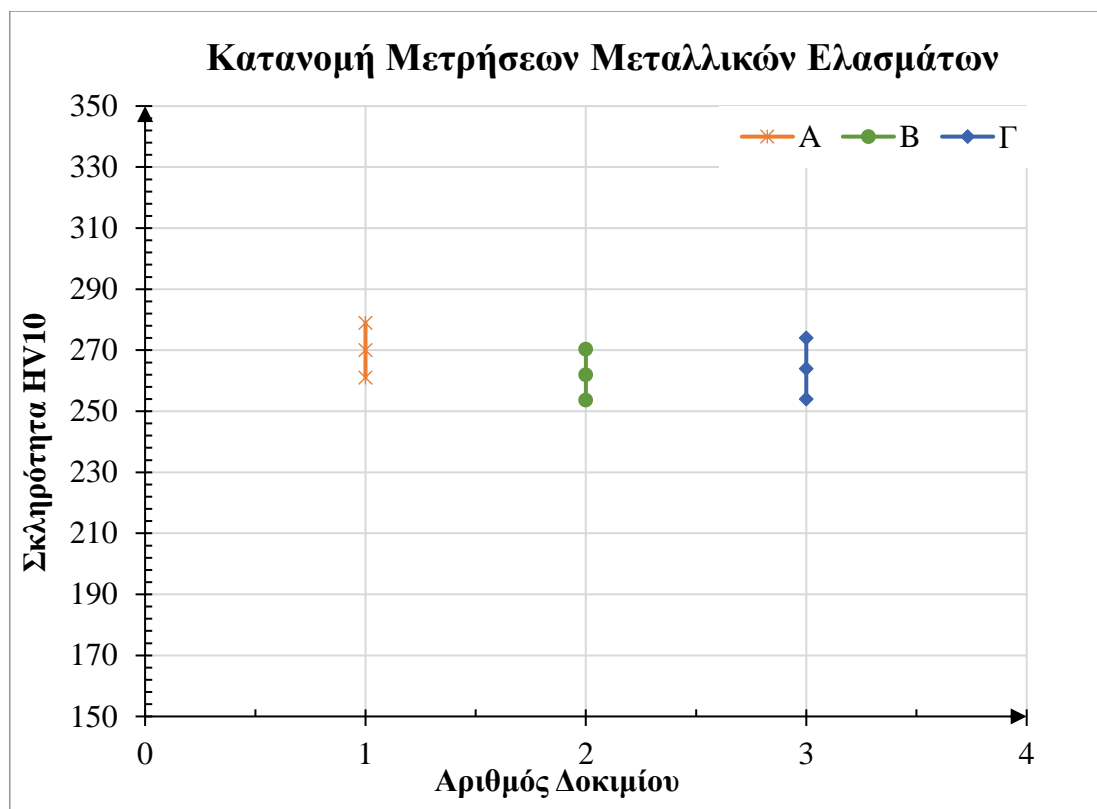
Πίνακας 11.14: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων μεταλλικών ελασμάτων Α,Β,Γ στην κλίμακα HRC.

A	B	Γ
HRC	HRC	HRC
26.3	24.7	23
26.3	23	23
26.3	26.3	26.3
23	24.7	24.7
26.3	23	26.3

Πίνακας 11.14: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση μετρήσεων σκληρότητας μεταλλικών ελασμάτων Α, Β, Γ.

Δοκίμιο	A	B	Γ
Μέσος Όρος	270	262	264
Τυπική Απόκλιση	8,944	8,366	10

Στον πίνακα 11.14 παρουσιάζονται ο μέσος όρος των σκληρομετρήσεων καθώς και η τυπική απόκλιση που προκύπτει. Από το διάγραμμα κατανομής σκληρότητας (Εικόνα 11.9) όλες οι μετρήσεις κατανέμονται περίξ των ιδίων τιμών σκληρότητας με μικρή απόκλιση. Οι τιμές σκληρότητας των μεταλλικών ελασμάτων χαρακτηρίζονται από μεγάλη ομοιογένεια. Λαμβάνοντας υπόψιν την χημική τους σύσταση («Κεφάλαιο 9») και το γεγονός ότι δεν μπορεί να υπάρξει αύξηση σκληρότητας με κάποια θερμική κατεργασία και σε συνδυασμό με τις τιμές σκληρότητας διαπιστώνεται πως είναι προϊόντα έλασης εν ψυχρώ.



Εικόνα 11.9: Κατανομή μετρήσεων σκληρότητας για τα μεταλλικά ελάσματα Α, Β, Γ.

11.4 Συμπεράσματα

Σε όλες τις μετρήσεις που λήφθηκαν στο κέντρο των δειγμάτων παρατηρείται πολύ μεγάλη ομοιογένεια, γεγονός που δείχνει ότι η θερμική κατεργασία του υπόβαθρου ήταν διαδικαστικά άρτια. Τα δοκίμια τα οποία είναι κατασκευασμένα από τον ίδιο χάλυβα Uddeholm UNIMAX παρουσιάζουν πανομοιότυπες τιμές σκληρότητας στο πυρήνα τους. Στον Πίνακα 11.12 παρουσιάζεται ο μέσος όρος των σκληρομετρήσεων καθώς και η τυπική απόκλιση που προκύπτει.

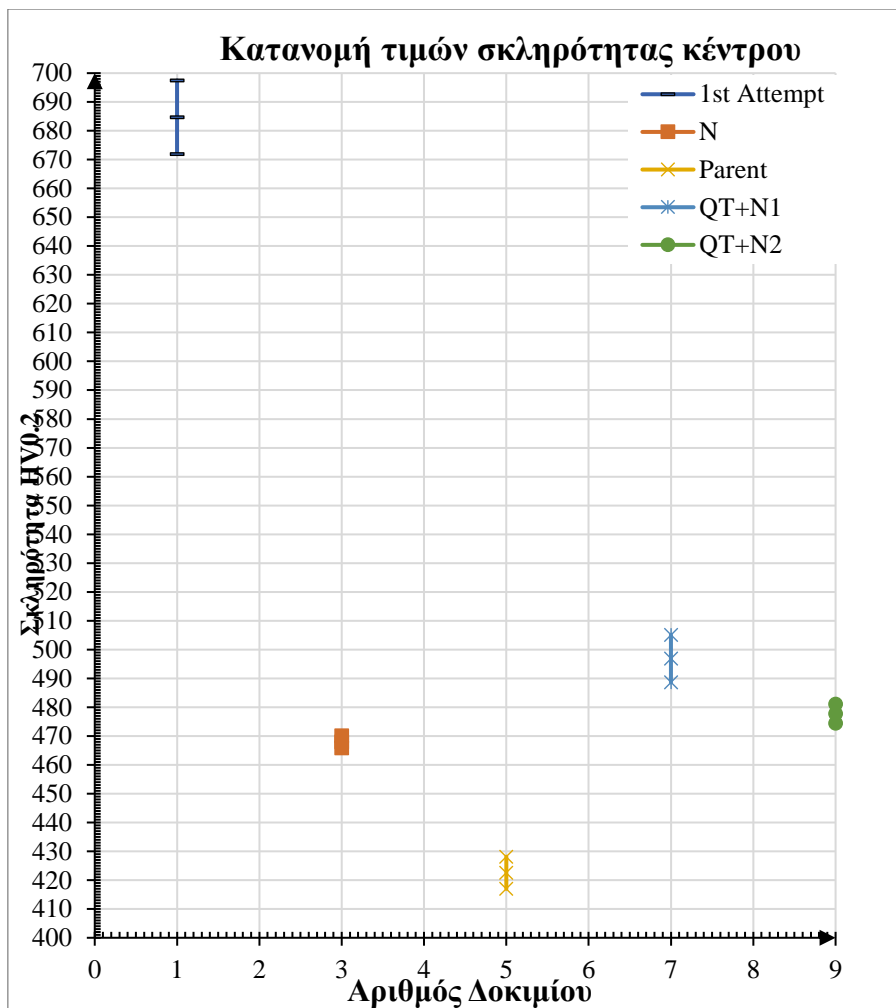
Πίνακας 11.13: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση μετρήσεων στο κέντρο των δοκιμίων

Δοκίμιο	1st Attempt (1)	N(3)	Parent (5)	QT+N1 (7)	QT+N2 (9)
Μέσος Όρος	684,70	468	422,5	496,8	477,7
Τυπική Απόκλιση	12,8	2,15	5,58	8,25	3,36

Στην Εικόνα 11.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής σκληρότητας στο πυρήνα των δοκιμίων και κατ' επέκταση των εξαρτημάτων. Γίνεται αντιληπτό ότι η ομοιογένεια στις σκληρομετρήσεις είναι πολύ μεγάλη. Όλες οι μετρήσεις κατανέμονται περίξ των ιδίων τιμών σκληρότητας με μικρή απόκλιση. Το μόνο που απέχει αρκετά από τα υπόλοιπα είναι το δοκίμιο του 1st Attempt κατασκευασμένο από χάλυβα O2 κατά ASTM το οποίο έχει αρκετά αυξημένη σκληρότητα κέντρου, ενώ οι τιμές του

έχουν λίγη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ τους. Συνολικά υπάρχουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις στον μηχανισμό ισχυροποίησης του εξαρτήματος. Μέσω πλαστικής παραμόρφωσης στην περίπτωση του Parent Assembly. Μέσω βαφής και επαναφοράς σε μια ενιαία σκληρότητα σε όλη την μάζα του στην περίπτωση του 1st Attempt. Μέσω βαφής και επαναφοράς του υπόβαθρου και επιφανειακής θερμικής κατεργασίας εμποτισμού στις περιπτώσεις N, QT+N1, QT+N2.

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε αναφορά στο δοκίμιο N(3) για το οποίο υπήρχε η πληροφορία πως από λανθασμένο χειρισμό δεν είχε υποστεί κάποια θερμική κατεργασία μάζας πριν την εναζώτωση. Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της σκληρότητας του αντίστοιχου δοκιμίου στον πυρήνα υποδεικνύουν την ύπαρξη θερμικής κατεργασίας βαφής και επαναφοράς ενώ η επιφάνεια του έχει υποστεί εναζώτωση. Έτσι λοιπόν κρίνεται αναγκαίο να επισημανθεί ότι η πληροφορία που υπήρχε ήταν λανθασμένη δεδομένου ότι ο σχεδιασμός των θερμικών κατεργασιών έγινε επιτυχώς.



Εικόνα 11.10: Κατανομή μετρήσεων μικροσκληρότητας για τα κέντρα των δοκιμίων

12. ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

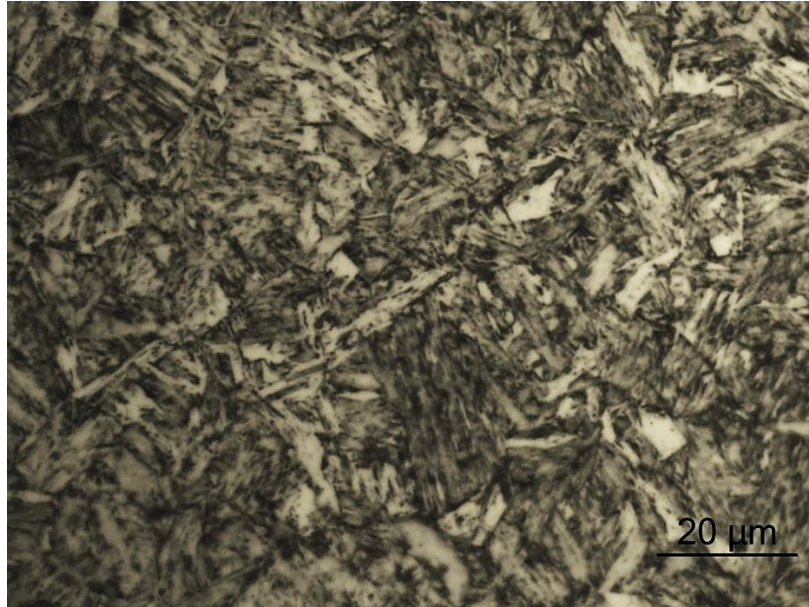
Η οπτική μικροσκοπία των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Ε.Π.Τ.Υ.Λ.) του τμήματος Μηχανολόγων μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α). Μετά την προετοιμασία τους, οκτώ (8) δοκίμια μελετήθηκαν μέσω οπτικής μικροσκοπίας. Για την μικροσκοπική μελέτη των επιφανειών τους τα δοκίμια μετά την στίλβωση καθαρίστηκαν με αλκοόλη και τοποθετήθηκαν μέσα σε συσκευή υπέρηχων James Products SONIC 3MX με ρύθμιση στα 37KHz για 1 λεπτό. Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων αντικειμενικών φακών της εταιρία CARL ZEISS Axio Vert.A1 με S/N: 3848001221 και με δυνατότητα μέγιστης μεγέθυνσης x1000. Όλα τα δοκίμια τα οποία προέκυψαν από το κινούμενα μέρη των συναρμολογημάτων, εξετάστηκαν ως προς τη μικροδομή του πυρήνα τους, ως προς την επιφανειακή κατεργασία αν αυτή υπήρχε, καθώς και την περιοχή η οποία είχε υποστεί λείανση για αποπεράτωση.



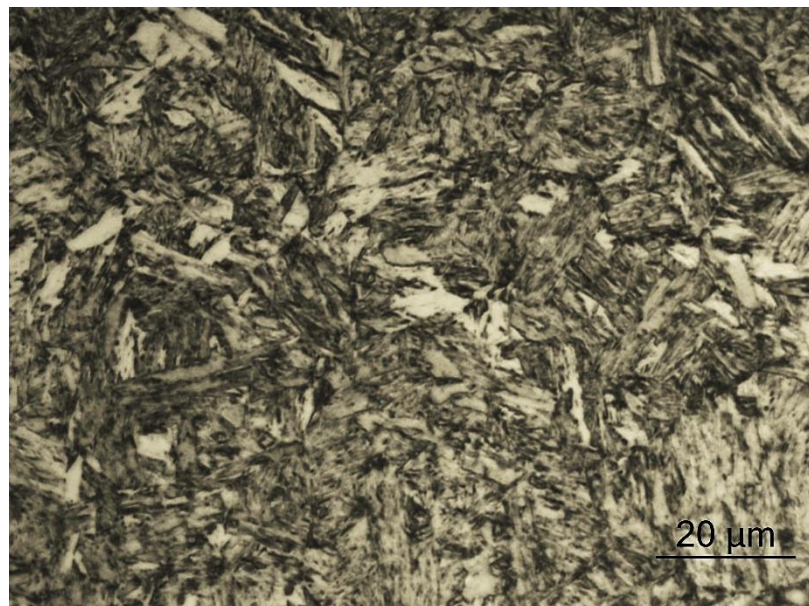
Εικόνα 12.1: Οπτικό Μικροσκόπιο CARL ZEISS AXIO VERT.A1. [46]

12.1 Parent Assembly

Έγινε προσβολή με Nital 3%, διάλυμα Νιτρικού Οξέος (HNO_3) με Μεθανόλη (CH_3OH) για 24.22 sec και αμέσως μετά τοποθετήθηκε 1 λεπτό για καθαρισμό σε συσκευή υπερήχων.



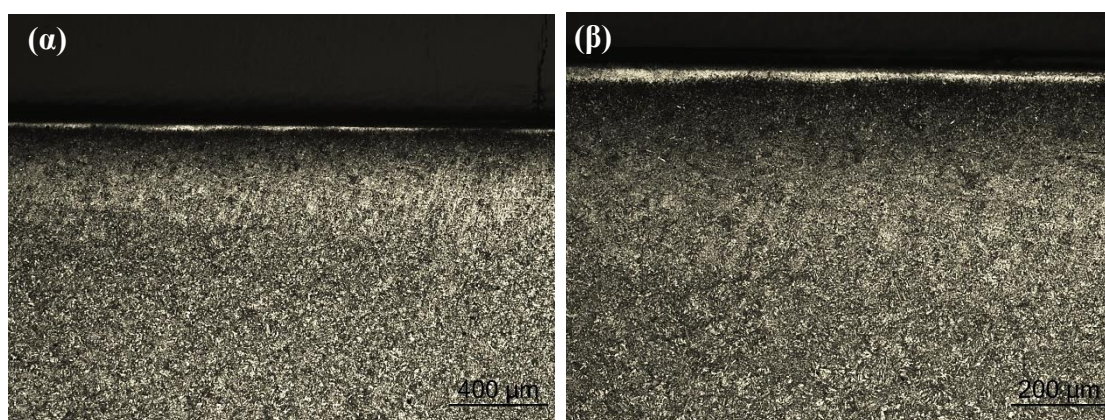
Εικόνα 12.2: Απεικόνιση της δομής του πυρήνα του κινούμενου μέρους (ΔΕ) σε μεγέθυνση x1000 – συναρμολόγημα Parent Assembly.



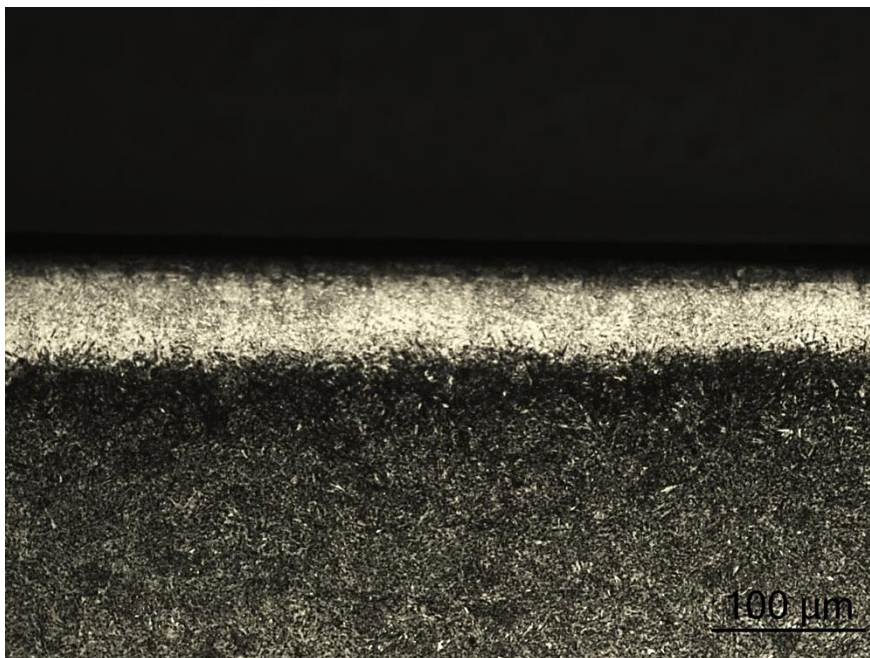
Εικόνα 12.3: Απεικόνιση της δομής της επιφάνειας του κινούμενου μέρους (ΔΕ) σε μεγέθυνση x1000 – συναρμολόγημα Parent Assembly.



Εικόνα 12.4: Απεικόνιση της πλαστικής παραμόρφωσης από σφυρηλάτηση του κινούμενου μέρους (ΔΕ) σε μεγέθυνση x50 – συναρμολόγημα Parent Assembly.



Εικόνα 12.5: Απεικόνιση της επιφάνειας που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση στο κινούμενο μέρος (ΔΕ) σε μεγέθυνση (α) x50 και (β) x100 – συναρμολόγημα Parent Assembly.



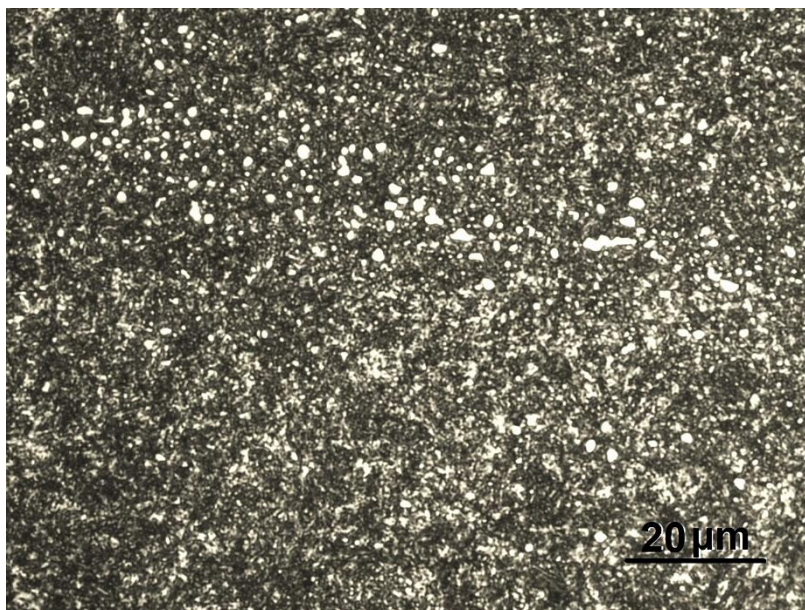
Εικόνα 12.6: Απεικόνιση της επιφάνειας που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση στο κινούμενο μέρος (ΔΕ) σε μεγέθυνση x500 – συναρμολόγημα Parent Assembly.

Η μικροδομή του υλικού στον πυρήνα αποτελείται από ένα συνοθύλευμα φάσεων φερρίτη – περλίτη - μπαινίτη (Εικόνα 12.2). Επιφανειακά στο εξάρτημα υπάρχει μια στρώση πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία έχει προέλθει από τη σφυρηλάτηση. Καθώς το μέταλλο διαμορφώνεται κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης, το σχήμα των κόκκων παραμορφώνεται (Εικόνα 12.3). Έτσι λοιπόν επιφανειακά δημιουργείται μια παραμορφωμένη ζώνη η οποία φαίνεται να μην είναι ομοιόμορφη στην εξωτερική επιφάνεια λόγω της διαφορετικής πίεσης που ασκείται στο ενδιάμεσο προϊόν (Εικόνα 12.4). Αποτέλεσμα της πλαστικής παραμόρφωσης είναι η ισχυροποίηση της μικροδομής. Φαίνεται ότι μετά την εν θερμώ σφυρηλάτηση του εξαρτήματος, δεν υπήρξε κάποια επακόλουθη θερμική κατεργασία. Το εξάρτημα απέκτησε μικροδομή προερχόμενη από την εμβαπτότητα του υλικού και το μέγεθος του εξαρτήματος. Το βάθος της πλαστικής παραμόρφωσης αυτής κυμαίνεται από 500-700μm. Στις εκατέρωθεν παράλληλες επιφάνειες του εξαρτήματος έχει γίνει λείανση για αποπεράτωση (Εικόνα 12.5 και Εικόνα 12.6). Παρατηρείται ένα λευκό στρώμα στην επιφάνεια του εξαρτήματος, έξω από την περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης η οποία έχει προέλθει από την υψηλή θερμοκρασία κατά την διαδικασία της αποπεράτωσης. Κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο παρατηρήθηκαν καφέ χρωματισμοί πάνω στην επιφάνεια του ρεκτιφιέ και στα σημεία αυτά υπήρχε πτώση της σκληρότητας του υλικού. Αυτό ωφελείται σε ακατάλληλες συνθήκες κατεργασίας και

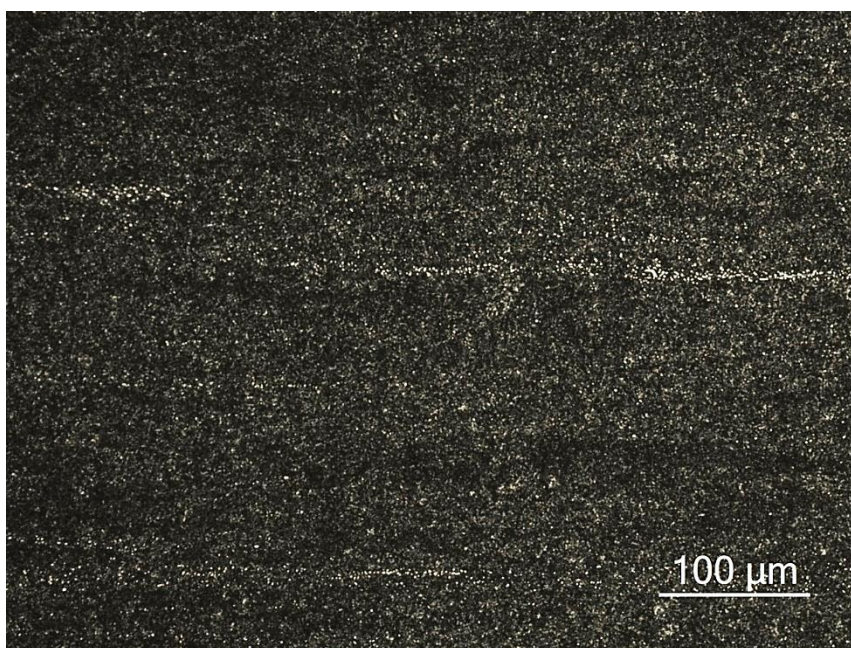
έλλειψη ψύξης η οποία προκάλεσε επαναβαφή του υλικού χωρίς επαναφορά. Το χαμηλό ποσοστό άνθρακα δεν δημιούργησε ρηγματώσεις στο υλικό.

12.2 1st Attempt

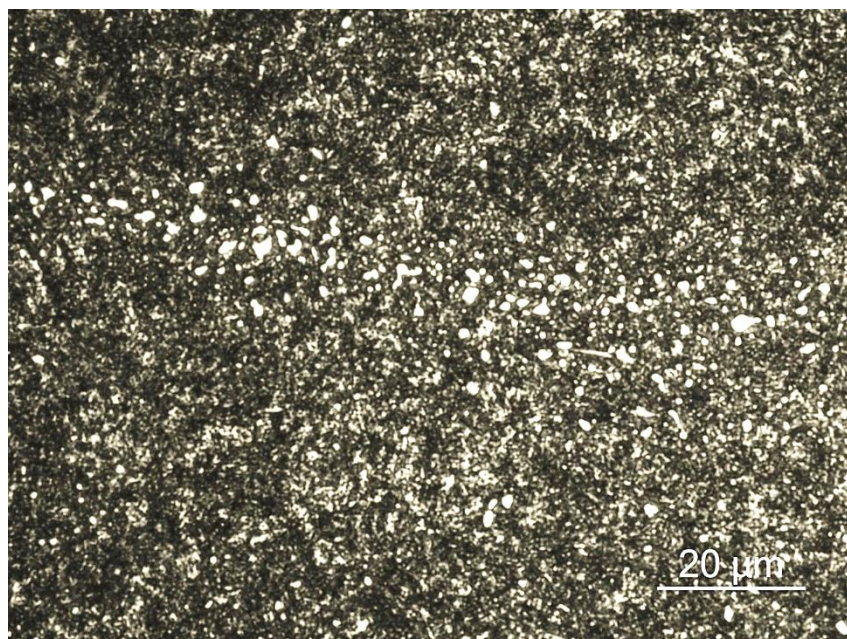
Έγινε προσβολή με Nital 3%, διάλυμα Νιτρικού Οξέος (HNO_3) με Μεθανόλη (CH_3OH) για 21.62 sec και αμέσως μετά τοποθετήθηκε 1 λεπτό για καθαρισμό σε συσκευή υπερήχων.



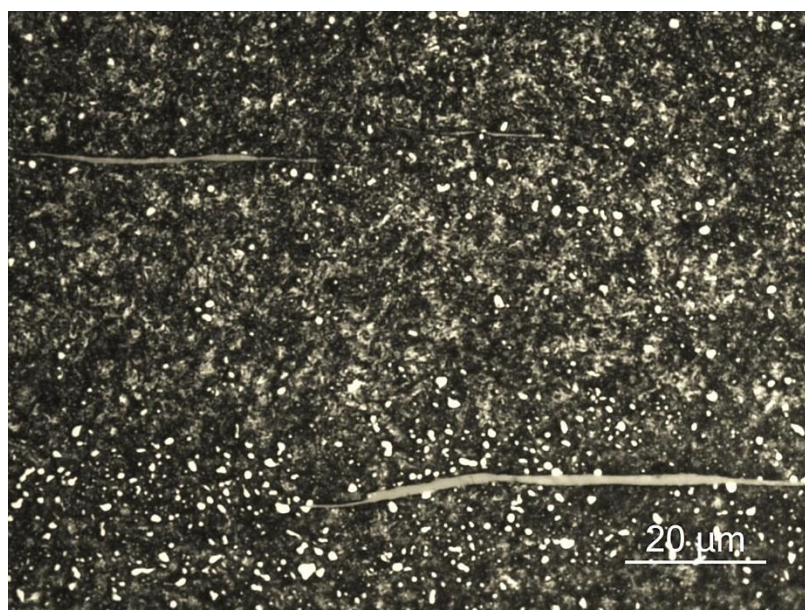
Εικόνα 12.7: Απεικόνιση της δομής του πυρήνα του κινουμένου μέρους (ΔΕ) σε μεγέθυνση $\times 1000$ – συναρμολόγημα 1st Attempt.



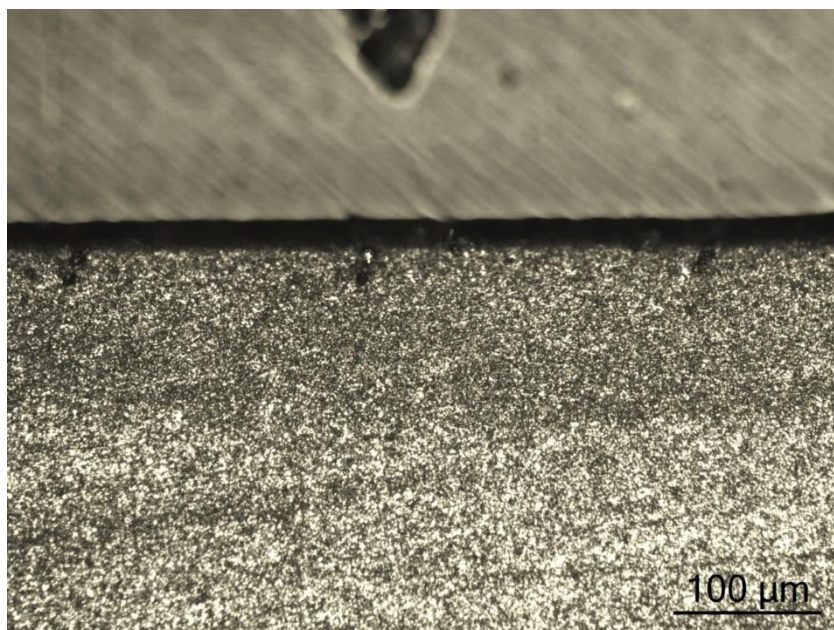
Εικόνα 12.8: Απεικόνιση του μακροδιαφορισμού (Banding) της δομής του κινουμένου μέρους (ΔΕ) σε μεγέθυνση $\times 200$ – συναρμολόγημα 1st Attempt.



Εικόνα 12.9: Απεικόνιση του μακροδιαφορισμού (Banding) της δομής του κινουμένου μέρους (ΔΕ) σε μεγέθυνση x1000 – συναρμολόγημα 1st Attempt.



Εικόνα 12.10: Απεικόνιση των σουλφιδίων του μαγγανίου στην δομή του κινουμένου μέρους (ΔΕ) σε μεγέθυνση x1000 – συναρμολόγημα 1st Attempt.



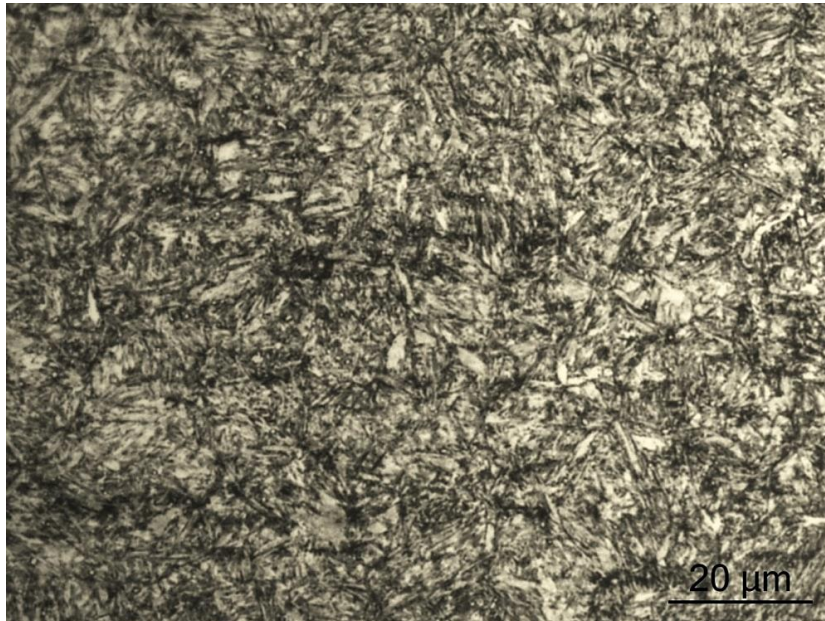
Εικόνα 12.11: Απεικόνιση της επιφάνειας που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση στο κινούμενο μέρος (ΔΕ) σε μεγέθυνση x200 – συναρμολόγηση 1st Attempt.

Η μικροδομή του πυρήνα αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη (Εικόνα 12.7) ενώ υπάρχουν και συγκεντρώσεις πρωτογενών (προευκτοειδών) καρβιδίων Cr και V. Η συγκέντρωση των καρβιδίων σε στρώσεις δημιουργούνται κατά την φορά της έλασης. Το συγκεκριμένο είδος μακροδιαφορισμού (Banding) (Εικόνες 12.8 και 12.9) σχετίζεται με την τοπική διαφοροποίηση στην χημική σύσταση του υλικού κατά στρώσεις. Σε πολλά είδη χαλύβων εργαλείων, το συγκεκριμένο είδος μακροδιαφορισμού είναι αναπόφευκτο λόγω της χημικής σύστασης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η χημική σύσταση δεν δικαιολογεί την ύπαρξη διαφορισμού σε στρώσεις. Ο μακροδιαφορισμός είναι χαρακτηριστικό προβληματικής θερμικής ακολουθίας κατά την διαδικασία της εν θερμώ έλασης του υλικού (θερμοκρασία έλασης – ρυθμός απόψυξης). Η ύπαρξη σουλφιδίων (Εικόνα 12.10) του μαγγανίου (MnS) υποδηλώνει προβλήματα κατά την αποθείωση του υλικού πριν την χύτευση του [47]. Τα σουλφίδια και ο διαφορισμός επηρεάζουν το όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση, τον ρυθμό διάδοσης ρωγμών από κόπωση, την δυσθραυστότητα και την αντοχή σε εφελκυσμό σε διεύθυνση κάθετη στην φορά της έλασης [47]. Στην περιοχή που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση (Εικόνα 12.11) διακρίνονται κατά μήκος της επιφάνειας μικρές ρηγματώσεις οι οποίες προέκυψαν κατά την κατεργασία της, για την απόκτηση των επιθυμητών ανοχών και διαστάσεων. Οι ρηγματώσεις οφείλονται στην επαναβαφή της επιφάνειας κατά την αποπεράτωση λόγω λανθασμένων συνθηκών

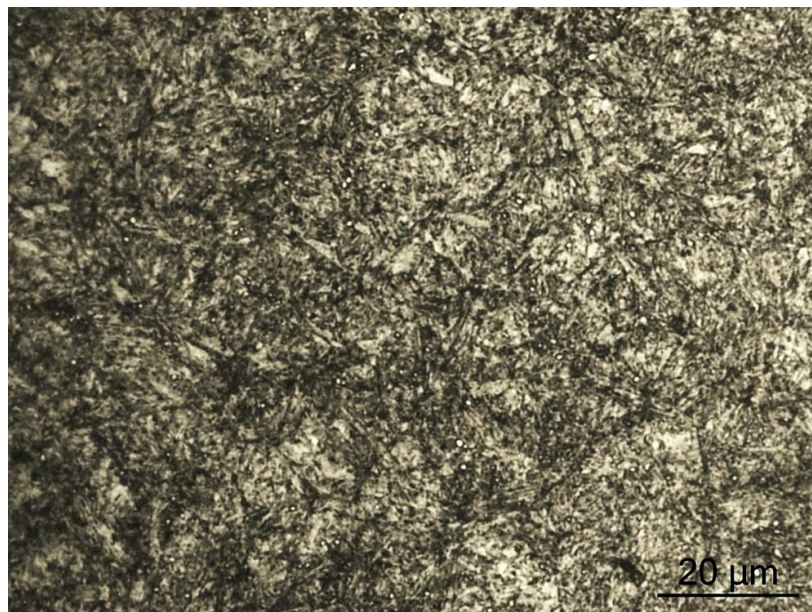
κατεργασίας, αποτέλεσμα των καφέ αποχρώσεων που παρουσίαζε κατά τον οπτικό έλεγχο το συγκεκριμένο εξάρτημα.

12.3 N

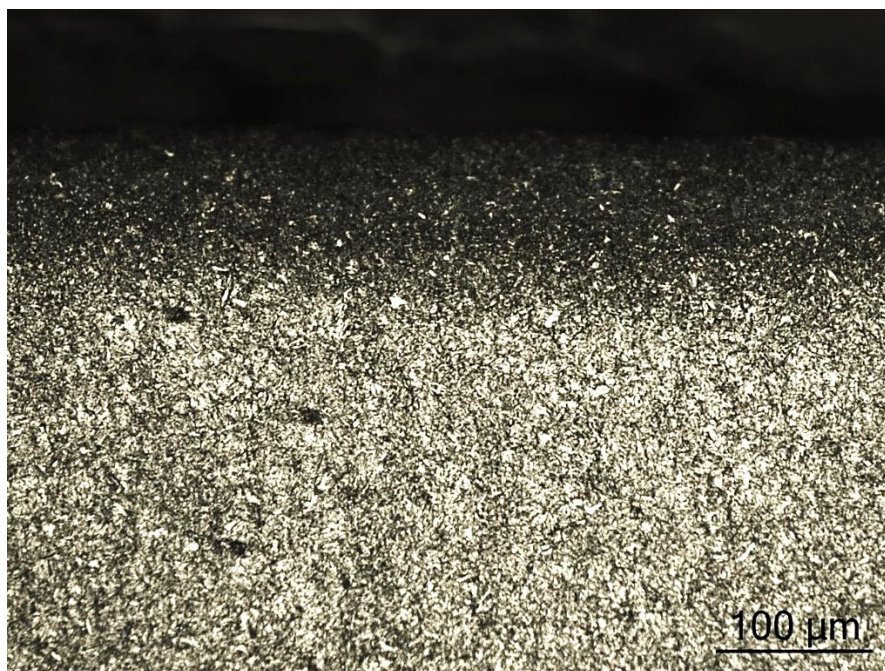
Έγινε προσβολή με Nital 3%, διάλυμα Νιτρικού Οξέος HNO_3 με Μεθανόλη (CH_3OH) για 2 min 05,36 sec και αμέσως μετά τοποθετήθηκε 1 λεπτό για καθαρισμό σε συσκευή υπερήχων.



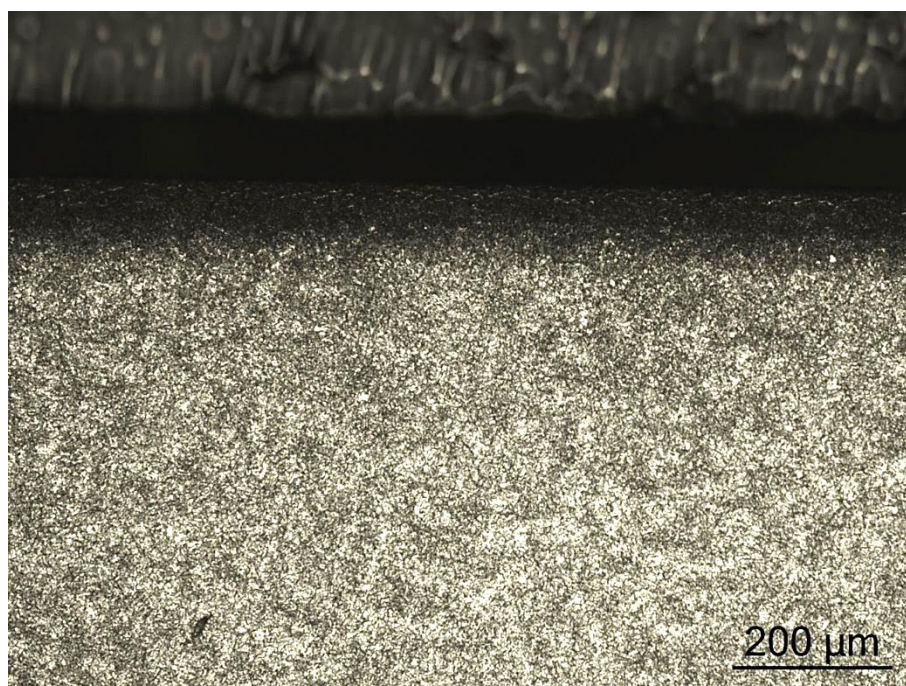
Εικόνα 12.12: Απεικόνιση της μικροδομής του πυρήνα στο κινούμενο μέρος (AP) σε μεγέθυνση x1000 – συναρμολόγημα N.



Εικόνα 12.13: Απεικόνιση της μικροδομής του πυρήνα στο κινούμενο μέρος (AP) σε μεγέθυνση x1000 – συναρμολόγημα N.



Εικόνα 12.14: Απεικόνιση της ζώνης εναζώτωσης στο κινούμενο μέρος (AP) σε μεγέθυνση x200 – συναρμολόγημα N.



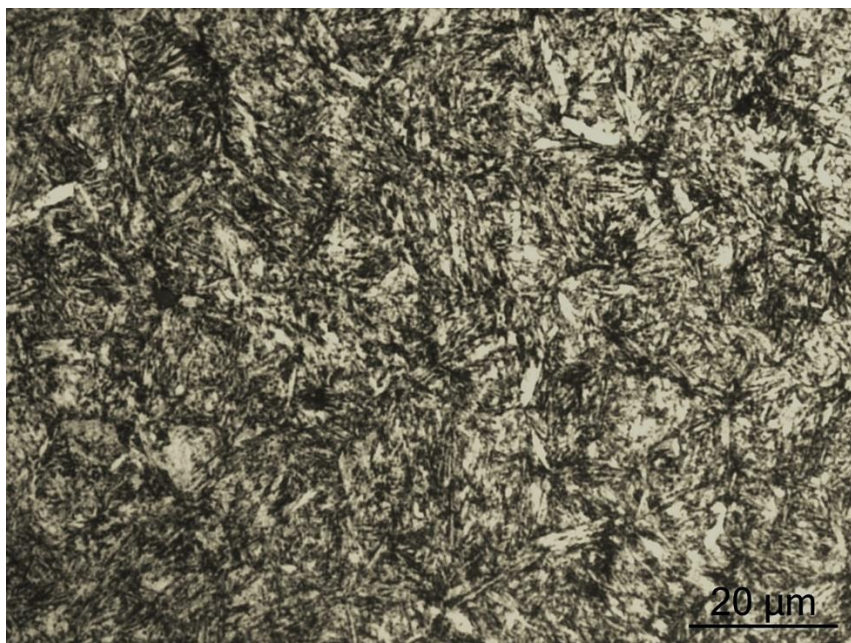
Εικόνα 12.15: Απεικόνιση της επιφάνειας που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση στο κινούμενο μέρος (AP) σε μεγέθυνση x100 – συναρμολόγημα N

Η μικροδομή του υλικού αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη (Εικόνα 12.12). Δεδομένου ότι ο συγκεκριμένος χάλυβας ανήκει στην κατηγορία χάλυβα εργαλείων, καθώς και η ύπαρξη κραματικών στοιχείων όπως το Cr, το V και το Mo ευνοούν επίσης την ύπαρξη καρβιδίων στην δομή του υλικού, τα οποία προσδίδουν μεγάλη αντοχή

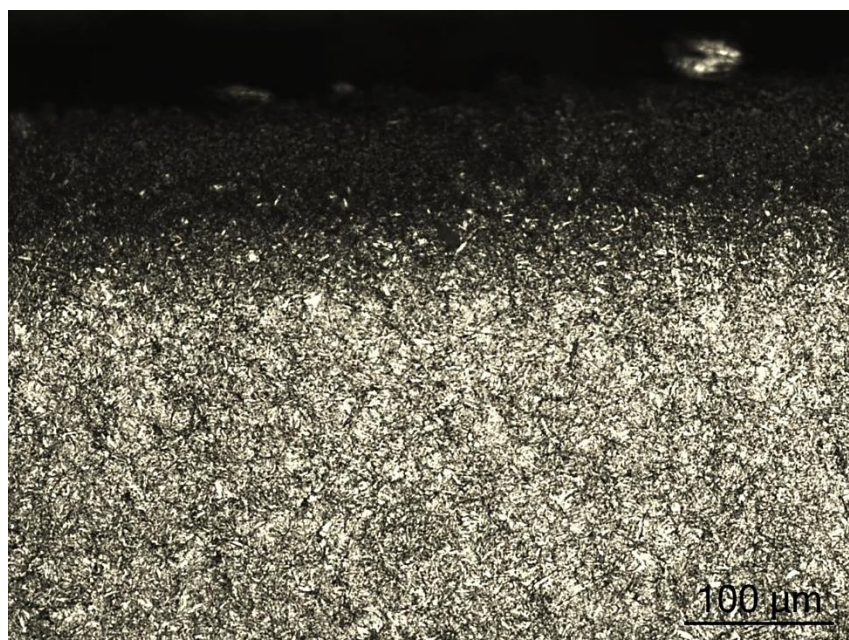
στην τριβή. Στις Εικόνες 12.12 και 12.13 απεικονίζεται πολύ μεγάλη πυκνότητα καρβιδίων. Υπάρχει η πιθανότητα η δομή αυτή να μην έχει προκύψει από συμβατική ακολουθία βαφής και επαναφοράς αλλά μετά από κρυογενή σκλήρυνση. Μετά την πρώτη επαναφορά του υλικού παρατηρείται μια εκ νέου αύξηση της σκληρότητας, η οποία συμβαίνει λόγω μετασχηματισμού του υπολειπομένου οστενίτη καθώς και τη κατακρήμνιση καρβιδίων. Ο παραμένον οστενίτης μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία μη επαναφερμένου μαρτενσίτη κατά την ώρα λειτουργίας του εξαρτήματος, γεγονός που θα οδηγήσει σε τοπική συσσώρευση τάσεων όπου ενθαρρύνουν την έναρξη αστοχίας. Έτσι λοιπόν για να επιτευχθεί η ζητούμενη σκληρότητα πρέπει μετά την πρώτη επαναφορά να ακολουθήσει και δεύτερη και σε μερικές περιπτώσεις και τρίτη, οι οποίες σε συνδυασμό με το ποσοστό του άνθρακα και την υψηλή θερμοκρασία έναρξης μετασχηματισμού του μαρτενσίτη, θα εξαλείψουν τον παραμένον οστενίτη [48]. Κατά την δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης προέκυψε ότι το ενεργό στρώμα εναζώτωσης ανέρχεται στα 150μm γεγονός που επιβεβαιώνεται και κατά την μελέτη μέσω οπτικού μεταλλογραφικού μικροσκοπίου (Εικόνα 12.14). Η ζώνη διαχύσεως έχει βάθος 130 – 140μm ενώ σε βάθος 100μm υπάρχει η ζώνη μετάβασης στην οποία περιορίζεται ο εμποτισμός σε δομή αμιγώς αποτελούμενη από επαναφερμένο μαρτενσίτη. Τέλος, στις δυο εκατέρωθεν παράλληλες πλευρές του κινουμένου μέρους έχει πραγματοποιηθεί λείανση για αποπεράτωση (Εικόνα 12.15) γεγονός που δικαιολογεί και το μειωμένο βάθος της εναζώτωσης στα 100μm (στρώμα που απομακρύνθηκε περίπου 40μm). Η επιφάνεια της αποπεράτωσης χαρακτηρίζεται αρκετά ομοιογενής.

12.4 QT+N1

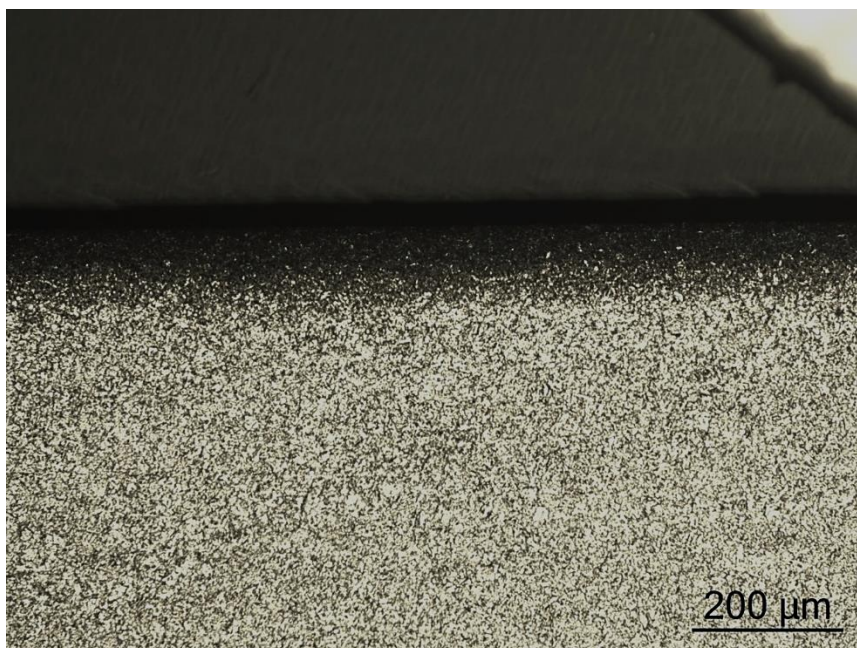
Έγινε προσβολή με Nital 3%, διάλυμα Νιτρικού Οξέος (HNO_3) με Μεθανόλη (CH_3OH) για 2 min 31,27 sec και αμέσως μετά τοποθετήθηκε 1 λεπτό για καθαρισμό σε συσκευή υπερήχων.



Εικόνα 12.16: Απεικόνιση της δομής του πυρήνα κινούμενου μέρους (ΔΕ) σε μεγέθυνση $\times 1000$ – συναρμολόγημα QT+N1.



Εικόνα 12.17: Απεικόνιση της ζώνης εναζώτωσης στο κινούμενο μέρος (ΔΕ) σε μεγέθυνση $\times 200$ – συναρμολόγημα QT+N1.

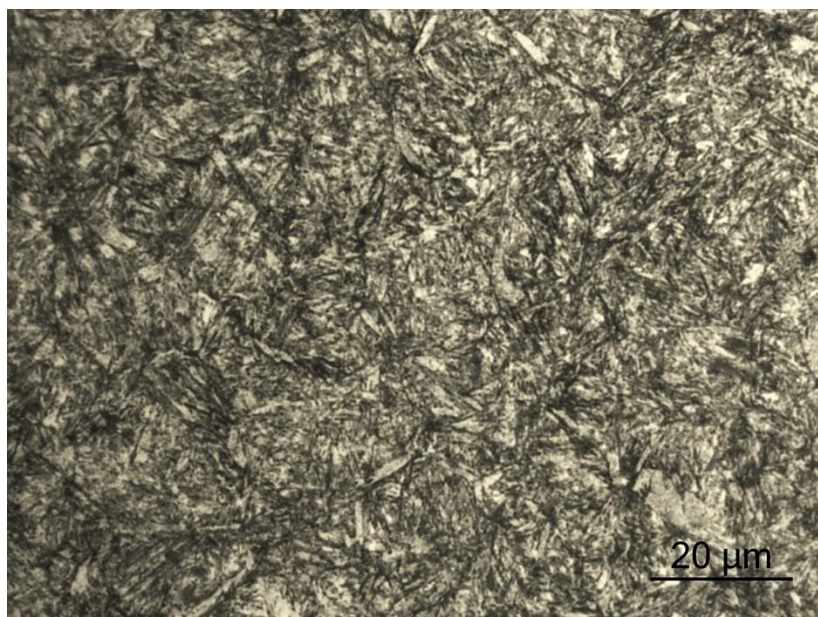


Εικόνα 12.18: Απεικόνιση της επιφάνειας που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση στο κινούμενο μέρος (ΔΕ) σε μεγέθυνση $\times 100$ – συναρμολόγημα QT+N1.

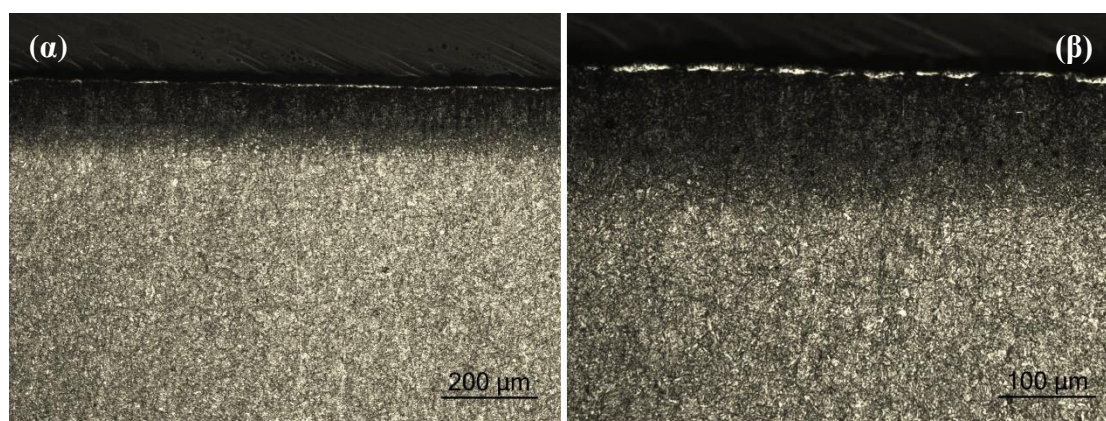
Η μικροδομή του εξαρτήματος αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη (Εικόνα 12.16) ενώ μετά την θερμική κατεργασία μάζας έχει υποστεί επιφανειακή σκλήρυνση με εναζώτωση. Κατά την διαδικασία της μικροσκοπιομέτρησης το βάθος της εναζώτωσης υπολογίζεται στα $150\mu\text{m}$ περίπου. Η οπτική μικροσκοπία δείχνει ότι το συνολικό βάθος της εναζώτωσης κυμαίνεται από $120 - 140\mu\text{m}$ ενώ σε βάθος $100\mu\text{m}$ από την επιφάνεια υπάρχει η ζώνη μετάβασης (Εικόνα 12.17). Στις δυο εκατέρωθεν πλευρές που έχουν υποστεί λείανση για αποπεράτωση (Εικόνα 12.18) το βάθος της ζώνης ενανθράκωσης είναι μειωμένο και ανέρχεται στα $100\mu\text{m}$ ενώ σε όλη την πλευρά παρατηρείται αρκετή ομοιογένεια χωρίς η λείανση να έχει δημιουργήσει ατέλειες στην δομή.

12.5 QT+N2

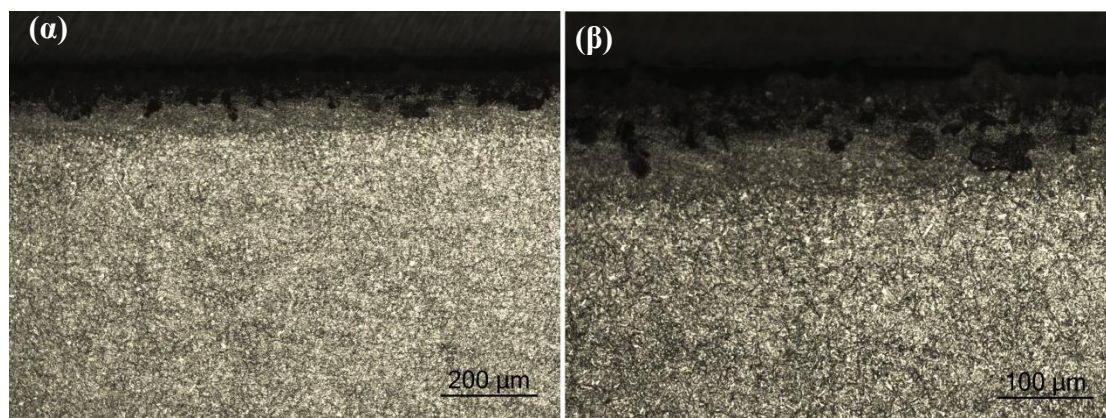
Έγινε προσβολή με Nital 3%, διάλυμα Νιτρικού Οξέος (HNO_3) με Μεθανόλη (CH_3OH) για $1\text{ min } 26,37\text{ sec}$ και αμέσως μετά τοποθετήθηκε 1 λεπτό για καθαρισμό σε συσκευή υπερήχων.



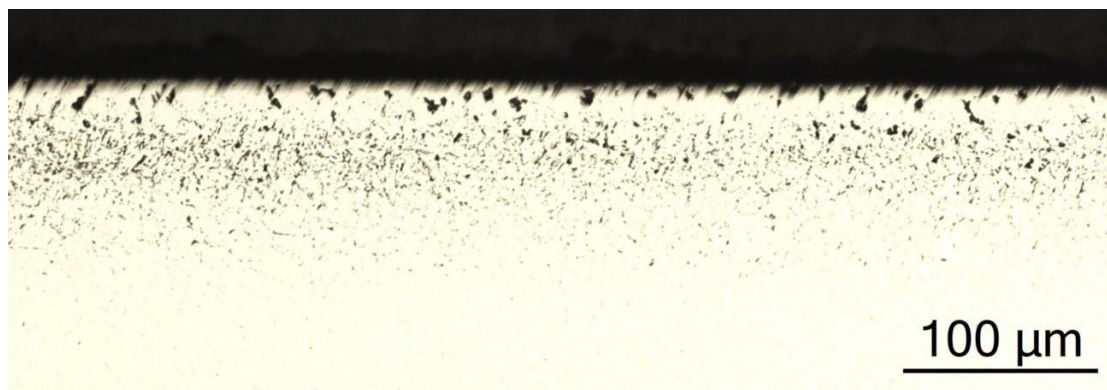
Εικόνα 12.19: Απεικόνιση της δομής του πυρήνα του κινούμενου μέρους (AP) σε μεγέθυνση x1000 – συναρμολόγημα QT+N2.



Εικόνα 12.20: Απεικόνιση της ζώνης εναζώτωσης στο κινούμενο μέρος σε μεγέθυνση x100 αριστερά (α) και σε μεγέθυνση x200 δεξιά (β) – συναρμολόγημα QT+N2.



Εικόνα 12.21: Απεικόνιση της επιφάνειας που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση στο κινούμενο μέρος (AP) σε μεγέθυνση (α) x100, (β) x200– συναρμολόγημα QT+N2.



Εικόνα 12.22: Απεικόνιση της επιφάνειας που έχει υποστεί λείανση για αποπεράτωση στο κινούμενο μέρος (AP) σε μεγέθυνση $\times 200$ χωρίς προσβολή – συναρμολόγημα QT+N2.

Η μικροδομή του εξαρτήματος αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη (Εικόνα 12.19) και ποσοστό καρβιδίων Cr, Mo, V. Το εξάρτημα έχει υποστεί θερμική κατεργασία βαφής και επαναφοράς και κατόπιν επιφανειακή σκλήρυνση με κατεργασία εναζώτωσης (Εικόνα 12.20). Το συνολικό βάθος εναζώτωσης είναι $160\mu\text{m}$ ενώ φαίνεται ότι υπάρχει λευκή ζώνη εναζώτωσης βάθους $3.5\mu\text{m}$. Σε βάθος $100\mu\text{m}$ ξεκινά η ζώνη μετάβασης της εναζώτωσης στην οποία η περιεκτικότητα σε νιτρίδια μεταπίπτει σε δομή επαναφερμένου μαρτενσίτη και μόνο. Στις δυο εκατέρωθεν πλευρές που έχουν υποστεί λείανση για αποπεράτωση παρατηρήθηκαν επιφανειακές ατέλειες (Εικόνα 12.21). Η ζώνη διάχυσης είναι ανέπαφη ενώ από πάνω βρίσκεται ένα στρώμα θερμικά επηρεασμένο. Η συγκεκριμένη επιφάνεια είναι κατεστραμμένη παρουσιάζοντας ρηγματώσεις και αποκολλήσεις. Οι ατέλειες αυτές γίνονται αντιληπτές και στην περίπτωση που δεν υπάρχει χημική προσβολή της επιφάνειας. Διακρίνονται πολλές ρηγματώσεις λόγω της αποπεράτωσης στην ψαθυρή επιφάνεια της εναζώτωσης (Εικόνα 12.22).

13. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

A. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κινούμενο εξάρτημα

- Έχει πολύπλοκη γεωμετρία, χωρίς να έχει αυξημένες απαιτήσεις διαστάσεων εκτός των δυο εκατέρωθεν πλευρών στο κυρίως σώμα που έχουν υποστεί αποπεράτωση. Με βάση αυτό και με σκοπό την μείωση του κόστους παραγωγής του εξαρτήματος επιδιώχθηκε να κατασκευασθεί με εν θερμώ σφυρηλάτηση (Parent Assembly). Οι κατηγορίες χαλύβων που μπορούν να ανταποκριθούν στη συγκεκριμένη κατεργασία μορφοποίησης είναι περιορισμένες και ως προς την χρήση τους, ανήκουν στην κατηγορία των χαλύβων κατασκευών. Η επιλογή ενός τέτοιου υλικού υστερεί στις κρίσιμες ιδιότητες που απαιτούνται για την συγκεκριμένη εφαρμογή όπως η αντοχή στην τριβή, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται η χρήση χάλυβα εργαλείων αφού η εφαρμογή αφορά εργαλείο υψηλών επιδόσεων. Έτσι το υλικό που προέβλεπε ο αρχικός σχεδιασμός αστόχησε σε συνδυασμό με την πολύ κακή χρήση που έγινε κατά τις συνθήκες λειτουργίας.
- Έχει αυξημένες απαιτήσεις κατά τη συναρμολόγησή του, οι οποίες έγιναν αντιληπτές στην πρώτη προσπάθεια (1st Attempt), έτσι κατασκευάστηκε ένα εξάρτημα όπου απαιτήθηκαν συγκεκριμένες διαστάσεις στις παράλληλες πλευρές στο κυρίως σώμα των κινουμένων μερών του συναρμολογήματος. Οι πλευρικές επιφάνειες του κυρίως σώματος έχουν υποστεί λείανση για αποπεράτωση. Χρησιμοποιήθηκε χάλυβας εργαλείων O2 κατά AISI, υλικό το οποίο εξασφαλίζει μέσω θερμικής κατεργασίας μεγαλύτερη αντοχή στην τριβή σε σχέση με το αρχικά επιλεγμένο υλικό του αρχικού σχεδιασμού. Παρόλα αυτά, η κακή συναρμογή των δυο κινούμενων σιαγόνων, τις έφθειρε σημειακά καθώς και συνέργησε με τις ατέλειες της δομής (μακροδιαφορισμός, σουλφίδια) στην ολική θραύση. Μεγαλύτερη αντοχή στην τριβή θα μπορούσε να επιτευχθεί με άλλο χάλυβα εργαλείων για εν ψυχρώ εφαρμογές. Η δυσθραυστότητα αποτελεί επίσης κύρια ιδιότητα για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Ο συγκεκριμένος χάλυβας παρουσιάζει χαμηλή δυσθραυστότητα στην περιοχή της σκληρότητας λειτουργίας του εξαρτήματος. Η χαμηλή δυσθραυστότητα συνέργησε επίσης στην ολική θραύση του. Αυτή είναι η αιτία δημιουργίας εκλεπίσεων που παρατηρήθηκε στη σιαγόνα στη πρώτη λύση που προτάθηκε.

- Έχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων και η φόρτιση είναι πολυαξονική στην περιοχή της σιαγόνας όπου γίνεται η διαμόρφωση. Οι τρεις επόμενες περιπτώσεις (N, QT+N1, QT+N2) που εξετάστηκαν ουσιαστικά ενσωματώνονται σε μια πρόταση. Χρήση χάλυβα εργαλείων υψηλής δυσθραυστότητας μετά από θερμική κατεργασία και επιφανειακή κατεργασία εναζώτωσης. Η πολυπλοκότητα της κατανομής των τάσεων και η τάξη μεγέθους τους σε κάθε πάτημα οδήγησε στην εκλέπιση του στρώματος. Στο εσωτερικό της αυλάκωσης παρατηρούνται γραμμές φθοράς από το μεταλλικό έλασμα, ενδεικτικό του ότι φθορά αναμένεται ακόμη και σε στρώμα της τάξεως των 900-1000HV. Στο παρόντα σχεδιασμό του εξαρτήματος, η επαφή της σιαγόνας με το μεταλλικό έλασμα στην περιοχή της αυλάκωσης φαίνεται να είναι αναγκαία ώστε να ολοκληρωθεί η διαμόρφωση, αφού συμμετέχει στη συγκράτησή του. Η ύπαρξη διαφορετικής, χαμηλότερης σκληρότητας υπόβαθρου δεν ευνοεί την αντοχή στη φθορά του εργαλείου. Έτσι, η λύση θα πρέπει να ενσωματώνει υλικό που να υποστεί σκλήρυνση χωρίς επακόλουθως επιφανειακή κατεργασία εμποτισμού.
- Το συναρμολόγημα, που αποτελεί ένα πολύπλοκο εξάρτημα, χρειάστηκε να περάσει από αρκετές διαδοχικές προτάσεις. Η μελέτη του δεν πραγματοποιήθηκε στο τμήμα σχεδιασμού της κατασκευάστριας εταιρείας όπου και θα έπρεπε αλλά το πρόβλημα λύθηκε στο πεδίο, κατά τη χρήση. Η εταιρεία κατασκευής του μηχανήματος δεν καθόρισε προδιάγραφες επίδοσης στον πελάτη. Αποτελεί συχνό φαινόμενο ώστε να εξασφαλίζεται χαμηλότερη τιμή στο μηχάνημα, αφού τα έξοδα σχεδιασμού και μελέτης δεν θα επιβαρύνουν το κόστος του. Υπενθυμίζεται ότι η συγκεκριμένη μελέτη δεν αφορά τη βελτίωση της λειτουργίας του εξαρτήματος αλλά την ανάπτυξη αξιόπιστης λύσης.
- Το εξάρτημα θα πρέπει να υποστεί αποπεράτωση στην επιφάνεια εντός της αυλάκωσης στη σιαγόνα για την ελαχιστοποίηση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων τριβής.
- Οι εκλεπίσεις που απεικονίζονται στην μακροκλίμακα (έως x50), είναι αποτέλεσμα εφαρμογής φόρτισης τέτοιας τάξης μεγέθους και κατανομής με αποτέλεσμα να ξεπεραστεί το όριο αντοχής σε κόπωση του στρώματος της

εναζώτωσης. Οι αποκολλήσεις όπου απεικονίζονται στη μικροκλίμακα (έως x230) είναι αποτέλεσμα συνένωσης των αρχικών ρηγματώσεων.

Μικροσκληρομέτρησεις

- Ομοιογένεια σκληρότητας στον πυρήνα και στις πέντε περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις ήταν αποτέλεσμα θερμικής κατεργασίας σε όλη τη μάζα των εξαρτημάτων.
- Το βάθος της ισχυροποίησης της δομής που προήλθε από την σφυρηλάτηση στην περίπτωση του Parent Assembly δεν μπορεί να δώσει υψηλές επιδόσεις στη διάρκεια λειτουργίας του εξαρτήματος. Υψηλοί ρυθμοί φθοράς.
- Το στρώμα εναζώτωσης είναι αποδεκτό ως προς το βάθος και τη σκληρότητά του. Η ακολουθία επιβελτίωσης και εναζώτωσης ήταν επαναλήψιμη στα δοκίμια N, QT+N1 και QT+N2.

Οπτική Μικροσκοπία

- Η μεταλλογραφική ανάλυση του 1st Attempt τεκμηρίωσε την ολική θραύση της κεφαλής της σιαγόνας η οποία οφείλεται στην ύπαρξη μακροσκοπικών ατελειών στην δομή του υλικού κατά την παρασκευή του.
- Παρουσιάζεται διαφοροποίηση στην πυκνότητα καρβιδίων στην περίπτωση του N σε σχέση με τα QT+N1 και QT+N2. Ίσως το N να έχει προέλθει από κρυογενή σκλήρυνση.
- Οι συνθήκες κατεργασίας αποπεράτωσης στις δύο παράλληλες πλευρές ήταν ακατάλληλες με αποτέλεσμα τις ρηγματώσεις στο 1st Attempt, τη λευκή ζώνη στο Parent Assembly και τις ρηγματώσεις στο QT+N2. Οι επιφάνειες αυτές, όντας θερμικά επηρεασμένες, ελαττώνουν τη διάρκεια λειτουργίας του εξαρτήματος. Η τυχαιότητα των φορτίσεων σε συνδυασμό με τις δημιουργούμενες ρηγματώσεις μπορεί να οδηγήσει στην έναρξη θραύσης της ακμής, στις περιοχές διαμόρφωσης της εφελκυστικής ίνας του μεταλλικού ελάσματος.

Προτάσεις

Η επιλογή του υλικού Uddeholm UNIMAX αποτελεί μια ενδεδειγμένη λύση διότι πρόκειται για ένα χάλυβα εργαλείων υψηλής δυσθραυστότητας που ταυτόχρονα

εξασφαλίζει ικανοποιητική αντοχή στη φθορά κατά την διαμόρφωση του επίπεδου ελάσματος.

Η λύση που προτείνεται είναι η χρήση του χάλυβα Uddeholm UNIMAX μετά από ολική σκλήρυνση στα 57/58 HRC, χωρίς εναζώτωση.

Θα πρέπει να ανασκοπηθεί η γεωμετρία του εξαρτήματος, ειδικά στην περιοχή της αυλάκωσης ώστε να διαπιστωθεί η αναγκαιότητα επαφής του ελάσματος με το εργαλείο.

B. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Υπάρχει η δυνατότητά περαιτέρω έρευνας της αστοχίας με τους εξής τρόπους:

- Μελέτη της ζώνης αποπεράτωσης, της πλαστικής παραμόρφωσης (Parent Assembly) και της μικροδομής των N, QT+N1, QT+N2 μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας SEM (Scanning Electron Microscopy).
- Διερεύνηση της πιθανότητας το συναρμολόγημα του N να έχει προκύψει από κρυογενή βαφή συγκρίνοντας τη μικροδομή του με τα αντίστοιχα των περιπτώσεων QT+N1 και QT+N2.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W.T. Becker and R.J. Shipley (2002). ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention. 10th ed. United States of America: ASM International, p.
- [2] Hani M. Tawancy, Anwar Ul-Hamid, Nureddin M. Abbas. (2004) Practical Engineering Failure Analysis. New York: Marcel Dekker Inc., p. 15 – 16
- [3] Heinz P. Bloch Fred K. Geitner (2012). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, p 111-112.
- [4] K. Stein, Π. Μακρής. (1993). Ανάλυση μηχανολογικών καταστροφών. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, p 16.
- [5] Aquil Ahmad and Leonard J. Bond. (2018). ASM Handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation of Materials. 10th ed. Ohio: ASM International, p 155.
- [6] R.S. Dahiya, M. Valle (2012). Robotic Tactile Sensing: Technologies and System. San Diego California. p. 195-196. Available at: file:///D:/Downloads/2013_Bookmatter_RoboticTactileSensing.pdf (Last accessed: 07/10/2020)
- [7] NDT Resource Center. MPI – Basic Principles. Available at: <http://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Introduction/basicprinciples.htm> (Last accessed (25/03/2019)
- [8] ECE Global. Dye Penetrant Testing (DPI). Available at: <http://www.eceglobal.com/services/inspection-approvals/non-destructive-examination-nde/penetrant-testing-pt/> . (Last accessed 25/03/2019)
- [9] ATC Aerial Testing Company. Ultrasonic Inspection. Available at: <http://aerialtesting.com/testing-services/aerial-device-testing/nondestructive-tests/52-ultrasonic-inspection> . (Last accessed 25/03/2019).
- [10] Wikipedia The Free Encyclopedia. Industrial radiography. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_radiography . (Last accessed: 26/03/2019).
- [11] Integrity Diagnostics. Introduction to Acoustic Emission. Available at: <http://www.idinspections.com/acoustic-emission-phenomenon/> . (Last accessed: 26/03/2019).
- [12] Curtiss – Wright IMR test labs. Tensile Testing. Available at: <https://www.imrtest.com/tests/tensile-testing> . Last accessed (26/03/2019).
- [13] Nist Fatigue and Fracture Group. Izod. Available at: <https://www.nist.gov/mml/acmd/structural-materials-group/izod> (Last accessed: 26/03/2019).

- [14] Quora. Tensile Straght, Materials Science and Engineering. Available at: <https://www.quora.com/What-kind-of-fracture-has-occured-in-the-tensile-specimen> (Last accessed: 26/03/2019).
- [15] Arcca Exprerts in Forensic, Scientific & Engineering Solutions. Ductile v. Brittle Fracture – The first thing forensic scientists look for in a materials failure. Available at: <https://arcca.com/ductile-v-brittle-fracture-the-first-thing-forensic-scientists-look-for-in-a-materials-failure/> (Last accessed: 26/03/2019).
- [16] Terence Bell. Alloying elements in steel. (2014). Available at: <https://bit.ly/3jIHav2> . (Last accessed: 26/03/2019).
- [17] World Steel Asociation. About Steel. Available at: <https://www.worldsteel.org/about-steel.html> (Last accessed: 26/03/2019).
- [18] World Steel Asociation. Sustainability. Available at: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainability/Sustainable-Steel--Indicators-2018-and-industry-initiatives/steel-value-chain.html> (Last accessed: 26/03/2019).
- [19] Πέτρος Γ. Πετρόπουλος (1997). Μεταλλουργία. Αθήνα: Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, p 105.
- [20] Κωσταντίνος Γ. Πασπάλας (2009). Ευρωπαϊκή τυποποίηση των χαλύβων και χυτοσιδήρων. Available at: http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/TYPOPOIHSH_XALYBON.pdf (Last accessed: 1/4/2019)
- [21] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής (1996). Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου. p. 481
- [22] Πολυτεχνείο Κρήτης. Σιδηρούχα κράματα. Available at: http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROU_XA%20KRAMATAw.pdf . (Last accessed: 1/4/2019).
- [23] Otai Special Steel. AISI M3 CLASS1 High Speed Tool Steel China suppliers. Available at <http://www.otasteel.com/products/high-speed-steel/aisi-m3-class1/> (Last accessed: 1/4/2019).
- [24] Carbide and Diamond Tooling. Cutting Tools, High Speed Steel, Cobalt. Available at: <https://www.carbideanddiamondtooling.com/high.speed.steel.cobalt.powdered.metal.tooling> . Last accessed (1/4/2019).
- [25] Posco Thainbox. Applications. Available at: http://www.poscothainox.com/en/product_application.php . Last accessed (1/4/2019).
- [26] Production Engineering Solutions. Software improves blisk and turbine blade machining. Available at: <https://www.pesmedia.com/software-improves-blisk-and-turbine-blade-machining/> . (Last accessed: 1/4/2019).

- [27] METLABS, METALLURGICAL SERVICES A[55]ND CAPABILITIES, Chemical Analysis. Available at: <http://metlabsaust.com.au/metallurgical-services-and-capabilities/> (Last accessed 1/4/2019).
- [28] Vac Aero, Martensite and the Control of Retained Austenite. Available at: <https://bit.ly/30GLaET> (Last accessed: 1/4/2019).
- [29] ResearchGate, Fig13 by S.M. Walley. Available at https://www.researchgate.net/figure/Troostite-sorbite-structure-one-band-developed-after-annealing-at-400C-Steel-with_fig8_266560669 (Last accessed: 1/4/2019).
- [30] Jon L. Dossett, George E. Totten (2013). ASM Handbook Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. 10th ed. United States of America: ASM International, p. 881
- [31] ThreePlanes, Martensite. Available at: <http://threeplanes.net/martensite.html> (Last accessed: 1/4/2019).
- [32] ThreePlanes, Tempered Martensite. Available at: <http://threeplanes.net/tmartensite.html>. (Last accessed:1/4/2019).
- [33] Quora, the microstructure of a tempered martensite. Available at: <https://www.quora.com/What-is-the-microstruture-of-a-tempered-martensite> (Last accessed: 1/4/2019).
- [34] Emilia Skoek, Krzysztof Wasiak, Wieslaw A. Swiatnicki (2014). STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE CARBURISED SURFACE LAYER ON 35CrSiMn5-5-4 STEEL AFTER NANOSTRUCTURIZATION TREATMENT. Warsaw, Poland. Available at <https://bit.ly/3daczbp0> . (Last accessed: 1/4/2019).
- [35] R. Gorockiewicz, A. Adamek, M. Korecki. Steels for Vacuum Carburizing and Structure of the Carburizing Layer after Low Pressure Carburizing. Poland. Available at <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.567.7091&rep=rep1&type=pdf> (Last accessed: 1/4/2019).
- [36] Industrial Heating. Principles of Gas Nitriding: The Nitriding Process (Part 1). Available at: <https://www.industrialheating.com/articles/89998-principles-of-gas-nitriding-the-nitriding-process-part-1?v=preview> (Last accessed: 1/4/2019).
- [37] Wikipedia The Free Encyclopedia. Packaging and Labeling. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Packaging_and_labeling . (Last accessed: 04/08/2020).
- [38] Your Article Library. What is Packaging? Article Shared by Shikha S. Available at: <https://www.yourarticlelibrary.com/marketing/marketing-management/packaging-and-branding/what-is-packaging/99721> (Last accessed: 04/08/2020).
- [39] WebstaurantStore. Heat Seal Wp-20 Single 20” Roll Film Wrapping Machine. Available at: <https://www.webstaurantstore.com/heatseal-wp-20-b-single-20-roll-film-wrapping-machine-132w-115w/813WP20B.html> . (Last Accessed: 04/08/2020).

- [40] India Mart. Automatic Pallet Wrapping Machine. Available at: <https://www.indiamart.com/proddetail/pallet-wrapping-machine-9274265073.html> . Last Accessed (04/08/2020).
- [41] YouTube. Sealing Steel Strapping with the Seal less Combination Tool from Associated Bag. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=Vt35hA248qA> (Last accessed: 07/08/2020).
- [42] ChinaSuperWorker. Automotive Steel Strapping Machine Packing Cold Steel Coil. Available at: <https://chinasuperworker.com/portfolio/auto-steel-coil-strap-packing/automotive-strapping-machine-packing-cold-coiled-steel-coil/>. (Last Accessed: 07/08/2020).
- [43] YouTube. Automatic Steel Strapping Machine. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=SSET95r5dxE> . (Last accessed: 07/08/2020).
- [44] ASTM E415-17: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.
- [45] Sarkina. Types of Strapping Joints. Available at: <https://www.sarkina.com/blog/post/types-of-strapping-joints> (Last accessed: 08/09/2020).
- [46] ZEISS. Axio Vert.A1 MAT. Available at <https://www.micro-shop.zeiss.com/en/us/system/axio+vert-axio+vert.a1+mat-inverted+microscopes/10255/> (Last accessed: 08/09/2020).
- [47] Joseph Maciejewski. 20 February 2015. The Effects of Sulfide Inclusions on Mechanical Properties and Failures of Steel Components. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-015-9940-9> (Last accessed: 23/09/20).
- [48] David Pye. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing (2003). ASM International. Available at: https://books.google.gr/books?id=5MJiR29ArTYC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false . (Last accessed: 25/09/2020).
- [49] MACHINESEEKER Ireland. Wolper dia testor 2 rc. Available at: <https://www.machineseeker.ie/mss/wolpert+dia+testor+2+rc> (Last Accessed: 26/09/20).
- [50] CORROSIONPEDIA. Metal Spalling. 11 March 2016. Available at: <https://www.corrosionpedia.com/definition/2350/metal-spalling> . (Last accessed: 05/10/2020)
- [51] UDDEHOLM TOOL STEEL FOR PVD COATINGS. Available at: https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/12/2020/07/Tech_Uddeholm_PVD_Coating-ENG-02-2020.pdf . (Last Accessed: 05/10/2020).

[52] Otai Special Steel. AISI O2 Tool Steel 1.2842 | 1.2842 | 90MnCrV8 | BO2 Steel. Available at <https://www.astmsteel.com/product/aisi-o2-steel-tool/> (Last Accessed: 05/10/2020).

[53] Equivalent Materials. AISI O2. Available at: <https://equivalentmaterials.com/materials/aisi-o2> . (Last Accessed: (05/10/2020).

[54] Otai Special Steel. AISI 4340 Steel | 36CrNiMo4 | 1.6511. Available at: <https://www.astmsteel.com/product/4340-steel-aisi/> . (Last accessed: 05/10/2020).

[55] Fujio Abe, Torsten-Ulf Kern, R. Viswanathan. (2008) Creep-Resistant Steels. Electroslag Remelting (ESR) Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/electroslag-remelting> . (Last accessed: 05/10/2020).

[56] Uddeholm Unimax. Available at: https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2017/11/Uddeholm_unimax-eng-p-1710-e7.pdf . (Last Accessed: 05/10/2020).

[57] ASTM, “E140-05e1 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 03.01, (2006).

[58] Ispatguru. Nitriding Process and Nitriding Steels. Available at: <https://www.ispatguru.com/nitriding-process-and-nitriding-steels/> (Last accessed: 07/10/2020).