

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥ
ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΕΑ
ΜΕΡΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΑΝΥΨΩΣΗΣ**

Δημόπουλος Ιωάννης του Νικολάου
Α.Μ.: 43072

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

Αθήνα, Οκτώβριος, 2020

Δήλωση ακαδημαϊκής ακεραιότητας

Ο υπογράφων υπεύθυνα δηλώνει ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Ανάλυση αστοχίας οδοντωτού στροφείου υδραυλικού περιστροφέα, μέρος μηχανημάτων ανύψωσης», είναι αποκλειστικά δική του εργασία και ότι αν υπάρχουν αποσπάσματα κειμένου, εικόνες, πίνακες και διαγράμματα από βιβλία, επιστημονικά άρθρα, εισηγήσεις/παρουσιάσεις σε συνέδρια, σε ηλεκτρονική ή έντυπη μορφή, από σελίδες του διαδικτύου ή άλλες πηγές, όλες αυτές περιλαμβάνονται και αναγράφονται λεπτομερώς στις βιβλιογραφικές αναφορές.

(Υπογραφή)

Δημόπουλος Ν. Ιωάννης

Το πρωτότυπο αντίτυπο φυλάσσεται στην βιβλιοθήκη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Η αντιγραφή, η διανομή, η αναπαραγωγή και η παρουσίαση οποιουδήποτε μέρους της εργασίας ή των παράγωγων έργων που βασίζονται σε αυτή, με οποιοδήποτε μέσο, επιτρέπεται μόνον υπό την προϋπόθεση της πλήρους αναφοράς των στοιχείων της εργασίας.

*Αδράνεια η μητέρα όλων των δεινών.
Μην αφήνεις τις μέρες σου χωρίς ουσία να φεύγουν.
Όταν η ψυχή το θέλει, το σώμα θα ακολουθεί.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την πρόωρη αστοχία ενός οδοντωτού στροφείου, μέρους υδραυλικού κινητήρα εσωτερικής οδόντωσης. Το εξάρτημα αστόχησε σε λιγότερο από τρεις μήνες λειτουργίας, παρουσιάζοντας εκτενή σημάδια φθοράς στην επιφάνειά του. Ο εν λόγω υδραυλικός κινητήρας χρησιμοποιείται για τη περιστροφή κατάλληλα προσαρμοσμένης αρπάγης.

Για τις ανάγκες της εργασίας πραγματοποιήθηκε μακροσκοπικός και μικροσκοπικός έλεγχος του εξαρτήματος, σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία του τεχνικού εγχειριδίου «Failure Analysis and Prevention» του εκδοτικού οίκου ASM. Κατά την μικροσκοπική ανάλυση εφαρμόστηκαν μη καταστρεπτικές τεχνικές (οπτική επισκόπηση, χημική ανάλυση, σκληρομέτρηση) καθώς και καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου (μικροσκληρομέτρηση, οπτική μικροσκοπία).

Σκοπός της εργασίας είναι η εύρεση των κύριων αιτιών που οδήγησαν στην πρόωρη αστοχία του εξαρτήματος, μέσα από την κατανόηση των μηχανισμών και τον προσδιορισμό των συνθηκών φθοράς που προέκυψαν από τη σύμπλεξη. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των τελικών συμπερασμάτων και της πρότασης διορθωτικών ενεργειών για την αποφυγή παρόμοιων περιπτώσεων στο μέλλον.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση Αστοχίας, Μηχανισμός Φθοράς, Οπτική Μικροσκοπία, Εναζώτωση, Ρευστοδυναμικοί Κινητήρες, Υδραυλικός Κινητήρας Εσωτερικής Οδόντωσης με Ενδιάμεσο Οδοντωτό Δαχτυλίδι, Εσωτερικός Οδοντωτός Τροχός - Ρότορας

ABSTRACT

This thesis deals with the premature failure of a toothed rotor part of a hydraulic motor. The rotor has failed in less than three months of operation presenting extensive wear signs. This hydraulic motor constitutes part of the lifting crane subassembly, which is used for the attachment grabber rotation. Part's macroscopic and microscopic examination was held according to the proposed procedure of technical manual of the publishing house ASM. During the microscopic examination were applied non destructive tests (visual overview, chemical analysis) and destructive tests (micro - hardness measurement, optical microscopy). The aim of that thesis is to locate the main causes of the following failure through the mechanisms interpretation and situation identification of wear arising from the engagement. Analysis is completed with the final conclusions presentation and the solving suggestions for future prevention.

Key words: Failure Analysis, Wear Analysis, Optical Microscopy, Nitriding, Hydraulic Motors, Internal Tooth Hydraulic Motor with the Floating Outer Ring, Inner/Internal or Planetary Rotor - Gerotor

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την πρόωρη αστοχία ενός οδοντωτού στροφείου, μέρους υδραυλικού κινητήρα εσωτερικής οδόντωσης. Ο εν λόγω υδραυλικός κινητήρας αποτελεί μέρος ανυψωτικής μηχανής και χρησιμοποιείται για την περιστροφή κατάλληλα προσαρμοσμένης αρπάγης. Η ανάλυση αστοχίας πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό των καταστάσεων φθοράς στο εξάρτημα και των χαρακτηριστικών του εναζωτωμένου στρώματος και του υλικού βάσης. Στο πλαίσιο της εργασίας γίνεται εφαρμογή μη καταστρεπτικών και καταστρεπτικών τεχνικών ελέγχου προκειμένου να εντοπιστούν τα κύρια αίτια της φθοράς που οδήγησαν στην πρόωρη αστοχία του εξαρτήματος. Οι τεχνικές αυτές είναι η οπτική επιθεώρηση, η μικροσκληρομέτρηση, η χημική ανάλυση και η οπτική μικροσκοπία. Μέσα από την διαδικασία της ανάλυσης ελέγχεται η μορφολογία, το βάθος, το πάχος των επιμέρους ζωνών, το προφίλ σκληρότητας και η μικροδομή του εναζωτωμένου στρώματος, καθώς επίσης η σκληρότητα και η μικροδομή του υλικού βάσης.

Η δομή της εργασίας χωρίζεται στο θεωρητικό και στο πειραματικό μέρος. Το θεωρητικό μέρος πλαισιώνεται από τρία κεφάλαια, τα οποία αναφέρονται στην αστοχία των υλικών, στα μεταλλικά υλικά και στις ρευστοδυναμικές μηχανές. Το πειραματικό μέρος αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια, στα οποία παρουσιάζεται το ιστορικό και τα χαρακτηριστικά του προς μελέτη εξαρτήματος, τα δεδομένα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την μικροσκοπική και μακροσκοπική ανάλυση.

Το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε με τον εξοπλισμό του εργαστηρίου του Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού πραγματοποιήθηκε από τον εργαστηριακό υπεύθυνο Παπαγεωργίου Δημήτριο και από τους έμπειρους εργαστηριακούς βοηθούς Δραγάτση Αρσένιο και Ραχούτη Ιωάννη. Συγκεκριμένα ο συντονισμός, η προετοιμασία των δοκιμίων και η οπτική μικροσκοπία πραγματοποιήθηκε από τον κ. Παπαγεωργίου Δημήτριο. Η διεξαγωγή των μικροσκληρομετρήσεων πραγματοποιήθηκε από τον Δραγάτση Αρσένιο και μέρος της λείανσης και της στίλβωσης υλοποιήθηκε από τον Ραχούτη Ιωάννη. Ο επιπλέον εξοπλισμός που χρειάστηκε κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε σε εξωτερικά εργαστήρια ιδιωτικών εταιρειών. Συγκεκριμένα η κοπή με ηλεκτροδιάβρωση πραγματοποιήθηκε στην Ν. ΜΠΑΖΙΓΟΣ Α.Β.Ε.Ε. και η χημική ανάλυση στην SPECTRUMLABS Α.Ε.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από την έναρξη της φοίτησης μου στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής επιθυμούσα η διπλωματική μου εργασία να είναι κάτι άξιο αναφοράς. Ποτέ μου όμως δεν περίμενα ότι αυτή η εργασία θα εξελισσόταν περισσότερο σε μία προσωπική διαμάχη με τον εαυτό μου. Η περίοδος της συγγραφής αποτέλεσε μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που έχω βιώσει. Για τον λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλους τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα και με ώθησαν στο να υπερνικήσω τα προσωπικά μου εμπόδια. Ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς μου, στην αδερφή μου και στην κοπέλα μου.

Ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές μου κα. Μεντρέα Κάρμεν και κ. Παπαγεωργίου Δημήτριο για την εμπιστοσύνη που επέδειξαν στο πρόσωπο μου και την ευκαιρία που μου πρόσφεραν να κατανοήσω και τελικά να αγαπήσω τον κλάδο των μεταλλικών υλικών. Εύχομαι στη ζωή μου να υπάρξω το ίδιο ενθουσιώδης με το αντικείμενο που θα καταπιαστώ όσο εσείς.

Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τους φίλους και συναδέλφους μου Δραγάτση Αρσένιο, Ραχούτη Ιωάννη και Μαστορίδου Νικολέτα για την αμέριστη υποστήριξη και βοήθεια τους.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους εκδοτικούς οίκους Verlag Europa-Lehrmittel, ASTM International, ΙΩΝ/Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις και Παπασωτηρίου για την αδειοδότηση και την καθοδήγηση στον τρόπο με τον οποίο πρέπει να χρησιμοποιήσω ορθά περιεχόμενο από συγκεκριμένα βιβλία των εκδόσεών τους. Ιδιαίτερος ευχαριστώ την Kathe Hooper, υπεύθυνη του τμήματος αδειών και αδειοδοτήσεων και την Sharon Ennis, εκπρόσωπο πωλήσεων και υποστήριξης του εκδοτικού οίκου ASTM International και τους A. Simone Bán, υπεύθυνη αδειοδοτήσεων του τμήματος ξένων δικαιωμάτων και Catharina Wolf, εκπαιδευόμενη του εκδοτικού οίκου Verlag Europa - Lehrmittel, για την άμεση εξυπηρέτηση και το μεγάλο ενδιαφέρον που επέδειξαν.

Η εργασία αυτή αποτελεί ότι καλύτερο έχω πραγματοποιήσει σε ακαδημαϊκό επίπεδο και ελπίζω να μην είναι η τελευταία. Θα ήθελα να πιστεύω ότι η εργασία αυτή θα αποτελέσει βοήθημα σε όσους αποφασίσουν να την διαβάσουν και να την βρουν τόσο ευχάριστη όσο εγώ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Α ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ	11
1.1 Η έννοια της αστοχίας	11
1.2 Θραυστομηχανική	13
1.2.1 Διάδοση ρωγμάτωσης ανά είδος θραύσης.....	14
1.3 Περιπτώσεις αστοχίας.....	18
1.3.1 Βαθμιαίοι τύποι αστοχίας	18
1.3.1.1 Κόπωση	18
1.3.1.2 Ερπυσμός.....	19
1.3.1.3 Διάβρωση	23
1.3.1.4 Φθορά.....	26
1.3.2 Άμεση αστοχία – Υπερφόρτιση.....	29
1.4 Εμβάθυνση στο φαινόμενο της φθοράς	30
1.4.1 Συντελεστές σχεδιασμού	30
1.4.2 Μηχανισμοί φθοράς.....	31
1.4.3 Καταστάσεις φθοράς	37
1.4.4 Η μέθοδος της ανάλυσης φθοράς	42
1.4.4.1 Διαδικασία.....	43
1.4.4.2 Καταστάσεις εφαρμογής	47
1.5 Τεχνικές ελέγχου αστοχίας.....	48
1.5.1 Μη καταστρεπτικές τεχνικές	48
1.5.2 Καταστρεπτικές τεχνικές.....	53
1.6 Αστοχία εναζωτωμένου στρώματος.....	56
1.6.1 Προβλήματα κατά την διαδικασία της εναζώτωσης.....	56
1.6.2 Βασικές καταστάσεις επιφανειακής βλάβης.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΛΛΟΤΕΧΝΙΑ	60
2.1 Μεταλλικά υλικά	60
2.2 Μεταλλική εσωτερική δομή.....	62
2.2.1 Μεταλλικός δεσμός	62
2.2.2 Κρυσταλλική δομή	63
2.2.3 Κρυσταλλικός δεσμός.....	65
2.2.4 Δομικά κρυσταλλικά σφάλματα	66

2.2.4.1	Σημειακές ατέλειες.....	67
2.2.4.2	Γραμμοαταξίες.....	68
2.2.4.3	Διεπιφανειακές ατέλειες.....	69
2.2.4.4	Ατέλειες κύριας μάζας.....	71
2.2.4.5	Ατέλειες ατομικών δονήσεων.....	71
2.3	Θερμικές κατεργασίες χαλύβων.....	72
2.3.1	Θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας.....	72
2.3.1.1	Ανόπτηση.....	72
2.3.1.2	Βαφή.....	75
2.3.1.3	Επαναφορά.....	79
2.3.2	Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες.....	80
2.3.2.1	Θερμικές τεχνικές.....	81
2.3.2.1.1	Φλογοβαφή.....	81
2.3.2.1.2	Επαγωγική βαφή.....	82
2.3.2.1.3	Δέσμες υψηλής ενεργειακής πυκνότητας.....	82
2.3.2.2	Θερμοχημικές τεχνικές.....	83
2.3.2.2.1	Ενανθράκωση.....	83
2.3.2.2.2	Εναζώτωση.....	86
2.4	Κράματα σιδήρου - άνθρακα.....	96
2.4.1	Ο Ρόλος των κραματικών στοιχείων.....	96
2.4.2	Κατηγοριοποίηση χαλύβων.....	103
2.4.2.1	Ονοματολογία χαλύβων κατά SAE - AISI.....	105
2.4.2.2	Ονοματολογία χαλύβων κατά UNS.....	107
2.4.2.3	Ονοματολογία χαλύβων κατά BS.....	109
2.4.2.4	Ονοματολογία χαλύβων κατά AFNOR.....	110
2.4.2.5	Ονοματολογία χαλύβων κατά DIN.....	111
2.4.2.6	Ονοματολογία χαλύβων κατά EN.....	116
2.4.3	Κραματωμένοι χάλυβες.....	122
2.4.3.1	Ελαφρώς κραματωμένοι χάλυβες.....	122
2.4.3.2	Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες.....	124
2.4.3.3	Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες.....	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.....		130
3.1	Κατηγοριοποίηση ρευστοδυναμικών κινητήρων.....	130
3.2	Εισαγωγή στους ρευστοδυναμικούς κινητήρες.....	133

3.3	Παρουσίαση ρευστοδυναμικών κινητήρων	136
3.3.1	Υδραυλικοί τροχοί.....	136
3.3.2	Στροβιλοκινητήρες	137
3.3.3	Εμβολοφόροι – Παλινδρομικοί κινητήρες.....	138
3.3.4	Περιστροφικοί κινητήρες.....	140
3.4	Τύποι περιστροφικών κινητήρων εσωτερικής οδόντωσης.....	144
3.4.1	Κινητήρας με περιστρεφόμενο στάτορα.....	144
3.4.2	Κινητήρας με σταθερό στάτορα	147
3.4.3	Κινητήρας σταθερού στάτορα με κυλίνδρους	151
3.4.4	Κινητήρας σταθερού στάτορα με ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι	155

Β ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΛΛΟΓΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	162	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ	170	
5.1	Εξοπλισμός μακροσκοπικού ελέγχου	171
5.2	Οπτική επιθεώρηση	172
5.2.1	Διαστασιολόγηση και περιγραφή εξαρτήματος.....	172
5.2.2	Επιθεώρηση εξωτερικής οδόντωσης	174
5.2.3	Επιθεώρηση επιφανειών Α και Β	194
5.2.4	Επιθεώρηση εσωτερικής οδόντωσης	198
5.2.5	Συμπεράσματα μακροσκοπικού ελέγχου.....	199
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ	204	
6.1	Εξοπλισμός μικροσκοπικού ελέγχου	204
6.2	Προετοιμασία δοκιμίων	208
6.3	Χημική ανάλυση υλικού.....	216
6.4	Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίων	218
6.5	Οπτική μικροσκοπία δοκιμίων.....	227
6.6	Συμπεράσματα μικροσκοπικού ελέγχου	238
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	240	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	242	
Π1	Οργανισμοί τυποποίησης και ελέγχου ποιότητας.....	242
Π2	Πρόσθετα σύμβολα για προϊόντα χάλυβα κατά EN.....	244
Π3	Καμπύλη διόρθωσης μικροσκληρομέτρου.....	246
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	247	

Α΄ ΜΕΡΟΣ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

1.1 Η έννοια της αστοχίας

Η αστοχία ενός μεταλλικού εξαρτήματος αναφέρεται σε κάθε μορφής υποβάθμιση της λειτουργικότητας του, σε χρονικό διάστημα συντομότερου της προσχεδιασμένης διάρκειας των κύκλων λειτουργίας του.

Οι λόγοι που μία κατασκευή, ένα μηχάνημα, ένα εξάρτημα κρίνεται ανεπαρκές ή ακατάλληλο στο να συνεχίσει τη λειτουργία του μπορεί να συνδέεται με διάφορους παράγοντες. Ανά τα χρόνια έχουν παρουσιαστεί διάφορες προσπάθειες ομαδοποίησης αυτών των παραγόντων, από τις οποίες εν τέλει έχουν προκύψει έξι γενικού τύπου κατηγορίες: η κακή χρήση (misuse operation), η ανεπαρκής ή κακή συντήρηση (improper maintenance), η λανθασμένη διεξαγωγή της διαδικασίας του ελέγχου (improper testing or inspection), τα σφάλματα στη συναρμολόγηση (assembly errors), τα κατασκευαστικά σφάλματα (manufacturing errors) και τα σφάλματα σχεδιασμού (design errors) [1].

Η κακή χρήση μίας κατασκευής οφείλεται στον χειριστή, όμως η ανεπαρκής ή κακή συντήρηση της μπορεί να οφείλεται είτε στον χειριστή είτε στον επιβλέποντα μηχανικό. Η λανθασμένη διεξαγωγή της διαδικασίας του ελέγχου αναφέρεται στην εσφαλμένη εφαρμογή των βασικών βημάτων που διέπουν την διαδικασία. Συνήθως τέτοιου είδους αστοχίες εμφανίζονται σε διαδικασίες προσομοίωσης (π.χ. τεστ bird-strike σε κινητήρες προώθησης αεροπλάνων). Τα σφάλματα στη συναρμολόγηση, τα κατασκευαστικά σφάλματα και τα σφάλματα στο σχεδιασμό σχετίζονται άμεσα με τη μηχανική συμπεριφορά ενός εξαρτήματος ή μίας κατασκευής.

Πιο συγκεκριμένα η γεωμετρία επαφής δύο συνεργαζόμενων επιφανειών επηρεάζεται άμεσα από τη λανθασμένη συναρμολόγηση. Τα κατασκευαστικά σφάλματα αφορούν τις τεχνικές παραγωγής και ισχυροποίησης που εφαρμόζονται κατά την δημιουργία ενός εξαρτήματος ή μίας κατασκευής, όπως είναι η χύτευση, η εν ψυχρώ διαμόρφωση (τόρνευση, διάτρηση κλπ.), η συγκόλληση και οι θερμικές κατεργασίες (ανόπτηση, επιβελτίωση κλπ.). Τα σφάλματα του σχεδιασμού σχετίζονται κυρίως με τα φορτία που ασκούνται, την επιλογή του υλικού, την κατάσταση και τις ιδιότητες του υλικού. Το είδος της καταπόνησης αναφέρεται στη στατική ή δυναμική φόρτιση σε συνδυασμό με την επιβολή υψηλών ή χαμηλών θερμοκρασιών και στην έκθεση σε διαβρωτικό ή μη περιβάλλον λειτουργίας. Το

υλικό αναφέρεται στη χημική σύσταση και στην μικροδομή, όπως είναι το μέγεθος των κόκκων, η πυκνότητα των αταξιών, τα εγκλείσματα κλπ.

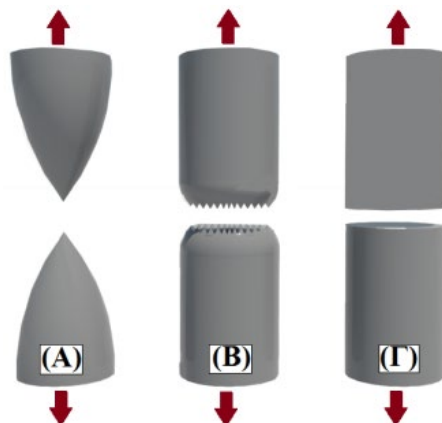
Η αστοχία αποτελεί ένα σύνθετο προς επίλυση πρόβλημα, το οποίο ανάλογα της οπτικής που θα του αποδοθεί μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα πολύπλοκο. Ανεξάρτητα από την γενική κατηγορία στην οποία εν τέλει θα αποδοθεί μία αστοχία, σχεδόν πάντα πραγματοποιούνται αναλύσεις, οι οποίες εξετάζουν τις καταστάσεις αστοχίας που έχουν προκύψει από την εκάστοτε μηχανική συμπεριφορά του συστήματος, με σκοπό την βελτίωσή του.

Σε γενικές γραμμές, η αστοχία αποτελεί την αδυναμία απόκρισης του εξαρτήματος στις συνθήκες λειτουργίας του (φόρτιση και περιβάλλον), αποδίδοντας τέσσερις βασικές μορφές υποβάθμισης: την παραμόρφωση, τη θραύση, τη διάβρωση και τη φθορά.

1.2 Θραυστομηχανική

Η θραύση αποτελεί το πρώτο και με διαφορά το κρισιμότερο αποτέλεσμα μίας καταπόνησης που αναγνωρίζεται ως αστοχία. Η θραύση είναι το τελικό στάδιο της διάδοσης μίας ή περισσοτέρων ρωγμών, οι οποίες οδηγούν στην τμηματική ή ολοκληρωτική αποκόλληση του καταπονούμενου εξαρτήματος [2]. Ο βαθμός κρισιμότητας των ρωγμών που συναντώνται σε μία κατασκευή χαρακτηρίζεται από ασήμαντος έως καταστροφικός. Το μέγεθος του βαθμού κρισιμότητας εξαρτάται από τον αριθμό και την μεταξύ τους απόσταση των συγκεντρωμένων εντός της μικροδομής ρωγμών ή κοιλιοτήτων, το μήκος, το βάθος και την ταχύτητα διάδοσης του σχηματισμού της κάθε ρωγμής [3]. Οι σημαντικότερες και μεγαλύτερες ιστορικά κατασκευαστικές αστοχίες που έχουν καταγραφεί είναι αποτέλεσμα θραύσεων, οι οποίες πέρα από σοβαρές υλικές φθορές έχουν συνδυαστεί και με ανθρώπινα θύματα. Η περιορισμένη πληροφόρηση γύρω από το φαινόμενο της θραύσης και κατά επέκταση η άγνοια των μηχανικών της εποχής, έχρισε ως επιτακτική την ανάγκη για ίδρυση ενός νέου επιστημονικού πεδίου, αυτού της θραυστομηχανικής.

Η θραυστομηχανική αναλύει την φύση και τη συμπεριφορά της θραύσης. Η διαδικασία της μελέτης και της ανάλυσης των επιφανειών θραύσεως ονομάζεται θραυστογραφία και πραγματοποιείται είτε μακροσκοπικά δια γυμνού οφθαλμού ή με τη χρήση στερεοσκοπίου, είτε μικροσκοπικά με τη χρήση ηλεκτρικού μικροσκοπίου. Μέσα από την έρευνα αναγνωρίστηκαν δύο βασικές καταστάσεις θραύσης, η όλκιμη και η ψαθυρή (Εικόνα 1.1).

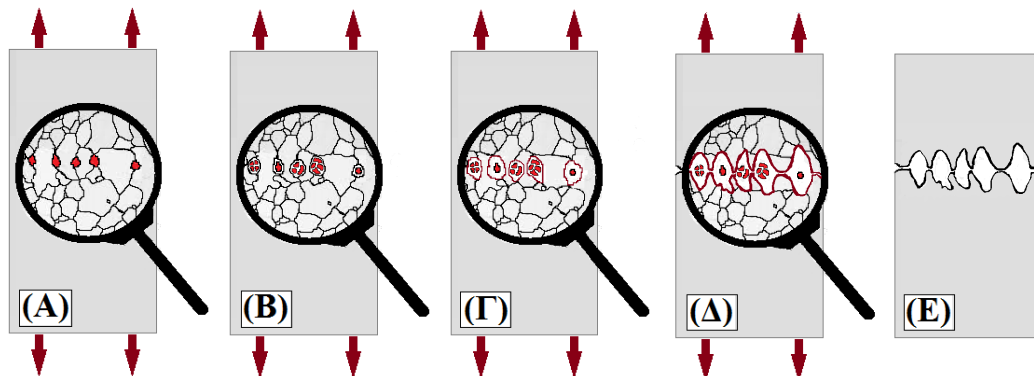


Εικόνα 1.1: (Α) Ιδιαίτερα όλκιμη θραύση, (Β) Μέτρια ισχυρή όλκιμη θραύση, (Γ) Ψαθυρή θραύση [4, σελ. 6].

1.2.1 Διάδοση ρωγμάτωσης ανά είδος θραύσης

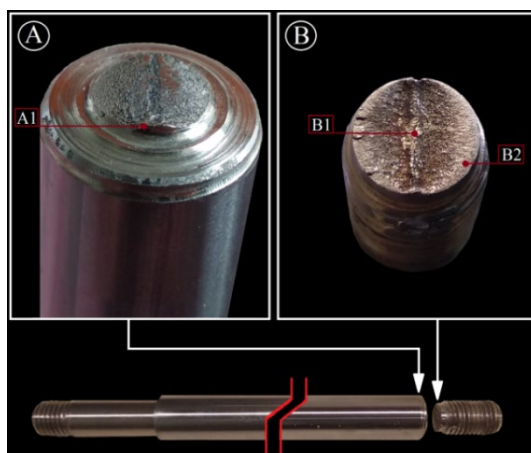
Η διάδοση και ο σχηματισμός της κύριας ρωγμής απόσχισης ενός υλικού δεν ακολουθεί πάντα το ίδιο μοτίβο. Η διαφορετικότητα αυτή, σε συνδυασμό με την συμπεριφορά (μετά από πλαστική παραμόρφωση ή μετά από ακαριαία απόσχιση) και την επιφάνεια της θραύσης που δημιουργείται, οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στον χαρακτηρισμό των δύο βασικών καταστάσεων θραύσης που προαναφέρθηκαν. Η συμπεριφορά δε της θραύσης δεν εξαρτάται μόνο από τους μηχανισμούς φόρτισης, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία.

Η **όλκιμη θραύση** πραγματοποιείται σε όλκιμα υλικά και αναπτύσσεται σε σχετικά αργούς ρυθμούς συνοδεία έντονης πλαστικής παραμόρφωσης. Σε αυτήν τη περίπτωση η σχηματιζόμενη θραύση συναντά την σθεναρή αντίσταση του υλικού στην επικείμενη απόσχιση. Εξαιτίας της βραδείας ανάπτυξής της επιτρέπεται στους μηχανικούς η ελεγχόμενη παρατήρηση και εκτίμηση της. Για το λόγο αυτό συχνά χαρακτηρίζεται ως σταθερή θραύση [2]. Η διάδοση της ρωγμής ξεκινάει από την θραύση ή την αποκόλληση των σκληρότερων, υπό την μορφή σωματιδίων, ενδοκρυσταλλικών φάσεων. Οι ενδοκρυσταλλικές αυτές φάσεις βρίσκονται διάσπαρτες στο κρυσταλλικό πλέγμα του μεταλλικού υλικού και συναντώνται υπό την μορφή καρβιδίων, νιτριδίων, ενδομεταλλικών ενώσεων και εγκλεισμάτων, όπως είναι τα οξειδία και τα σουλφίδια (Εικόνα 1.2: Α). Με την θραύση ή την αποκόλληση αυτών των περιοχών δημιουργούνται μικροί πόροι (Εικόνα 1.2: Β), οι οποίοι με την συνέχιση της επιβολής του φορτίου διαρκώς μεγαλώνουν (Εικόνα 1.2: Γ), έως ότου κάποια στιγμή να συνενωθούν σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη ρωγμή απόσχισης (Εικόνα 1.2: Δ). Η πλαστική παραμόρφωση παρατηρείται στις ινώδεις αποκολλήσεις που χαρακτηρίζουν τη μετά θραύσης επιφάνεια (Εικόνα 1.2: Ε) [3].



Εικόνα 1.2: Ο μηχανισμός διάδοσης της όλκιμης θραύσης. (Α) Διάσπαρτα σωματίδια, (Β) Θραύση και αποκόλληση σωματιδίων - δημιουργία μικρών πόρων, (Γ) Μεγέθυνση των μικρών πόρων, (Δ) Συνένωση των μικρών πόρων, (Ε) Ινώδης θραύση [3, εμπνευσμένο από Εικόνα 9.3, σελ.491].

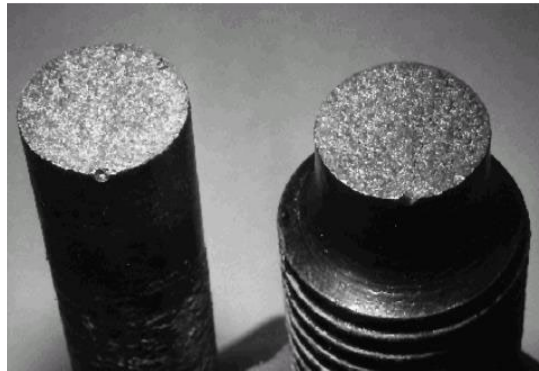
Η μακροσκοπική οπτική της όλκιμης θραύσης συχνά αποκαλείται θραύση τύπου κυπέλλου - κώνου (Εικόνα 1.3), διότι στη μία επιφάνεια διακρίνεται μία κωνική στένωση και στην άλλη μία κυπελλοειδής διαπλάτυνση. Πειραματικά η όλκιμη θραύση μελετάται μέσα από το πείραμα του εφελκυσμού ενός δοκιμίου συγκεκριμένων διαστάσεων, σε θερμοκρασίες δωματίου (για ιδιαίτερα μαλακά μεταλλικά υλικά) ή σε υψηλότερες θερμοκρασίες.



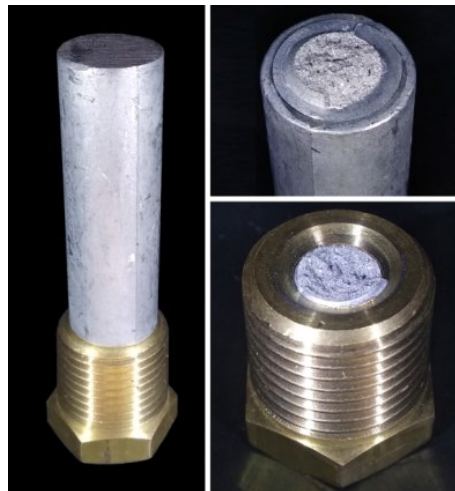
Εικόνα 1.3: Όλκιμη θραύση τύπου κυπέλλου - κώνου σε άξονα υδραυλικού κυλίνδρου διπλής ενέργειας, μέρους εξωλέμβιας μηχανής θαλάσσης. (A) Κωνική διαμόρφωση, (A1) Ινώδης θραύση, (B) Κυπελλοειδής διαμόρφωση, (B1) Θραύση λόγω εφελκυστικού φορτίου, (B2) Θραύση λόγω διατμητικού φορτίου.

Η **ψαθυρή θραύση** εμφανίζεται στα υλικά χαμηλής δυσθραυστότητας, όπως είναι τα κορεσμένα μέταλλα υψηλής σκληρότητας (χυτοσίδηρος με υψηλά ποσοστά σε άνθρακα, βαμμένος χάλυβας μαρτενσιτικής δομής μη επαναφερμένος κλπ.), τα διάφορα είδη σκυροδέματος, τα κεραμικά υλικά κλπ. Η διάδοση της/των ρωγμών απόσχισης αναπτύσσονται με ιδιαίτερα γοργούς, σχεδόν ακαριαίους ρυθμούς και συνοδεύονται από απειροελάχιστα ή καθόλου σημάδια πλαστικής παραμόρφωσης. Σε αυτήν τη περίπτωση το υλικό παρουσιάζει από ελάχιστη έως μηδενική αντίσταση στην διάδοση των αναπτυσσόμενων ρωγμών. Το γεγονός της ανύπαρκτης πλαστικής παραμόρφωσης και των ακαριαίων αποσχίσεων, δεν επιτρέπει στους μηχανικούς την ελεγχόμενη παρατήρηση και εκτίμηση της, για το λόγο αυτό συχνά χαρακτηρίζεται ως ασταθής θραύση. Μακροσκοπικά, οι αποκολλημένες περιοχές διαθέτουν επίπεδες ή σχεδόν επίπεδες επιφάνειες με αυλακώσεις και γραμμές μορφής V. Μικροσκοπικά, η ανάπτυξη της θραύσης επέρχεται με τέσσερις μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός ονομάζεται σχισμός (cleavage) ή σχίσιμο και λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος, προκαλώντας τη διάσπαση των ατομικών δεσμών αποδίδοντας έτσι μία επίπεδη επιφάνεια θραύσης (Εικόνα 1.4). Οι επόμενοι

δύο μηχανισμοί εμφανίζονται στα πολυκρυσταλλικά υλικά, οι οποίοι αποδίδουν τις σχεδόν επίπεδες επιφάνειες θραύσης (Εικόνα 1.5) [3].

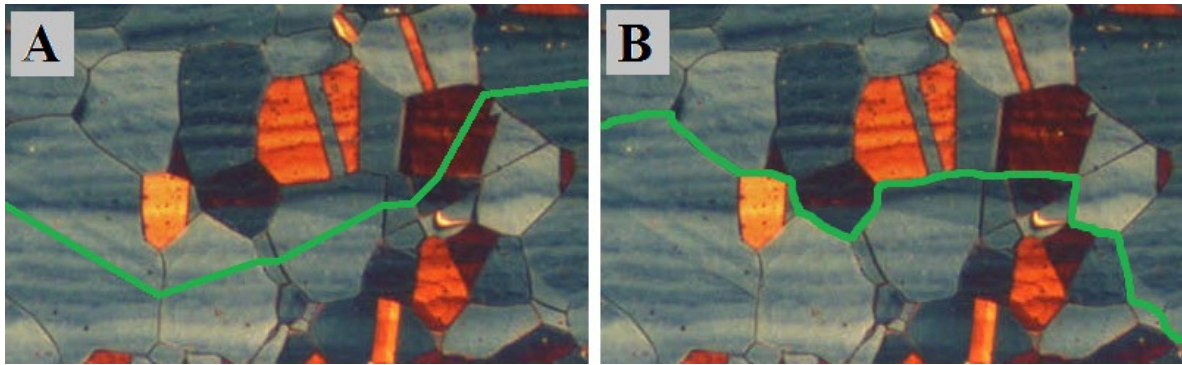


Εικόνα 1.4: Επίπεδη ψαθυρή θραύση χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα [2, Εικόνα 8.3 (β), σελ. 243].



Εικόνα 1.5: Ψαθυρή θραύση ανωδίου, κράματος ψευδαργύρου, μέρος εναλλάκτη θερμότητας σε εσωλέμβιες μηχανές θαλάσσης.

Η τραχύτητα στην επιφάνεια θραύσης, συγκριτικά πάντα με την πρώτη περίπτωση, είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών προσανατολισμών των κόκκων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η κατεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής να μεταβάλλεται από κόκκο σε κόκκο, έως ότου διασχίσει το εκάστοτε κρυσταλλογραφικό επίπεδο απόσχισης (cleavage planes). Στη μία περίπτωση, η ρωγμή σχηματίζεται διακρυσταλλικά (transgranular fracture), διασχίζοντας δηλαδή τους κόκκους, έχοντας κάθε φορά σαν κατεύθυνση την διαφορετική φορά προσανατολισμού των διαπερασμένων κρυσταλλιτών (Εικόνα 1.6: A). Στην άλλη περίπτωση, η ρωγμή μπορεί να σχηματιστεί περικρυσταλλικά (intergranular fracture) ακολουθώντας τα σύνορα των κόκκων (Εικόνα 1.6: B). Η περικρυσταλλική θραύση οφείλεται στην εξασθένηση των συνόρων, η οποία τις περισσότερες φορές οφείλεται στον διαφορισμό των ακαθαρσιών, όπως είναι ο φώσφορος και το θείο και στην καθίζηση των φάσεων.



Εικόνα 1.6: Ωστενιτικός χάλυβας υψηλής αντοχής στη διάβρωση, μεγέθυνση στα 100μm. (A) Διακρυσταλλική θραύση), (B) Περικρυσταλλική θραύση.

Ο τελευταίος μηχανισμός σχηματισμού ψαθυρής θραύσης αποτελεί συνάμα το κυρίαρχο αίτιο δημιουργίας του επιστημονικού κλάδου της θραυστομηχανικής. Ο μηχανισμός αυτός θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μεταβατική θραύση, καθώς αναφέρεται στην μετάβαση της όλκιμης συμπεριφοράς ενός υλικού σε ψαθυρή, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την θραύση. Βασικό χαρακτηριστικό αυτού του μηχανισμού αποτελεί η θραύση σε χαμηλές εφαρμοζόμενες τάσεις κάτω του ορίου διαρροής. Η ύπαρξη εγχοπών αποδίδει τοπικά στο υλικό περιοχές εργοσκληύρυνσης που υποβοηθούν την ανάπτυξη μικρορωγμών. Οι εγχοπές σε συνδυασμό με τις ρωγμές αποτελούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων τριαξονικού τασικού πεδίου, οι οποίες ανθίστανται της πλαστικής παραμόρφωσης και αντίστοιχα αυξάνουν την ψαθυρότητα του υλικού. Η ψαθυρή μετάβαση μπορεί να επέλθει με δύο τρόπους. Ο ένας αναφέρεται στην επιβολή κρουστικού φορτίου, κατά το οποίο το υλικό προσπερνά το στάδιο της πλαστικής παραμόρφωσης και θραύεται ακαριαία. Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με τη θερμοκρασία μετάβασης, όπου οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού υποβαθμίζονται εξαιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας, προσπερνώντας και πάλι την περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης, οδηγώντας το στην ακαριαία θραύση (για το λόγο αυτό οι ναυπηγικοί χάλυβες διαθέτουν χαμηλή θερμοκρασία μεταβάσεως έως -50°C ανάλογα πάντα την χρήση) [3].

1.3 Περιπτώσεις αστοχίας

Με βάση τον τρόπο διάδοσης της υποβάθμισης ενός μεταλλικού στοιχείου, η αστοχία μπορεί να διακριθεί σε βαθμιαίους τύπους και σε ακαριαίους τύπους αστοχίας. Στους βαθμιαίους τύπους αστοχίας ανήκουν η κόπωση, ο ερπυσμός, η διάβρωση και η φθορά. Στην ακαριαία αστοχία, γίνεται λόγος για την κατάσταση της υπερφόρτισης του υλικού [5].

1.3.1 Βαθμιαίοι τύποι αστοχίας

1.3.1.1 Κόπωση

Με τον όρο κόπωση (fatigue) ονομάζεται το είδος της φόρτισης που επαναλαμβάνεται κυκλικά εντός μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης τάσης παραμορφώσεως. Η διάδοση της κύριας ρωγμάτωσης του υλικού εκφράζεται από τοπικές συσσωρεύσεις βλάβης, οι οποίες ανά κύκλο λειτουργίας προοδευτικά αναπτύσσονται υπό την μορφή ρωγμών ή αποκολλήσεων. Η τελική δε απόσχιση πραγματοποιείται ακαριαία όταν το μήκος της κύριας ρωγμής καλύψει μία κρίσιμη απόσταση.

Στην περίπτωση της κυκλικής φόρτισης το διάγραμμα τάσης (σ) - ανηγμένης παραμόρφωσης (ϵ) δεν λαμβάνεται υπόψιν, καθώς αντιστοιχεί μόνο σε στατικά είδη φορτίσεων. Το στάδιο της μελέτης του είδους των φορτίσεων που θα εφαρμοστούν σε μία απλή ή σύνθετη κατασκευή και οι κρίσιμες τιμές των τάσεων που ως αποτέλεσμα θα ληφθούν από την μελέτη, θα αποτελέσουν τον γνώμονα για τον χαρακτηρισμό του προσδόκιμου ορίου αντοχής της κατασκευής. Ένα εξάρτημα που παρουσιάζει υψηλό όριο αντοχής ή όριο θραύσης σε στατική φόρτιση (εφελκυσμός, θλίψη κλπ.) είναι πιθανόν να αστοχήσει σε αισθητά χαμηλότερες τάσεις (περιοχή ελαστικής παραμόρφωσης) όταν υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση.

Η διάρκεια ζωής σε κόπωση αποτελεί το άθροισμα των κύκλων φόρτισης που χρειάζονται για τον σχηματισμό της κύριας ρωγμής (N_i), με τους κύκλους φόρτισης που πρέπει να καλυφθούν ώστε να αναπτυχθεί πλήρως η κύρια ρωγμή απόσχισης (N_p). Πειραματικά οι βλάβες που δημιουργούνται κατά την κόπωση εξετάζονται με τη χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών, προσδιορίζοντας έτσι την καταλληλότητα του εξαρτήματος. Οι μεθοδολογίες διαχείρισεως της κόπωσης είναι αρκετές και τροποποιούνται ανάλογα με το είδος της κόπωσης. Σε κάθε περίπτωση, όμως, οι μεθοδολογίες διακρίνονται σε καταστάσεις με προϋπάρχουσες βλάβες και σε

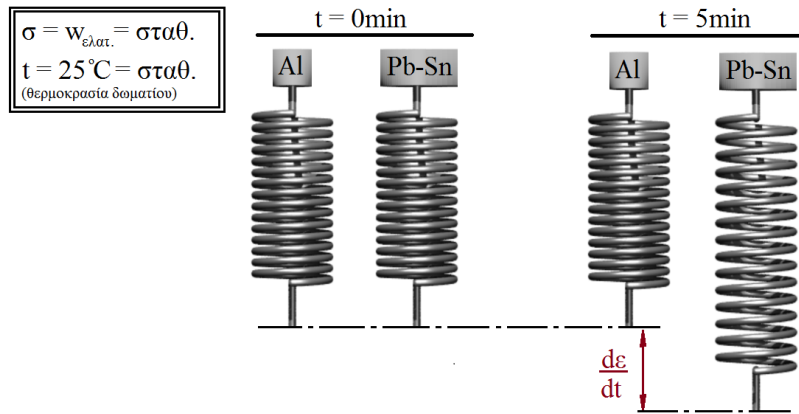
καταστάσεις χωρίς προγενέστερες βλάβες. Ανάλογα με το είδος της κόπωσης, οι βλάβες αυτές μπορεί να εκφράζουν διαφορετικές καταστάσεις φθοράς.

Η κυκλική φόρτιση μπορεί να είναι απλή, δηλαδή, χωρίς να συνοδεύεται από κάποια άλλη καταπόνηση και ονομάζεται μηχανική. Η κυκλική φόρτιση που συνδυάζεται με υψηλές σταθερές θερμοκρασίες, ονομάζεται κόπωση με ερπυσμό (creep fatigue). Όταν, όμως, τα εφαρμοζόμενα φορτία, ταυτόχρονα με την θερμοκρασία αυξομειώνονται τότε η κυκλική φόρτιση χαρακτηρίζεται ως θερμομηχανική κόπωση (thermomechanical fatigue). Όταν συνδυάζεται με διαβρωτικό περιβάλλον ονομάζεται κόπωση με διάβρωση (corrosion fatigue). Όταν η γεωμετρία σύμπλεξης μεταξύ δύο σωμάτων είναι επαφή με ολίσθηση τότε χαρακτηρίζεται ως κόπωση ολισθήσεως (sliding contact fatigue), όταν είναι επαφή με κύλιση ονομάζεται κόπωση κυλίσεως (rolling contact fatigue) και όταν αποτελεί συνδυασμό σχετικά παλινδρομικής κίνησης και ολίσθησης λέγεται κόπωση εκτριβής (fretting fatigue).

1.3.1.2 Ερπυσμός

Το φαινόμενο του ερπυσμού αποτελεί μία ειδική περίπτωση συνεχούς πλαστικής παραμόρφωσης εξαρτώμενης του χρόνου, που εμφανίζεται κατά την επιβολή σταθερής συνεχόμενης φόρτισης σε υψηλή ανάλογα το υλικό, επίσης σταθερής επιβαλλόμενης θερμοκρασίας, μεγαλύτερης του 40-50% της θερμοκρασίας τήξεως του υλικού. Το φαινόμενο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πλαστική παραμόρφωση ενός σώματος χωρίς την περαιτέρω αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης ή του φορτίου άνω του ορίου διαρροής του. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα σε χαμηλά εφαρμοζόμενες τάσεις αρκετά χαμηλότερες του ορίου διαρροής. Η υποβάθμιση του υλικού σε ερπυσμό αποτελεί συνήθως αποτέλεσμα της πλαστικής παραμόρφωσης και όχι απαραίτητα της θραύσης και εκφράζεται σε ποσοστό επί τις % ανά χρόνο λειτουργίας (π.χ. παραμόρφωση 1% σε 10000 ώρες λειτουργίας).

Στην κάτωθεν εικόνα (Εικόνα 1.7) παρατηρείται η επίδραση του φαινομένου του ερπυσμού σε δύο ίδια ως προς την γεωμετρία τους ελατήρια, διαφορετικού όμως υλικού. Η εφαρμοζόμενη τάση σε κάθε ελατήριο δεν είναι άλλη από το ίδιο τους το βάρος και η επιβαλλόμενη θερμοκρασία ισούται με μία τυπική θερμοκρασία ενός δωματίου ($T_{\delta\omega\mu.}=25^{\circ}\text{C}=298,15^{\circ}\text{K}$). Από τα δύο ελατήρια το μόνο που παραμορφώνεται - επιμηκύνεται, χωρίς την επιβολή κάποιου επιπλέον φορτίου είναι το ελατήριο του μολύβδου - κασσιτέρου.

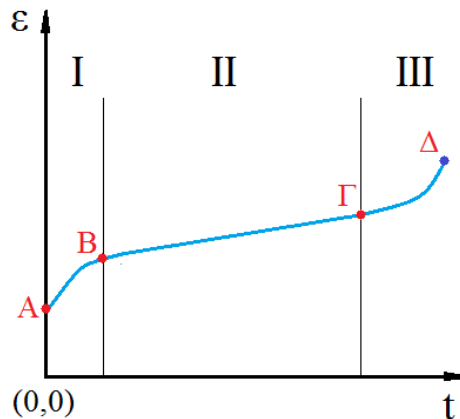


$$T_m^{Al} = 660^\circ\text{C} = 933,15^\circ\text{K} \rightarrow \frac{T_{\text{δοματίου}}(K)}{T_{\text{τήξεως}}(K)} = \frac{298,15}{933,15} = 0,32 = 32\% < 40 - 50\%T_m$$

$$T_m^{Pb-Sn} = 183^\circ\text{C} = 456,15^\circ\text{K} \rightarrow \frac{T_{\text{δοματίου}}(K)}{T_{\text{τήξεως}}(K)} = \frac{298,15}{456,15} = 0,65 = 65\% > 40 - 50\%T_m$$

Εικόνα 1.7: Πειραματική αναπαράσταση του φαινομένου του ερπυσμού.

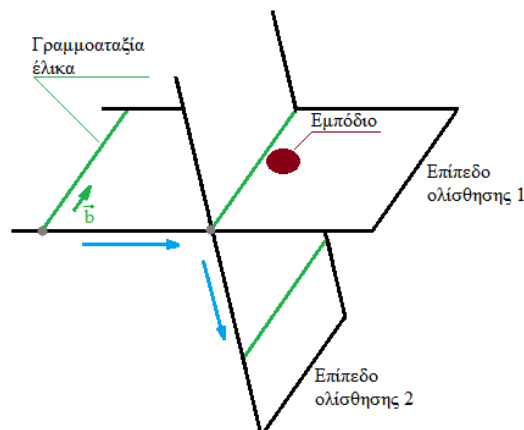
Γραφικά το φαινόμενο μπορεί να εκφραστεί μέσω της γραφικής παράστασης της ανηγμένης παραμόρφωσης (ϵ) συναρτήσεως του χρόνου (t) και ονομάζεται καμπύλη ερπυσμού. Η τυπική μορφή της καμπύλης διακρίνεται σε τρία χαρακτηριστικά στάδια (Εικόνα 1.8). Το πρώτο στάδιο (Εικόνα 1.8: τμήμα ΑΒ) ονομάζεται πρωτογενής ή μεταβατικός ερπυσμός, διότι η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση ενώ αρχικά είναι σε ανοδική πορεία, σταδιακά ελαττώνεται. Σε αυτή τη περίπτωση η ταχύτητα παραμόρφωσης επίσης μειώνεται. Για χρόνο $t=0$ παρατηρείται ότι η καμπύλη δεν διέρχεται από την αρχή των αξόνων, αλλά από μία ανώτερη τιμή παραμόρφωσης, η οποία εμφανίζεται κατά την εφαρμογή του φορτίου στο σώμα. Το δεύτερο στάδιο (Εικόνα 1.8: τμήμα ΒΓ) ονομάζεται δευτερογενής ή σταθεροποιημένος ερπυσμός, διότι σε αυτή τη περίπτωση η κλίση της καμπύλης παραμόρφωσης διαθέτει την μικρότερη τιμή. Στο στάδιο αυτό η ταχύτητα παραμόρφωσης παρουσιάζει σταθερό ρυθμό μεταβολής. Το τρίτο στάδιο (Εικόνα 1.8: τμήμα ΓΔ) ονομάζεται τριτογενής ή επιταχυνόμενος ερπυσμός, καθώς η ταχύτητα παραμόρφωσης ταυτόχρονα με την πλαστική παραμόρφωση αυξάνονται ραγδαία έως το σημείο θραύσης.



Εικόνα 1.8: Τυπική καμπύλη ερπυσμού.

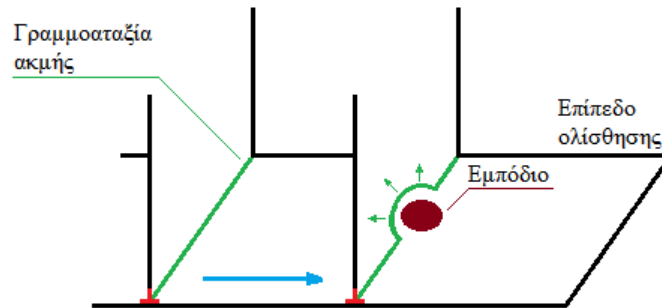
Κάθε υλικό κατά την επιβολή ενός φορτίου και της διαμορφωμένης από αυτό πλαστικής του παραμόρφωσης εργοσκληρώνεται. Στην απλή πλαστική παραμόρφωση, η υπερνίκηση των εμποδίων από την σκλήρυνση του υλικού έρχεται με την επιβολή ενός ισχυρότερου φορτίου. Όμως ο μηχανισμός της πλαστικής παραμόρφωσης στον ερπυσμό λειτουργεί διαφορετικά. Οι μηχανισμοί του ερπυσμού σε υψηλές θερμοκρασίες διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: στην ολίσθηση διακλάδωσης (cross slip), στην αναρρίχηση (climb), στη διαχυτική ροή (diffusion flow) και στην ολίσθηση στα όρια των κόκκων (grain boundary sliding). Η ολίσθηση διακλάδωσης και η αναρρίχηση εμπλέκονται με τις γραμμοαταξίες έλικα και ακμής αντίστοιχα, ενώ η διαχυτική ροή και η ολίσθηση στα όρια των κόκκων εμπλέκονται σε υψηλές θερμοκρασίες μέσω του φαινομένου της διάχυσης.

Κατά την ολίσθηση διακλάδωσης όταν μία μετακινούμενη από μία ασκούμενη τάση κοχλιωτή γραμμοαταξία συναντήσει ένα σκληρό σωματίδιο - εμπόδιο, τότε αλλάζει επίπεδο ολίσθησης για να το αποφύγει και να συνεχίσει την πορεία της πάνω στο νέο επίπεδο (Εικόνα 1.9).



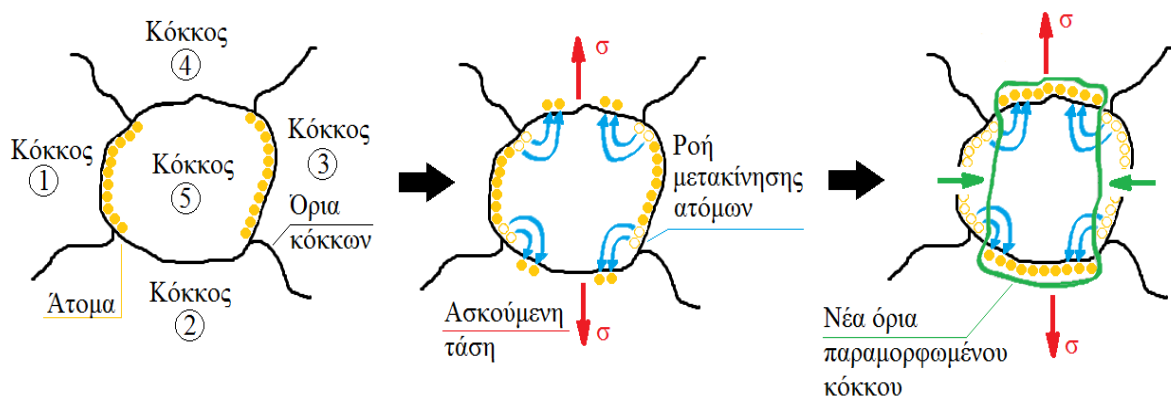
Εικόνα 1.9: Αναπαράσταση του μηχανισμού της ολίσθησης διακλάδωσης μίας γραμμοαταξίας κοχλία.

Στην αναρρίχηση όταν μία μετακινούμενη από μία ασκούμενη τάση γραμμοαταξία ακμής συναντήσει ένα σκληρό σωματίδιο - εμπόδιο, τότε τα άτομα της κάτω επιφάνειας της γραμμοαταξίας σχηματίζουν έναν βρόχο «σκαρφαλώνοντας» πάνω από το εμπόδιο (Εικόνα 1.10).



Εικόνα 1.10: Αναπαράσταση του μηχανισμού της αναρρίχησης μίας γραμμοαταξίας ακμής.

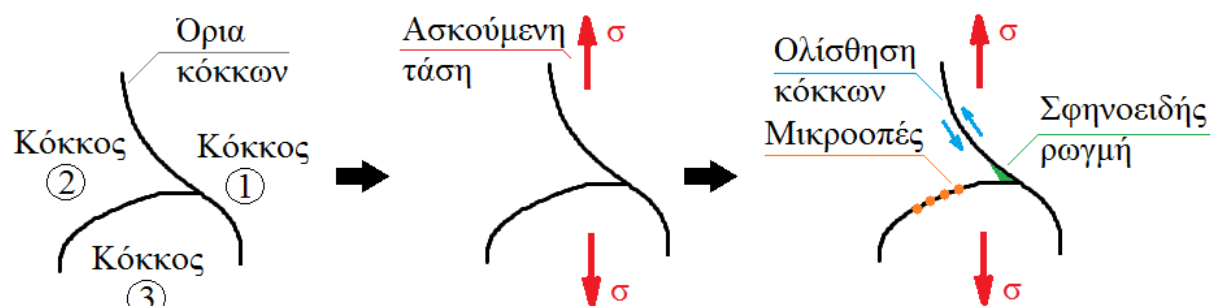
Στην διαχυτική ροή κατά την φόρτιση του υλικού, τα άτομα που βρίσκονται στα όρια ενός κόκκου και είναι παράλληλα της εφαρμοζόμενης τάσης, μεταπηδούν μέσω του φαινομένου της διάχυσης στα όρια του κόκκου που είναι κάθετα στην εφαρμοζόμενη τάση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την στένωση του κόκκου εκατέρωθεν της τάσης και την επιμήκυνση του κόκκου προς την φορά της ασκούμενης τάσης (Εικόνα 1.11). Αυτού του είδους η ατομική μετακίνηση δεν συμβαίνει σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αξίζει να τονιστεί ότι ο μηχανισμός της διάχυσης που αναφέρθηκε δεν σχετίζεται με την ανάλυση του Fick, καθώς αναφέρεται στα άτομα που σχηματίζουν έναν κόκκο και όχι στα άτομα που προστίθενται σε μία κρυσταλλική δομή.



Εικόνα 1.11: Αναπαράσταση του μηχανισμού της διαχυτικής ροής.

Στην ολίσθηση στα όρια των κόκκων, οι δεσμοί των ατόμων που συγκροτούν τα όρια των κρυσταλλιτών χαλαρώνουν, εξαιτίας της εφαρμοζόμενης τάσης σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία ερπυσμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την

μετατόπιση των κόκκων και παράλληλα την δημιουργία ρωγμών τύπου σφήνας και μικρών κοιλοτήτων στα όρια μεταξύ των κόκκων (Εικόνα 1.12).

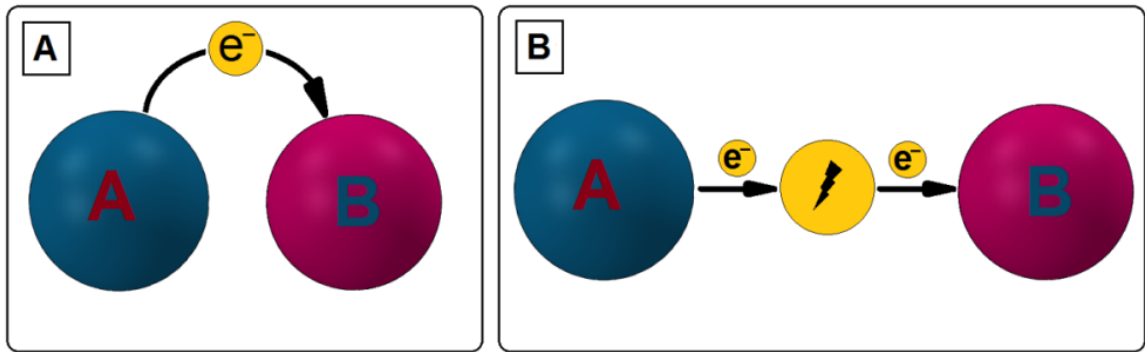


Εικόνα 1.12: Αναπαράσταση του μηχανισμού της ολίσθησης στα όρια των κόκκων.

1.3.1.3 Διάβρωση

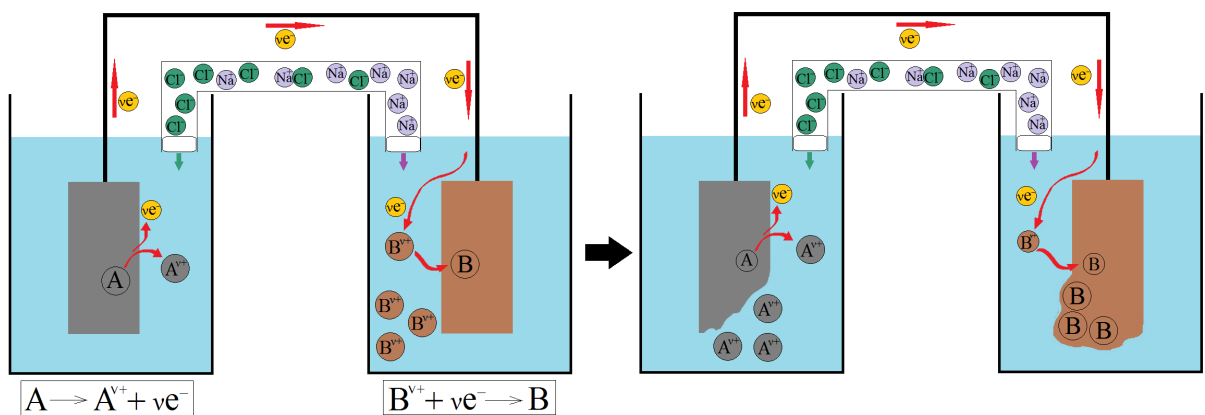
Η διάβρωση ενός μεταλλικού στοιχείου αποτελεί την ηλεκτροχημική διεργασία κατά την οποία πραγματοποιείται η ενεργειακή του υποβάθμιση μέσω της αλληλεπίδρασής του με το άμεσο περιβάλλον λειτουργίας του (χημική διεργασία) και της φυσικής ή εξαναγκασμένης μετακίνησης ηλεκτρονίων (ηλεκτρική διεργασία). Η διεργασία της διάβρωσης συντελείται σε τρεις βασικές περιοχές. Η μία περιοχή αποτελεί την ατμόσφαιρα, στην οποία πραγματοποιείται ο πιο συνηθισμένος τύπος διάβρωσης, κυρίως από την αλληλεπίδραση του οξυγόνου με το μέταλλο σε συνδυασμό με την υγρασία και την ρύπανση. Η άλλη περιοχή είναι το έδαφος, όπου η διάβρωση ενός μετάλλου επέρχεται κυρίως από τα περιπλανώμενα ηλεκτρικά ρεύματα που υπάρχουν σε αυτό. Η τελευταία περιοχή αφορά τα διαλύματα, όπου η διάβρωση επιτυγχάνεται μέσω της χημικής αλληλεπίδρασης των χημικών ουσιών που εμπεριέχονται σε αυτό με την μεταλλική επιφάνεια του βυθισμένου στοιχείου [6].

Με τον όρο ηλεκτροχημική διεργασία γίνεται αναφορά σε δύο καταστάσεις: στην δημιουργία διαφοράς δυναμικού εξαιτίας μίας χημικής αντίδρασης - κανονική διάβρωση (Εικόνα 1.13: A) και στην αντίστροφη διαδικασία όπου επιβάλλεται διαφορά δυναμικού για την υλοποίηση της επιθυμητής χημικής αντίδρασης - ηλεκτρόλυση (Εικόνα 1.13: B).



Εικόνα 1.13: Σχηματισμός διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο μεταλλικών στοιχείων. (Α) Φυσική μετακίνηση ηλεκτρονίων και (Β) Εξαναγκασμένη μετακίνηση ηλεκτρονίων με τη χρήση εξωτερικής πηγής.

Είναι κοινώς αποδεδειγμένο ότι η ύπαρξη διαφοράς δυναμικού οδηγεί τα ηλεκτρόνια να κινηθούν με τάξη προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ηλεκτροχημική διεργασία από την άλλη αποτελεί μία διαδικασία φυσικής ή εξαναγκασμένης αποβολής και πρόσληψης ηλεκτρονίων προς μία κατεύθυνση και έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρισμού. Η αποβολή ηλεκτρονίων ονομάζεται οξείδωση (oxidation) και η πρόσληψη ονομάζεται αναγωγή (reduction). Το στοιχείο που οξειδώνεται χαρακτηρίζεται ως άνοδος και αντίστοιχα το στοιχείο που ανάγεται χαρακτηρίζεται ως κάθοδος. Η οξείδωση έχει το χαρακτηριστικό της σταδιακής απώλειας υλικού σε συνδυασμό τις περισσότερες φορές με την χρωματική αλλοίωση του μεταλλικού στοιχείου. Η αναγωγή από την άλλη έχει το χαρακτηριστικό του πρηξίματος του μεταλλικού στοιχείου, καθώς προστίθεται σε αυτό στερεό υλικό. Η τυπική πειραματική διάταξη μελέτης του φαινομένου της διάβρωσης γίνεται μέσω του ηλεκτροχημικού ή γαλβανικού στοιχείου της παρακάτω εικόνας (Εικόνα 1.14) [6].



Εικόνα 1.14: Αναπαράσταση της οξειδωαναγωγικής διεργασίας σε ένα τυπικό γαλβανικό στοιχείο.

Η ηλεκτροχημική αντίδραση της διάβρωσης ενός μεταλλικού υλικού στηρίζεται στην ύπαρξη δύο περιοχών, μίας ανόδου και μίας καθόδου, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορά δυναμικού και συνδέονται αγωγίμα μεταξύ τους υπό την παρουσία διαβρωτικού μέσου. Το φαινόμενο της οξειδοαναγωγής που λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε δύο διαφορετικά μέταλλα ή ανάμεσα σε ένα μέταλλο με ένα διαβρωτικό μέσο, βασίζεται άμεσα στο δυναμικό αναγωγής που διαθέτει σε κάθε περίπτωση τα μεταλλικά στοιχεία και αντίστοιχα στη σειρά δραστηριότητας που κατέχουν στη σχετική λίστα (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1: Παραδείγματα κανονικών δυναμικών αναγωγής.

Ημιαντίδραση	Διαφορά Δυναμικού (Volts)
$Li^+ + e \rightarrow Li$	-3,05
$Mg^{2+} + 2e \rightarrow Mg$	-2,37
$Al^{3+} + 3e \rightarrow Al$	-1,69
$Zn^{2+} + 2e \rightarrow Zn$	-0,76
$Cr^{3+} + 3e \rightarrow Cr$	-0,70
$Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu$	+0,34
$Au^{3+} + 3e \rightarrow Au$	+1,50

Όσο μεγαλύτερο δυναμικό παρουσιάζει ένα μέταλλο τόσο λιγότερο δραστικό είναι. Τα μεταλλικά στοιχεία χαμηλής δραστηριότητας διαθέτουν μεγαλύτερη αντοχή ενάντια στους μηχανισμούς της διάβρωσης. Εξάιρεση αυτού του κανόνα αποτελούν τα στοιχεία του χρωμίου, του αλουμινίου, του ψευδαργύρου και του τιτανίου, διότι ενώ διαθέτουν χαμηλά δυναμικά αναγωγής έχουν χαμηλή δραστηριότητα και παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση. Το δυναμικό αναγωγής αποτελεί το μέτρο ισχυρότητας ενός μεταλλικού στοιχείου και η οξειδοαναγωγή αποτελεί το αποτέλεσμα της «διαμάχης» μεταξύ της ισχυρότερης (κάθοδος) και της ασθενέστερης (άνοδος) ενεργειακά περιοχής. Το πιο παθητικό ή χαμηλότερα ενεργειακά ή με τη χαμηλότερη δραστηριότητα ή με το μεγαλύτερο δυναμικό αναγωγής, μεταλλικό στοιχείο ή περιοχή κατέχει το ρόλο του «ισχυρού», ενώ το στοιχείο ή η περιοχή με την υψηλότερη ενεργειακή συγκέντρωση ή με τη μεγαλύτερη δραστηριότητα ή με το χαμηλότερο δυναμικό αναγωγής, κατέχει το ρόλο του «ασθενέστερου». Όταν δύο τέτοιες περιοχές αλληλεπιδρούν, η ισχυρότερη από αυτές περιοχή έλκει από την ασθενέστερη ηλεκτρόνια και τα εντάσσει μέσα από διάφορες χημικές διαδικασίες στη δομή της, έχοντας σαν αποτέλεσμα την οξείδωση - διάβρωση της ανοδικής περιοχής. Η σχέση «ισχυρού - ασθενέστερου» μπορεί να παραληφθεί και η παραπάνω

διαδικασία να αντιστραφεί μόνον κατά την ηλεκτρόλυση. Η εξωτερική πηγή επιβολής διαφοράς δυναμικού κατά την ηλεκτρόλυση μπορεί να είναι οτιδήποτε μπορεί να δημιουργήσει ενεργειακή ανισορροπία στο μέταλλο. Το ρόλο αυτό συνήθως κατέχει το ηλεκτρικό ρεύμα, η θερμοκρασία και η μηχανική καταπόνηση.

Η διάβρωση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο εξαρτώμενο από διάφορους παράγοντες. Ορισμένοι από τους παράγοντες που επιταχύνουν την ηλεκτροχημική διεργασία της διάβρωσης είναι: η υψηλή δραστηριότητα (συνήθως χαμηλό δυναμικό αναγωγής) που κατέχει το στοιχείο, η αύξηση της οξύτητας του περιβάλλοντος λειτουργίας του στοιχείου ($0 \leq \text{pH} < 7$), η αύξηση της αγωγιμότητας του περιβάλλοντος του μετάλλου (θαλασσινό νερό, υγρασία κλπ.), η αύξηση της ταχύτητας της ροής του ρευστού που περιβάλλει το μεταλλικό στοιχείο (επιτάχυνση της οξειδωαναγωγικής διεργασίας), η αύξηση της θερμοκρασίας (επιτάχυνση σχηματισμού των χημικών αντιδράσεων), η ανομοιογένεια της επιφάνειας που δημιουργείται εξαιτίας της τριβής (π.χ. απομάκρυνση επικάλυψης), η ύπαρξη μηχανικών τάσεων (π.χ. κόπωση με διάβρωση) και η ανομοιογενή ενεργειακή κατανομή που μπορεί να υπάρξει εντός της κρυσταλλικής δομής. Η ανομοιογενή ενεργειακή φόρτιση σχετίζεται με τον σχηματισμό ανοδικών και καθοδικών περιοχών (δημιουργία γαλβανικών στοιχείων) εντός του ίδιου του υλικού. Τέτοια παραδείγματα ηλεκτροχημικών στοιχείων που προκαλούν την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού είναι: η διαφορετική μηχανική καταπόνηση (παραμορφωμένη κρυσταλλική δομή - μη παραμορφωμένη), η θερμοκρασιακή διαφορά (θερμή - ψυχρή περιοχή) και η ύπαρξη τριεπιφανειών (π.χ. διέλευση σωλήνα ύδρευσης από αέρα - μπετόν - χάλυβας) κατά μήκος ενός μεταλλικού στοιχείου [6].

Οι παράγοντες που αυξάνουν την αντοχή του υλικού στη διάβρωση σχετίζονται με τη χαμηλή δραστηριότητα (συνήθως υψηλό δυναμικό αναγωγής) που διαθέτει το μεταλλικό στοιχείο και αφορούν την δημιουργία παθητικού στρώματος στην επιφάνειά του. Τα παθητικά στρώματα αυτού του είδους αποτελούνται από οξείδια (π.χ. οξεία του χρωμίου), τα οποία είναι είτε αδιαπέραστα και αδρανή και παρεμποδίζουν δυναμικά τον σχηματισμό της επιφανειακής διάβρωσης είτε διαπερατά οπότε απλά μειώνουν τον ρυθμό της εξάπλωσης της διάβρωσης.

1.3.1.4 Φθορά

Με τον όρο φθορά χαρακτηρίζεται η σταδιακή μετατόπιση ή/και αποκόλληση μάζας υλικού από την επιφάνεια λειτουργίας ενός στερεού σώματος εξαιτίας της

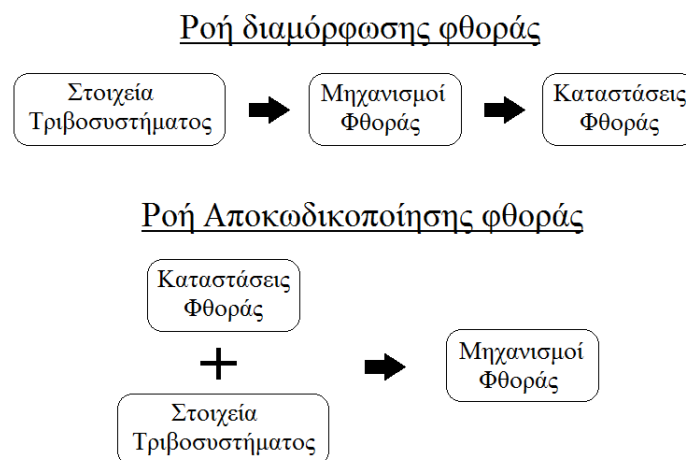
τριβο - αλληλεπίδρασής της με μία άλλη σταθερή ή κινούμενη προς αυτήν επιφάνεια. Συχνά ο όρος της φθοράς (wear) εσφαλμένα συγχέεται με τον όρο της επιφανειακής βλάβης (surface damage). Η φθορά αποτελεί μέρος των επιφανειακών βλαβών με τη διαφορά ότι αποτελεί αποκλειστικά αποτέλεσμα της τριβής. Οποιαδήποτε επιφανειακή βλάβη, η οποία δεν αποτελεί προϊόν τριβής, αλλά μπορεί να μοιάζει με μία αλλοίωση τριβής δεν χαρακτηρίζεται ως φθορά [7].

Ο τρόπος που συμπεριφέρεται η φθορά αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα του τριβοςυστήματος και όχι απαραίτητα χαρακτηριστικό των επιμέρους υλικών που απαρτίζουν τα εξαρτήματα του συστήματος. Για την επίλυση ενός προβλήματος φθοράς λαμβάνονται υπόψιν όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν το τριβοςύστημα. Η παραμικρή αλλαγή των παραμέτρων αυτών μπορεί να επηρεάσει άμεσα το μέγεθος της φθοράς, καθώς και τους μηχανισμούς φθοράς που εφαρμόζονται. Τα στοιχεία του τριβοςυστήματος κατηγοριοποιούνται σε οχτώ ομάδες [8]:

- Στα σώματα επαφής (contacting materials) τα οποία αναφέρονται στο υλικό και στη χημική σύσταση των τριβοςωμάτων, στο είδος και το πάχος των τυχόν επιμεταλλώσεων και των διαφόρων επιστρώσεων, στην σκληρότητα και στις επιφανειακές κατεργασίες που έχουν εφαρμοστεί.
- Στη γεωμετρία των συνεργαζόμενων επιφανειών (geometry of contacting pairs), η οποία αναφέρεται στο σχήμα ή στο περίγραμμα, στις διαστάσεις και στις τυχόν αιχμηρές περιοχές των τριβοςωμάτων.
- Στην τοπογραφία της επιφάνειας (surface topography), όπου έχει να κάνει με την τραχύτητα των επιφανειών λειτουργίας.
- Στη σύμπλεξη των επιφανειών τριβής (contact configuration), όπου αναφέρεται στην γεωμετρία και στην κατάσταση επαφής δύο συνεργαζόμενων τριβοςωμάτων, καθώς και στον προσανατολισμό της ροής του ρευστού που παρεμβάλλεται ανάμεσα τους.
- Στη σχετική κίνηση (relative motion), όπου περιγράφεται το είδος και τα χαρακτηριστικά της κίνησης (ολίσθηση, κύλιση, συνεχόμενη, διακοπτόμενη κλπ.), καθώς και πιο ειδικά χαρακτηριστικά (ταχύτητα, επιτάχυνση κλπ.).
- Στη φόρτιση (loading), όπου αναφέρεται το μέγεθος και ο τύπος της φόρτισης (στατική, δυναμική, κρούση κλπ.).
- Στη λίπανση (lubrication), όπου αναφέρεται το είδος της λίπανσης (υγρή ή ξηρή), ο τύπος του λιπαντικού (λάδι, γράσο κλπ.) και η χημική του σύσταση.

- Στο περιβάλλον (environment), όπου λαμβάνεται υπόψιν η αλληλεπίδραση του τριβοςυστήματος με το περιβάλλον λειτουργίας (διάβρωση).

Πολλές φορές η τροποποίηση κάποιου από αυτούς τους παράγοντες είναι ικανοποιητική ως προς την επίλυση ενός προβλήματος φθοράς, χωρίς την αλλαγή του υλικού. Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 1.15) παρουσιάζεται η διαδρομή του σχηματισμού της φθοράς και η διαδρομή της αποκωδικοποίησης της φθοράς που ακολουθείται σε μία ανάλυση. Γίνεται αντιληπτό ότι τα στοιχεία του τριβοςυστήματος με ενεργό ρόλο είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση συγκεκριμένων μηχανισμών φθοράς, οι οποίοι με την σειρά τους είναι υπαίτιοι για τις καταστάσεις φθοράς που προκύπτουν στην επιφάνεια ενός υλικού. Κατά την Ερμηνεία της επιφανειακής αλλοίωσης ο μηχανικός αναλυτής έρχεται πρώτα σε επαφή με την κατάσταση της φθοράς που έχει διαμορφωθεί στην επιφάνεια του υλικού και σε συνδυασμό με την εύρεση των στοιχείων που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του τριβοςυστήματος οδηγείται στους μηχανισμούς φθοράς, τους οποίους και καλείται να εξαλείψει.



Εικόνα 1.15: Ροή διαμόρφωσης και αποκωδικοποίησης της φθοράς.

Η συμπεριφορά της φθοράς (wear behavior) υποδιαιρείται σε δύο ποιοτικές κατηγορίες: στην ήπια φθορά (mild wear) και στην έντονη φθορά (severe wear). Η ήπια φθορά χαρακτηρίζεται από λεπτά και μικρής εμβέλειας σημάδια φθοράς, ενώ η έντονη φθορά χαρακτηρίζεται από τραχείς επιφάνειες μεγάλης εμβέλειας σε σημάδια φθοράς. Οι μηχανισμοί σχηματισμού της φθοράς και οι καταστάσεις φθοράς που προκύπτουν από αυτούς τους μηχανισμούς, αναλόγως του μεγέθους της επιφανειακής αλλοίωσης, χαρακτηρίζονται ως ήπιοι ή ως έντονοι (π.χ. mild thermal mechanisms, severe wear). Σε γενικές γραμμές, η έντονη φθορά είναι αποτέλεσμα της εφαρμογής

ιδιαίτερα υψηλών φορτίων, θερμοκρασιών, ταχυτήτων λειτουργίας, της ανεπαρκούς λίπανσης κλπ.

1.3.2 Άμεση αστοχία – Υπερφόρτιση

Η άμεση αστοχία αποτελεί το είδος της αστοχίας που αναπτύσσεται ραγδαία χωρίς προηγούμενη ένδειξη και συνδέεται με την υπερφόρτιση ενός εξαρτήματος ή μίας πιο σύνθετης κατασκευής. Με τον όρο αστοχία υπερφόρτισης ενός υλικού (overload failure) γίνεται αναφορά στην ταχύτητα εξελισσόμενη όλκιμη ή ψαθυρή του θραύση, όταν αυτή οφείλεται σε εφαρμοζόμενα φορτία που υπερβαίνουν την φέρουσα ικανότητα του (load - bearing capacity). Η υπέρβαση της φέρουσας ικανότητας ενός υλικού προκύπτει είτε από την εφαρμογή υπέρμετρης τάσης, είτε από την υποβάθμιση της μηχανικής αντοχής του. Στη υπέρμετρη τάση το υλικό φορτίζεται πάνω από το όριο αντοχής του (όριο θραύσης), για αυτό και το χρονικό διάστημα μέχρι τη πρόκληση της τελικής θραύσης είναι πολύ σύντομο. Στην υποβάθμιση της μηχανικής αντοχής, η εφαρμοζόμενη τάση δεν ξεπερνάει το προμελετημένο όριο αντοχής, αλλά το όριο αντοχής που έχει προκύψει εξαιτίας της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του υλικού. Η υποβάθμιση μπορεί να είναι αποτέλεσμα ενός ή συνδυασμός περισσοτέρων παραγόντων όπως είναι η υψηλή ή χαμηλή θερμοκρασία, η μηχανική φόρτιση και η οξύτητα του περιβάλλοντος. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν άμεσα τις ιδιότητες του μεταλλικού υλικού που σχετίζονται με την μείωση της αντοχής, της όλκιμότητας και της δυσθραυστότητας [1].

Οι τύποι των αστοχιών λόγω υπερφόρτισης ποικίλουν, μπορεί να είναι σχετικά απλοί ή και σύνθετοι και δεν είναι αποτέλεσμα μόνον της λανθασμένης σχεδιαστικής εκτίμησης, όπως οι περισσότεροι θεωρούν. Τα αίτια της αστοχίας ενός υλικού από υπερφόρτιση μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κλάσεις:

- Στην αστοχία υπερφόρτισης εξαιτίας της ανεπαρκούς αντοχής του υλικού (insufficient material strength) και του ανεπαρκούς σχεδιασμού (under design).
- Στην αστοχία υπερφόρτισης λόγω των συγκεντρώσεων των τάσεων (stress concentration) και των ατελειών που συναντώνται στη μικροδομή του υλικού (material defects).
- Στην αστοχία υπερφόρτισης εξαιτίας της αλλαγής των ιδιοτήτων του υλικού (material alteration) από μηχανική καταπόνηση ή υψηλά επίπεδα καταστροφής ή την μετάσταση της μικροδομής του υλικού.

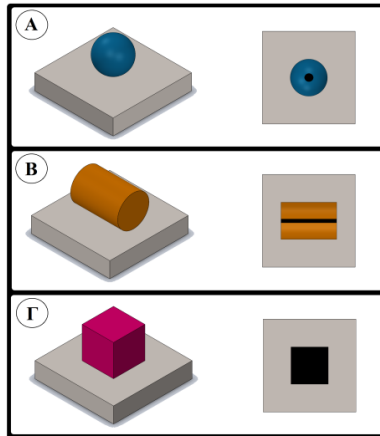
1.4 Εμβάθυνση στο φαινόμενο της φθοράς

1.4.1 Συντελεστές σχεδιασμού

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκαν οχτώ βασικά για τη συμπεριφορά της σχηματιζόμενης φθοράς είδη παραγόντων. Από αυτούς τους παράγοντες όσοι συνθέτουν το τριβοςύστημα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κύριους συντελεστές σχεδιασμού. Οι συντελεστές σχεδιασμού λαμβάνονται υπόψιν στο στάδιο της μοντελοποίησης και της βελτιστοποίησης ενός τριβοςυστήματος προτού αυτό τεθεί σε λειτουργία. Οι συντελεστές αυτοί διακρίνονται στους μηχανικούς συντελεστές (mechanical factors), στους συντελεστές υλικού (material factors), στους συντελεστές λίπανσης (lubrication factors) και στους συντελεστές του περιβάλλοντος λειτουργίας (environmental factors) [8].

Οι μηχανικοί συντελεστές σχετίζονται γενικά με την γεωμετρία (σχήμα, μέγεθος, ανοχές κλπ.), την τραχύτητα των επιφανειών, το φορτίο και την σχετική κίνηση. Οι συντελεστές υλικού εμπλέκονται στην επιλογή του υλικού σε συνδυασμό με την τεχνική ισχυροποίησης που θα του επιβληθεί (βαφή, εναζώτωση κλπ.). Οι συντελεστές λίπανσης σχετίζονται με την μέθοδο της λίπανσης (υγρή ή ξηρή), την επιλογή του λιπαντικού μέσου και τον σχεδιασμό του κύκλου τροφοδοσίας του. Οι συντελεστές του περιβάλλοντος λειτουργίας συνδέονται με πληροφορίες όπως η φύση του ρευστού μέσου που θα χρησιμοποιηθεί (αέρια ή υγρή κατάσταση), την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία λειτουργίας και τις συνθήκες που επικρατούν στο γύρω φυσικό περιβάλλον (θερμοκρασία, υγρασία κλπ.).

Τα δεδομένα που απορρέουν από τη χρήση των παραπάνω συντελεστών συμβάλλουν στον καθορισμό του βέλτιστου τρόπου συνεργασίας δύο επιφανειών με την ελάχιστη δυνατή φθορά και την μέγιστη δυνατή επιμήκυνση του ορίου ζωής του τριβοςυστήματος. Ως επακόλουθο της τελικής επιλεγμένης γεωμετρίας διακρίνονται τρεις κύριες καταστάσεις επαφής (Εικόνα 1.16): η σημειακή (σφαίρα σε επίπεδο), η γραμμική (κύλινδρος σε επίπεδο) και η πλήρως προσαρμοσμένη (επίπεδο σε επίπεδο).



Εικόνα 1.16: Οι τρεις καταστάσεις επαφής. (Α) σημειακή, (Β) γραμμική και (Γ) πλήρως προσαρμοσμένη [8, εμπνευσμένο από Εικόνα 2.1.2, σελ.26].

1.4.2 Μηχανισμοί φθοράς

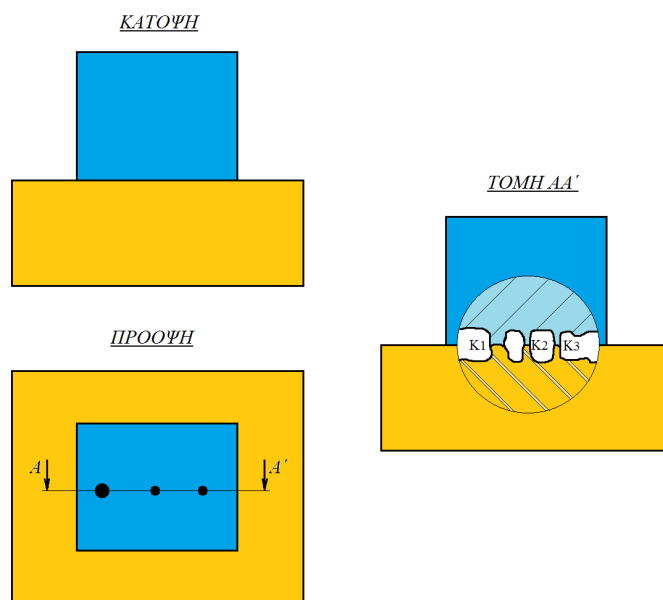
Μηχανισμός φθοράς (wear mechanism) ονομάζεται κάθε μηχανισμός ή συνδυασμός μηχανισμών, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την σχηματιζόμενη φθορά σε ένα εξάρτημα, εξαιτίας της επαφής και της σχετικής κίνησης μεταξύ μίας στερεής επιφάνειας και ενός ή περισσοτέρων διαφορετικών στοιχείων (στερεή επιφάνεια, ρευστό λειτουργίας, λιπαντικό κλπ.). Το πλήθος των μηχανισμών φθοράς που έχει καταγραφεί είναι ιδιαίτερα μεγάλο, καθιστώντας την αποστήθιση όλων αρκετά δύσκολη. Στην πράξη, ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι η γνώση οχτώ βασικών μηχανισμών είναι ικανοποιητική για την περιγραφή της συμπεριφοράς της φθοράς τις περισσότερες των περιπτώσεων.

Οι πέντε από αυτούς τους μηχανισμούς αναφέρονται στον τρόπο απομάκρυνσης του υλικού και είναι: οι μηχανισμοί φθοράς πρόσφυσης (adhesive wear mechanisms), οι μηχανισμοί παραμόρφωσης μονού κύκλου (single - cycle deformation mechanisms), οι μηχανισμοί παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου (repeated - cycle deformation mechanisms), οι μηχανισμοί ηλεκτρικής εκκένωσης (electrical discharge mechanisms) και οι ατομικοί μηχανισμοί (atomic mechanisms). Οι υπόλοιποι τρεις μηχανισμοί αναφέρονται στις επιφανειακές αλλαγές που επηρεάζουν - ελέγχουν την ανάπτυξη της φθοράς και είναι: οι χημικοί μηχανισμοί (chemical mechanisms), οι θερμικοί μηχανισμοί (thermal mechanisms) και οι μηχανισμοί τριβο - υμενίου (tribofilm mechanisms).

Τις περισσότερες φορές κατά την επιθεώρηση μίας φθαρμένης επιφάνειας, η προκληθείσα φθορά δεν είναι αποτέλεσμα ενός μόνου μηχανισμού, αλλά αποτέλεσμα της συνύπαρξης, της αλληλεπίδρασης και του συναγωνισμού πλήθους διαφορετικών

μηχανισμών. Σε μία κατάσταση φθοράς, οι μηχανισμοί που ευθύνονται για την έναρξη του σχηματισμού των αλλοιώσεων, συνήθως επικαλύπτονται από τους μηχανισμούς που εμφανίζονται στη συνέχεια. Οι μηχανισμοί που έπονται αποτελούν αποτέλεσμα των αρχικών μηχανισμών. Η φθορά των δευτερογενών μηχανισμών είναι πάντοτε εκτενέστερη των πρωτοεμφανιζόμενων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην γίνεται εύκολα διακριτός ο υπαίτιος μηχανισμός της αστοχίας.

Οι **μηχανισμοί πρόσφυσης** σχετίζονται με τη δημιουργία διακριτών περιοχών σύνδεσης - συγκόλλησης, αλλά και με τη μεταφορά υλικού μεταξύ δύο εφραπτομενικά συνεργαζόμενων επιφανειών. Οι περιοχές σύνδεσης αποτελούν το χαρακτηριστικό γνώρισμα των μηχανισμών πρόσφυσης και ονομάζονται κόμβοι συνένωσης (junctions) (Εικόνα 1.17). Κατά την σχετική κίνηση της μίας επιφάνειας επί της άλλης οι δημιουργημένοι κόμβοι μεταξύ των επιφανειών αποσχίζονται, δίνοντας τη θέση τους σε νέους. Εάν ο δεσμός είναι ισχυρός, τότε η θραύση του κόμβου θα πραγματοποιηθεί από την πλευρά της πιο ευαίσθητης επιφάνειας (weaker asperity or surface), αφαιρώντας από αυτήν υλικό. Εάν, ωστόσο, ο δεσμός ενός κόμβου είναι αδύναμος τότε ο διαχωρισμός θα επέλθει ενδιάμεσα του κόμβου, με αποτέλεσμα να μην υπάρξει μεταφορά υλικού.

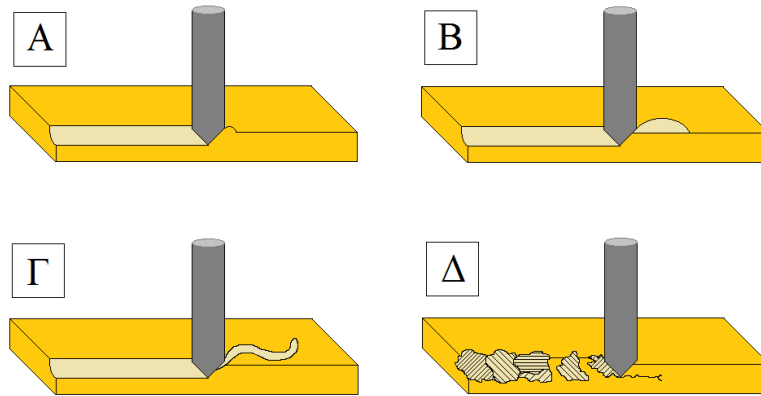


Εικόνα 1.17: Σχηματική αναπαράσταση των κόμβων συνένωσης ανάμεσα σε δύο ολισθούμενες επιφάνειες [8, εμπνευσμένο από Εικόνα 2.2.1.1, σελ.34].

Στην περίπτωση του ισχυρού δεσμού, αφότου πραγματοποιηθεί η απόσχιση, το μεταφερόμενο υλικό - απόρροια του σχηματισμένου κόμβου - προσκολλάται στην επιφάνεια με την οποία συνδέεται, εξαιτίας της παραμένουσας ελαστικής ενέργειας που διαθέτει (stored elastic energy). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται μικρά τμήματα ισχυρής παραμόρφωσης. Το μεταφερόμενο υλικό μπορεί, ωστόσο, να μην προσκολληθεί και να αποκολληθεί τελείως, εξαιτίας της μεταγενέστερης επαφής των δύο επιφανειών, σχηματίζοντας σωματίδια εκτριβής (wear debris).

Η πιθανότητα δημιουργίας φθοράς λόγω πρόσφυσης ανάμεσα σε δύο επιφάνειες εξαρτάται από τις ιδιότητες των δύο υλικών. Η φθορά πρόσφυσης αυξάνεται όταν η ενέργεια των επιφανειών μεγαλώνει (π.χ. με την αύξηση της θερμοκρασίας), όταν διαθέτουν παρόμοια χημική και κρυσταλλική δομή και κοινή διαλυτότητα. Από την άλλη επηρεάζεται αρνητικά ο σχηματισμός της από την ύπαρξη επιφανειακών ακαθαρσιών, περιοχών οξείδωσης και την παρουσία υγρών παρεμβυσμάτων (λιπαντικά). Οι μηχανισμοί πρόσφυσης αποδίδουν έντονα σημάδια φθοράς (severe) όταν το συνεργαζόμενο ζευγάρι είναι μέταλλο με μέταλλο και η σχετική τους κίνηση πραγματοποιείται υπό την απουσία λιπαντικού. Ενώ τα σημάδια φθοράς είναι ασθενεί (mild) όταν το συνεργαζόμενο ζευγάρι είναι μέταλλο με αμέταλλο ή αμέταλλο με αμέταλλο και αντίστοιχα όταν η σχετική τους κίνηση πραγματοποιείται υπό την παρουσία λιπαντικού.

Στους **μηχανισμούς παραμόρφωσης μονού κύκλου** ανήκουν οι μηχανισμοί που με μία μόνο συμπλοκή (single engagement) μπορούν να προκαλέσουν φθορά. Το βασικό γνώρισμα των μηχανισμών αυτών είναι η πλαστική παραμόρφωση και η θραύση που προκύπτει όταν μία σκληρότερη επιφάνεια έρχεται σε επαφή με μία πιο μαλακή. Η παραμόρφωση και η απώλεια υλικού μπορούν να συντελούνται μεμονωμένα ή ταυτόχρονα. Κατά την ολίσθηση δύο επιφανειών οι μηχανισμοί παραμόρφωσης μονού κύκλου συνήθως αποκαλούνται μηχανισμοί φθοράς εκτριβής (abrasive wear mechanisms). Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα φθοράς αυτών των μηχανισμών κατά την ολίσθηση είναι η παραγωγή μικρών θραυσμάτων (micro cracking), η δημιουργία μίας συνεχόμενης εκδοράς - όργωμα (plowing), η σφηνοειδής διαμόρφωση (wedge formation) και η αποκοπή συνεχόμενου αποβλήτου (cutting) (Εικόνα 1.18). Ο σχηματισμός εκδορών (scratches), αυλακώσεων (grooves), κορυφογραμμών (ridges), ρωγμών, μικρών αποκολλήσεων (chips), αποβλήτων και παραμορφωμένων σωματιδίων εκτριβής (deformed wear debris) είναι επίσης χαρακτηριστικά που υποδηλώνουν την ύπαρξη τέτοιου είδους μηχανισμών.



Εικόνα 1.18: Αναπαράσταση της απομάκρυνσης υλικού κατά την ύπαρξη των μηχανισμών παραμόρφωσης μονού κύκλου. (Α): Συνεχόμενη εκδορά ή όργωμα, (Β): Σφηνοειδής διαμόρφωση, (Γ): Συνεχόμενο απόβλητο και (Δ): Μικροθραύσεις [8, εμπνευσμένο από Εικόνα 2.2.2.1, σελ.38]

Στους **μηχανισμούς παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου** ανήκουν οι μηχανισμοί που απαιτούν αρκετούς κύκλους επαφής για την εκδήλωση της φθοράς. Για το λόγο αυτό όσο περισσότεροι είναι οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι λειτουργίας τόσο πιο αισθητά γίνονται τα σημάδια της φθοράς. Παραδείγματα τέτοιων μηχανισμών είναι οι μηχανισμοί κόπωσης (fatigue mechanisms), που εμπλέκονται με τον σχηματισμό και την διάδοση των ρωγμών, οι μηχανισμοί κυκλικού ερπυσμού (ratcheting or cyclic creep mechanisms), που σχετίζονται με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης και οι μηχανισμοί πλαστικής παραμόρφωσης (delamination mechanisms), που εμπλέκονται με την συσσώρευση των αταξιών (dislocations). Οι ενδείξεις που αποκωδικοποιούν την ύπαρξη των μηχανισμών αυτών είναι ο σχηματισμός ρωγμών, τα σημάδια της διάδοσης των ρωγμών, τα σημάδια δημιουργίας σταδιακής πλαστικής παραμόρφωσης και η παραγωγή σωματιδίων εκτριβής σχήματος αιμοπεταλίου (platelet wear debris).

Οι **χημικοί μηχανισμοί** αποτελούν διεργασίες φθοράς που συμπεριλαμβάνουν την αφαίρεση και τον ανασχηματισμό των χημικών στρωμάτων που δημιουργούνται πάνω στις συνεργαζόμενες επιφάνειες ενός τριβοσυστήματος. Ο σχηματισμός και αντίστοιχα ο ανασχηματισμός των χημικών στρωμάτων οφείλεται στη φύση των μεταλλικών υλικών και στη χημική αλληλεπίδραση των επιφανειών με το περιβάλλον λειτουργίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τέτοιου στρώματος είναι το παθητικό στρώμα οξειδίων που αναπτύσσεται επιδερμικά ενός μεταλλικού στοιχείου και δρα προστατευτικά έναντι της διάβρωσης.

Η απομάκρυνση αυτών των στρωμάτων οφείλεται στην εμφάνιση και στη συνύπαρξη διαφορετικών μηχανισμών. Οι μηχανισμοί αυτοί αφορούν κυρίως τους μηχανισμούς παραμόρφωσης μονού και επαναλαμβανόμενου κύκλου και τους θερμικούς μηχανισμούς. Οι μηχανισμοί πρόσφυσης δεν συμμετέχουν στην αφαίρεση υλικού, διότι οι δεσμοί των σχηματιζόμενων κόμβων ανάμεσα στα χημικά διαμορφωμένα στρώματα είναι ιδιαίτερα ασθενείς.

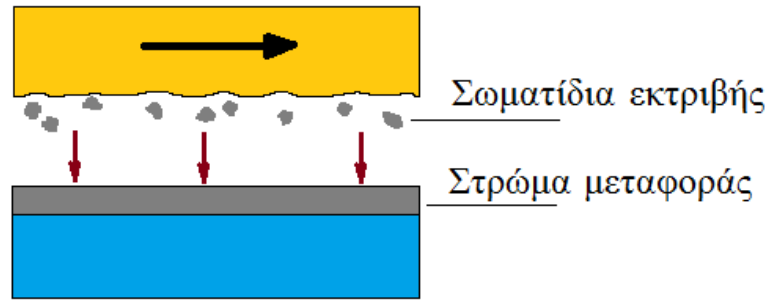
Γενικά, η ύπαρξη αυτών των στρωμάτων αναστέλλει σημαντικά τις αρνητικές επιπτώσεις των φαινομένων της τριβής και της πρόσφυσης. Η παρουσία ενός στρώματος οξειδίων ή άλλων χημικών στρωμάτων πάνω σε μία επιφάνεια δεν καταδεικνύει απαραίτητα ότι η διεργασία φθοράς είναι αποτέλεσμα χημικών μηχανισμών.

Οι **θερμικοί μηχανισμοί** αποτελούν διεργασίες φθοράς που σχετίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας ως αποτέλεσμα της τριβής. Οι θερμικές φθορές (thermal wear) που προκύπτουν διακρίνονται σε εκτοπισμένες περιοχές - εκδορές και σε αποκολλημένες περιοχές - θραύσεις.

Οι εκδορές είναι αποτέλεσμα της θερμικής μαλάκωσης της επιφάνειας του υλικού. Η θερμοκρασία μαλάκωσης που δημιουργείται είναι τόσο υψηλή, ώστε το υλικό είτε να μετατοπίζεται σαν παχύρευστο υγρό είτε να εξαχνίζεται (sublimation or evaporation). Οι θραύσεις αποτελούν περιοχές αφαίρεσης υλικού και οφείλονται στα διάφορα μοτίβα των ρωγμών (crack patterns) που σχηματίζονται από τις απότομα αναπτυσσόμενες θερμικές τάσεις (thermal cracks).

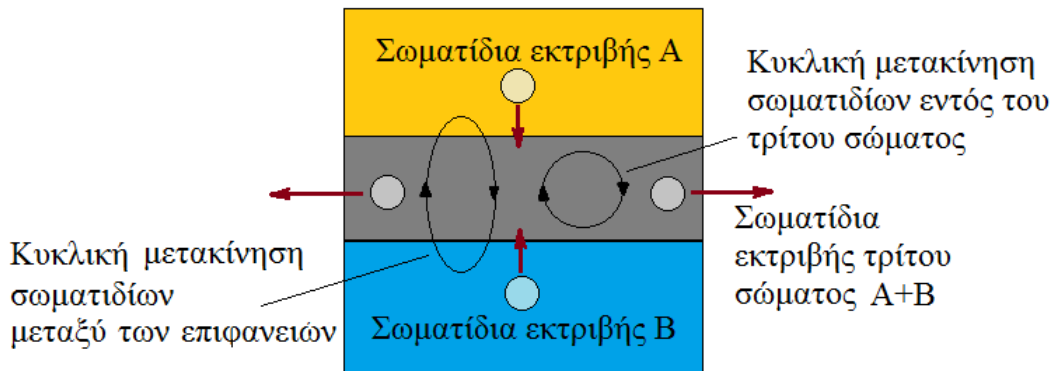
Η δράση των θερμικών μηχανισμών περιορίζεται ή εξαλείφεται μέσα από τη χρήση υλικών με αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και τη χρήση ικανοποιητικών τεχνικών απαγωγής της θερμότητας (heat dissipation).

Οι **μηχανισμοί τριβο - υμενίου** ανήκουν στις διεργασίες φθοράς κατά τις οποίες τα σωματίδια εκτριβής από την ολίσθηση δύο συνεργαζόμενων επιφανειών προσκολλούνται εκ νέου πάνω ή ανάμεσα τους, σχηματίζοντας στρώματα τριβής (layers or films). Η σύνθεση των στρωμάτων αποτελείται από σωματίδια εκτριβής της μίας ή και των δύο επιφανειών λειτουργίας. Τα στρώματα αυτά χαρακτηρίζονται ως το τρίτο σώμα του τριβοσυστήματος (third - body layer or film). Όταν τα σωματίδια εκτριβής της μίας επιφάνειας επικαλύπτουν την απέναντι επιφάνεια, τότε το δημιουργημένο υμένιο χαρακτηρίζεται ως στρώμα μεταφοράς (transfer layer or film) (Εικόνα 1.19).



Εικόνα 1.19: Αναπαράσταση του στρώματος μεταφοράς (transfer layer) κατά την ολίσθηση δύο επιφανειών.

Πολλές φορές τα απόβλητα που συντελούν το εκάστοτε στρώμα τριβο-υμενίου έχουν την τάση να ακολουθούν μία συνεχόμενη κυκλική τροχιά από και προς τα άλλα στρώματα που βρίσκονται είτε πάνω είτε ενδιάμεσα των επιφανειών. Κατά τη κυκλική αυτή μετανάστευση των σωματιδίων εκτριβής ένα μέρος του υλικού δεν ξανά προσκολλάται αλλά χάνεται (Εικόνα 1.20). Τα κενά που σχηματίζονται στα στρώματα τείνουν και πάλι να καλυφθούν από τα καινούργια απόβλητα που παράγονται. Με αυτό τον τρόπο επέρχεται η σταδιακή φθορά των επιφανειών λειτουργίας.



Εικόνα 1.20: Αναπαράσταση της διεργασίας φθοράς ενός στρώματος τριβής [8, εμπνευσμένο από Εικόνα 2.2.6.2, σελ.50]

Οι παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα το σχηματισμό των στρωμάτων τριβής είναι το μέγεθος του φορτίου, η ταχύτητα ης σχετικής κίνησης, η επιφανειακή τραχύτητα, το είδος της λίπανσης, τα χαρακτηριστικά των υλικών και η γεωμετρία των επιφανειών.

Οι **μηχανισμοί ηλεκτρικής εκκένωσης** αφορούν τους μηχανισμούς αφαίρεσης υλικού, οι οποίοι βασίζονται στην ανάπτυξη ρεύματος υψηλής έντασης μεταξύ δύο συνεργαζόμενων επιφανειών. Το γνωστότερο παράδειγμα ηλεκτρικής εκκένωσης που συναντάται στη φύση είναι το φαινόμενο του κεραυνού.

Οι **ατομικοί μηχανισμοί** αποτελούν διεργασίες αφαίρεσης υλικού μέσω της μετανάστευσης μεμονωμένων ατόμων ανάμεσα σε δύο συνεργαζόμενες επιφάνειες. Το φαινόμενο της διάχυσης αποτελεί έναν τέτοιο μηχανισμό, όταν εξαιτίας της τριβο - αλληλεπίδρασης δύο επιφανειών αναπτύσσεται θερμότητα ικανή για την χαλάρωση των ατομικών δεσμών.

1.4.3 Καταστάσεις φθοράς

Οι καταστάσεις φθοράς μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις γενικές κατηγορίες: στην ολίσθηση (sliding), στην κύλιση (rolling), στην κρούση (impact) και στις καταστάσεις εκτριβής (abrasive situations). Οι τρεις πρώτες κατηγορίες αναφέρονται στη φύση της κίνησης που χαρακτηρίζει τα σώματα επαφής του τριβουσυστήματος. Ενώ η τέταρτη περίπτωση αναφέρεται στη φθορά που προκύπτει από τα σωματίδια εκτριβής (abrasive particles), όταν η φθορά που προκαλείται από αυτά κυριαρχεί έναντι των τριών άλλων κατηγοριών.

Ολίσθηση ονομάζεται η επαπτόμενη κίνηση δύο σωμάτων, των οποίων οι ταχύτητες στο σημείο επαφής είναι διαφορετικές ως προς τη φορά και το μέγεθος τους. Αντιθέτως, η κύλιση και η κρούση αποτελούν κινήσεις κάθετες στην επιφάνεια. Έχει μάλιστα παρατηρηθεί ότι η φθορά που προκύπτει κατά την ολίσθηση είναι εντονότερη από τις άλλες δύο περιπτώσεις κίνησης. Η συμπεριφορά της φθοράς εξαιτίας της ολίσθησης διακρίνεται σε αρχική (initial behavior) και σε μακράς διάρκειας (long - term behavior).

Στο στάδιο της αρχικής φθοράς οι μηχανισμοί που κυριαρχούν είναι κατά κύριο λόγο οι μηχανισμοί παραμόρφωσης μονού κύκλου και οι μηχανισμοί πρόσφυσης. Η επιφανειακή μορφολογία που χαρακτηρίζει την αρχική συμπεριφορά της φθοράς αποτελείται από αυλακώσεις με κατεύθυνση την φορά της κίνησης, από στοιχεία πλαστικής παραμόρφωσης και από σημάδια προσκολλημένου (transferred) ή αποκολλημένου (pulled - out) υλικού. Στην μακροπρόθεσμη φθορά οι μηχανισμοί που συνήθως κυριαρχούν είναι οι μηχανισμοί παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου, οι χημικοί μηχανισμοί, οι μηχανισμοί τριβο - υμενίου και οι θερμικοί μηχανισμοί. Σε αυτή τη περίπτωση οι αρχικές αυλακώσεις είναι λιγότερο εμφανείς και ορισμένες φορές έχουν τελείως εξαφανιστεί. Η συνήθης μορφολογία σε αυτό το στάδιο της φθοράς μπορεί να είναι η εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση, τα ραγίσματα, ο σχηματισμός οξειδίων και η δημιουργία στρωμάτων τριβής (transfer tribofilm). Σε κάθε περίπτωση η επίτευξη επιθυμητών ποσοστών φθοράς (ήπια

φθορά) κατά τη σχετική κίνηση της ολισθήσεως, επιτυγχάνεται μόνο όταν το μέγεθος των διατμητικών τάσεων που εφαρμόζονται είναι κάτω του ήμισυ της τάσης του ορίου διαρροής του υλικού.

Ορισμένες από τις πιο γνωστές καταστάσεις φθοράς που κεντρίζουν το ενδιαφέρον σε συνθήκες ολίσθησης είναι: η έντονη φθορά ολίσθησης (scoring), η έντονη πρόσφυση (galling wear), η φθορά ολίσθησης με ταλαντωτικές κινήσεις μικρού πλάτους (fretting wear) και η ολίσθηση με κρούση (sliding with impact wear).

Η έντονη φθορά ολίσθησης αναφέρεται στις έντονες αμυχές (severe scratches) που έχουν σχηματιστεί στην φορά της κίνησης και μπορεί να οφείλεται στις τοπικές συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης (solid - phase welding) ή στην φθορά εκτριβής (abrasion).

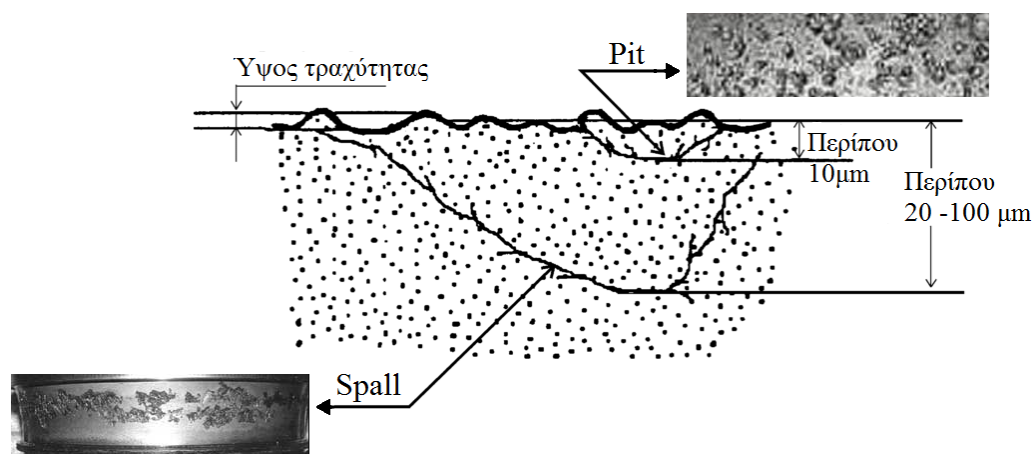
Με τον όρο έντονη πρόσφυση περιγράφονται οι τεταμένες τοπικές συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης (solid - phase welding) που δημιουργούνται ανάμεσα σε δύο ολισθούμενες επιφάνειες (severe form of scuffing) και συνοδεύονται από εκτεταμένη επιφανειακή φθορά (surface gross damage). Οι όροι galling, scuffing και scoring συχνά συγχέονται μεταξύ τους και άλλοτε ανάλογα την προέλευση της βιβλιογραφίας (αγγλική ή αμερικάνικη) τους αποδίδεται διαφορετική Ερμηνεία. Για το λόγο αυτό η ερμηνεία αλλά και η χρήση τους πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Η φθορά ολίσθησης με ταλαντωτικές κινήσεις μικρού πλάτους, αφορά τη φθορά που δημιουργείται από δύο ολισθούμενων μεταξύ τους επιφανειών υπό την παρουσία μικρο - ταλαντωτικής κίνησης και σχετίζεται με την απομάκρυνση σωματιδίων υλικού και αντιστοίχως τη δημιουργία σωματιδίων εκτριβής. Αυτή η κατάσταση φθοράς τις περισσότερες φορές συνδέεται με τους όρους της διάβρωσης (fretting corrosion) και της κόπωσης (fretting fatigue).

Η ολίσθηση με κρούση εμφανίζεται στις περιπτώσεις ολίσθησης, όπου η επιφάνεια λειτουργίας συνεχώς μετατίθεται, όπως ακριβώς συμβαίνει κατά την επαφή δύο οδοντωτών τροχών. Η κρούση συμβαίνει κατά την αρχή της σύμπλεξης των δύο επιφανειών, ενώ η ολίσθηση κατά τη σχετική κίνηση των δύο επιφανειών λειτουργίας, έως ότου αυτές απεμπλακούν και δώσουν την θέση τους στις επόμενες [7, 8].

Κύλιση ονομάζεται η περιστροφική κίνηση ενός σφαιρικού ή κυλινδρικού σώματος γύρω από τον άξονα συμμετρίας του, το οποίο ιδανικά κυλιέται δεν ολισθαίνει πάνω σε μία άλλη επιφάνεια. Η επιφάνεια κύλισης μπορεί να είναι επίπεδη

(π.χ. διεργασία έλασης) ή ομόκεντρα (π.χ. έδρανα κύλισης-άτρακτος, ρουλεμάν κλπ.) ή με αντίθετη καμπυλότητα [7].

Οι μηχανισμοί που κυριαρχούν είναι οι μηχανισμοί της παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου και συγκεκριμένα οι μηχανισμοί της κόπωσης. Μάλιστα οι μηχανισμοί αυτοί αναφέρονται ως μηχανισμοί επιφανειακής κόπωσης (surface fatigue mechanisms). Η επιφανειακή μορφολογία που διαμορφώνεται χαρακτηρίζεται από ρωγμές (cracks), και από απολεπίσεις υλικού, συνήθως 20 έως 100μm (spalls) ή μικρότερες αποκολλήσεις μορφής βελονισμού με διάβρωση, συνήθως έως 10μm (pits) (Εικόνα 1.21) [9]. Ορισμένες φορές όμως οι ρωγμές που εμφανίζονται δεν οφείλονται μόνο στους μηχανισμούς κόπωσης αλλά και στην μεγάλη έλξη (traction) που δημιουργείται μεταξύ των επιφανειών κύλισης. Η συμπεριφορά της φθοράς κατά την κύλιση περιγράφεται συνήθως από τον αριθμό των περιστροφών και αναλόγως κρίνεται εάν το υλικό έχει ανταπεξέλθει στο προσδόκιμο όριο λειτουργίας του. Σε γενικές γραμμές όταν η τάση επαφής (contact stress) είναι χαμηλότερη της τάσης του ορίου διαρροής (yield stress) τότε η διαμορφωμένη φθορά είναι ηπιότερη, αποδίδοντας μικρότερες και πιο ρηχές αποκολλήσεις (spalls και pits). Η φθορά λόγω κύλισης συνήθως διαταράσσεται όταν η κίνηση συνδυάζεται με την ολίσθηση, υπό την μορφή γλιστρήματος (slip in rolling contact) ή/και με την κρούση.

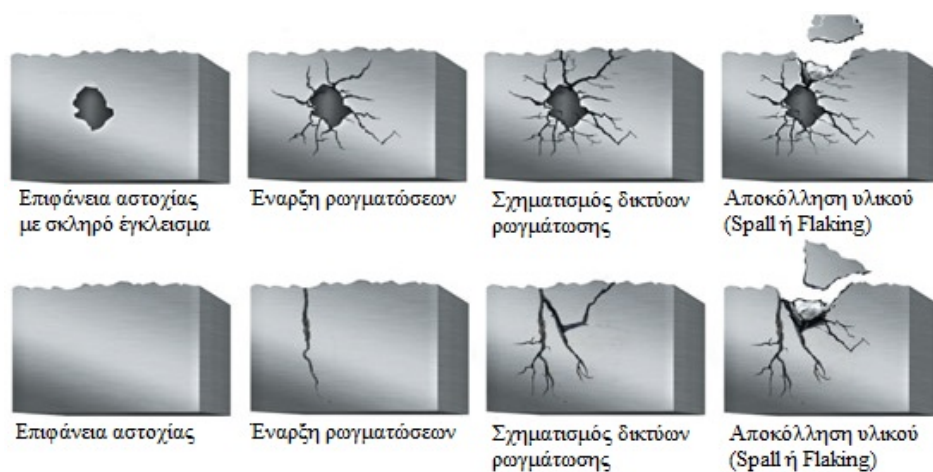


Εικόνα 1.21: Απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ μίας αποκόλλησης pit και spall [9, Εικόνα 1, σελ. 1308].

Η σχετική κίνηση της **κρούσης** αναφέρεται κυρίως στις επαναλαμβανόμενες συγκρούσεις (repeated collisions) μεταξύ δύο συνεργαζόμενων στερεών επιφανειών. Οι κυρίαρχοι μηχανισμοί φθοράς που συναντώνται είναι οι μηχανισμοί παραμόρφωσης μονού και επαναλαμβανόμενου κύκλου.

Όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις υπερβαίνουν το όριο ελαστικότητας του υλικού, τότε οι μηχανισμοί παραμόρφωσης μονού κύκλου τείνουν να επικρατήσουν,

προκαλώντας έντονα σημάδια φθοράς (severe wear). Ενώ όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις είναι αρκετά χαμηλότερες του ορίου ελαστικότητας, τότε οι επικρατέστεροι μηχανισμοί είναι αυτοί της παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου, προκαλώντας ήπια σημάδια φθοράς (mild wear). Μακροσκοπικά η μορφολογία της αλλοιωμένης από τη κρούση επιφάνειας χαρακτηρίζεται από σημάδια πλαστικής παραμόρφωσης με κατεύθυνση τη φορά της κίνησης, από ρωγμές και από αποκολλήσεις υλικού τύπου απολέπισης (spalling) ή ξεφλουδίσματος (flaking). Οι όροι αυτοί συχνά συγχέονται στη βιβλιογραφία για την περιγραφή εκλεπίσεων, ωστόσο, το ξεφλούδισμα αποτελεί μία εντονότερης μορφής αποκόλληση από ότι η απολέπιση. Η δημιουργία αυτού του είδους των αποκολλήσεων, όπως ισχύει και για την κύλιση, αλλά σε εντονότερη κλίμακα στη περίπτωση της κρούσης, είναι το αποτέλεσμα του δικτύου ρωγματώσεων που δημιουργείται είτε με επίκεντρο κάποιο εσωτερικό σκληρό έγκλεισμα είτε από την επιφάνεια λειτουργίας προς το εσωτερικό του υλικού (Εικόνα 1.22).



Εικόνα 1.22: Σχηματική αναπαράσταση της αποκόλλησης τύπου *spall* ή *flaking* με σημείο έναρξης ένα σκληρό έγκλεισμα (πάνω) και την επιφάνεια λειτουργίας (κάτω) [10].

Το είδος της κίνησης που συναντάται σε ένα τριβοςύστημα είναι τις περισσότερες φορές σύνθετο, με αποτέλεσμα σπάνια να συναντάται καθαρή κρούση. Στα μηχανικά εξαρτήματα οι καταστάσεις φθοράς εξαιτίας της κρούσης συνήθως εμπλέκονται με ορισμένες καταστάσεις ολίσθησης. Σε αυτή τη περίπτωση το είδος της κρούσης αποκαλείται σύνθετη κρούση (compound impact) και προκύπτει από δυο καταστάσεις. Στη μία περίπτωση η πρόσκρουση ενός κινούμενου σώματος πάνω σε ένα άλλο ακίνητο σώμα δεν γίνεται κατακόρυφα αλλά υπό κλίση, ενώ στην άλλη περίπτωση η πρόσκρουση γίνεται κατακόρυφα, αλλά η επιφάνεια αποδέκτης της κρούσης είναι κινούμενη. Στη δεύτερη περίπτωση το μέγεθος της προκύπτουσας

επιφάνειας ολίσθησης είναι ανάλογο της εφαπτομενικής ταχύτητας και του χρόνου επαφής ή της διάρκειας της κρούσης. Εν αντιθέσει με την καθαρή κρούση, στις καταστάσεις φθοράς των σύνθετων κρούσεων η ύπαρξη λίπανσης συμβάλλει αισθητά στην αύξηση του προσδόκιμου ορίου αντοχής στη φθορά (wear life).

Η ολίσθηση κατά τη κρούση μπορεί να οφείλεται και σε ταλαντωτικές κινήσεις μικρού πλάτους (fretting motions). Οι δονήσεις αυτές μπορεί να εμφανίζονται τοπικά κατά τη κρούση εξαιτίας της κακής προσαρμογής ή της ανεπαρκούς σύσφιξης των επιμέρους μερών του μηχανισμού. Είναι πιθανό, επίσης, το επίκεντρο αυτών των δονήσεων να προέρχεται από κάποιο άλλο μέρος της κατασκευής ή του μηχανήματος και να μεταφέρεται στο σημείο της κρούσης.

Όταν επέρχεται μεγάλη ολίσθηση κατά τη σχετική κίνηση της κρούσης, είναι πολύ πιθανό να εμπλακούν στη διαμόρφωση της φθοράς και οι θερμικοί μηχανισμοί. Όταν εμφανίζονται οι θερμικοί μηχανισμοί, η φθορά που προκύπτει χαρακτηρίζεται τις περισσότερες των περιπτώσεων ως έντονη (severe) και συχνά ως καταστροφική όταν τα υλικά είναι ελαστομερή ή πολυμερή.

Οι **καταστάσεις φθοράς εκτριβής** πραγματοποιούνται, όταν σκληρά σωματίδια (σωματίδια εκτριβής ή απόβλητα) ή διάφορες προεξοχές εξαναγκάζονται να κινηθούν καταμήκος μίας στερεάς επιφάνειας (Εικόνα 1.18) [7]. Οι κυρίαρχοι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα είναι οι μηχανισμοί της παραμόρφωσης μονού και επαναλαμβανόμενου κύκλου. Οι μηχανισμοί παραμόρφωσης μονού κύκλου αποδίδουν κυρίως τις έντονες μορφές φθοράς εκτριβής, όπως είναι οι τομές, οι πλαστικές παραμορφώσεις και οι θραύσεις. Ενώ οι ήπιες μορφές φθοράς εκτριβής προκύπτουν κατά βάση από τους μηχανισμούς παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου, όπως είναι η κόπωση. Υπό την παρουσία ρευστού είναι πιθανό να συμμετάσχουν στη φθορά και οι χημικοί μηχανισμοί, όπως είναι η διάβρωση [8].

Η φύση των μηχανισμών φθοράς που συμμετέχουν, το μέγεθος της φθοράς και η μορφολογία των διαμορφωμένων εκδορών σε μία κατάσταση φθοράς από εκτριβή (abrasive wear situation) εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων. Οι παράγοντες που απευθύνονται στα σωματίδια εκτριβής που παρευρίσκονται μεταξύ των κινούμενων επιφανειών αναφέρονται: στη φύση της κίνησης των σωματιδίων κατά μήκος της επιφάνειας, στην σκληρότητα των σωματιδίων και της επιφάνειας, στο μέγεθος, στο σχήμα και στη ποσότητα των σωματιδίων. Οι πρόσθετοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της φθοράς είναι: η ολκιμότητα της

επιφάνειας, το εφαρμοζόμενο φορτίο, οι χημικές ιδιότητες των επιφανειών και η παρουσία ρευστού.

Πιο συγκεκριμένα η κίνηση των σωματιδίων επηρεάζει το μέγεθος της φθοράς, καθώς η ελεύθερη κύλιση ή ολίσθηση τους επί της επιφάνειας αποδίδει ηπιότερες καταστάσεις φθοράς σε σχέση με την εξαναγκασμένη κίνησή τους. Όταν τα σωματίδια εκτριβής είναι σκληρότερα από την επιφάνεια με την οποία έρχονται σε επαφή, τότε το μέγεθος της φθοράς αυξάνεται. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η επιφάνεια διαθέτει υψηλότερη σκληρότητα σε σχέση με τα σωματίδια, τότε η φθορά είναι ηπιότερη και οι αρχικοί μηχανισμοί φθοράς που εμφανίζονται είναι αυτοί της παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου. Ως προς το μέγεθος των σωματιδίων έχει παρατηρηθεί ότι σε διάμετρο περίπου έως τα 100μm τα ποσοστά φθοράς αναπτύσσονται άρδην, εν αντιθέσει με τις μεγαλύτερες διαμέτρους, όπου η φθορά διαμορφώνεται με αρκετά ομαλότερους ρυθμούς. Ως προς το σχήμα, τα σωματίδια με γωνιακές προεξοχές δημιουργούν εντονότερα σημάδια φθοράς συγκριτικά με τα πιο στρογγυλεμένα. Τέλος, όσο περισσότερα είναι τα σωματίδια τόσο εντονότερη είναι και η διαμορφωμένη φθορά.

Βασική προϋπόθεση αναπτύξεως μίας κατάστασης φθοράς από εκτριβή, ανεξαρτήτως του είδους της κίνησης, είναι η ύπαρξη σωματιδίων εκτριβής. Εφόσον καλυφθούν συγκεκριμένα κριτήρια από τους παραπάνω παράγοντες, το είδος αυτής της φθοράς μπορεί να επικρατήσει των υπολοίπων κινήσεων, αποδίδοντας τα δικά της έντονα σημάδια φθοράς.

1.4.4 Η μέθοδος της ανάλυσης φθοράς

Η ανάλυση φθοράς (wear analysis) αποτελείται από έναν συνδυασμό θεωρητικών και πειραματικών τεχνικών εκτιμήσεως της συμπεριφοράς της φθοράς, οι οποίες αξιοποιούνται για την ανάπτυξη ενός μοντέλου αντιμετώπισης των ανεπιθύμητων ζητημάτων που προκύπτουν από αυτήν. Η θεμελιώδης αρχή της ανάλυσης είναι η αντιμετώπιση της φθοράς ως μία συμπεριφορά του τριβοςυστήματος. Για το λόγο αυτό δεν περιορίζεται μόνο στον έλεγχο του υλικού (μικροσκοπική ανάλυση) των τριβοςωμάτων, αλλά και στην επανεξέταση κυρίως των συντελεστών σχεδιασμού. Η ανάλυση παρουσιάζει διπλό χαρακτήρα, διότι εφαρμόζεται σε τριβοςυστήματα με φθαρμένες (analysis with worn parts), αλλά και μη φθαρμένες (analysis without worn parts) επιφάνειες λειτουργίας. Εν αντιθέσει με τη συνήθη προσέγγιση των αναλύσεων αστοχίας που εφαρμόζονται αφετέρου της

προκύπτουσας βλάβης. Στην περίπτωση της ανάλυσης των ήδη φθαρμένων επιφανειών, η μέθοδος εφαρμόζεται με σκοπό την αποσαφήνιση της κατάστασης της φθοράς και την αναδιαμόρφωση ορισμένων από τους συντελεστές σχεδιασμού. Ενώ στην περίπτωση των μη φθαρμένων επιφανειών, η μέθοδος εφαρμόζεται με σκοπό την πρόβλεψη των τύπων φθοράς που πιθανόν να προκύψουν και την επιλογή συντελεστών σχεδιασμού που θα αποδώσουν ικανοποιητική απόδοση έναντι των μηχανισμών της φθοράς.

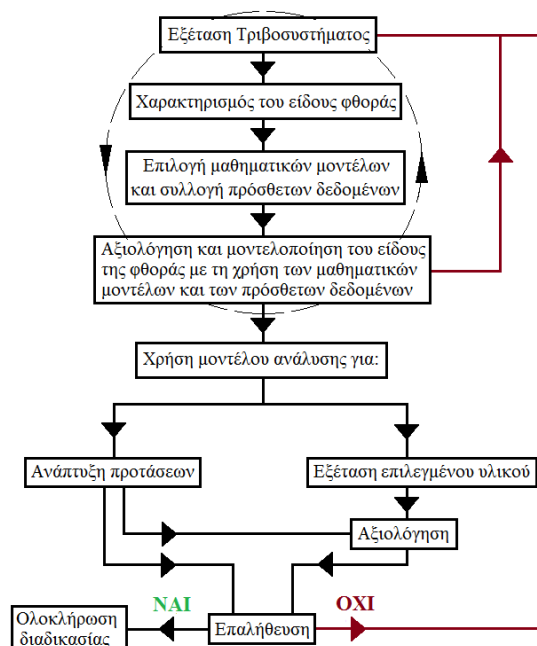
Ανεξαρτήτως του είδους της ανάλυσης η βέλτιστη προσέγγιση της εκάστοτε αστοχίας στηρίζεται στη χρήση ειδικών μαθηματικών μοντέλων. Τις περισσότερες φορές όμως η χρήση ενός μοντέλου ανάλυσης βασισμένο σε μαθηματικές εξισώσεις δεν είναι εφικτή εκτός εργαστηριακών δοκιμών, διότι τα δεδομένα που απαιτούνται για την ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου ανάλυσης είναι ειδικού χαρακτήρα (εξηγείται στη συνέχεια). Τα κενά γνωστικά κομμάτια σε κάθε ανάλυση καλύπτονται μέσω της συλλογής πληροφοριών για το εξεταζόμενο εξάρτημα, τις συνθήκες λειτουργίας, τον τρόπο λειτουργίας, την λίπανση, το περιβάλλον, την παρατήρηση της αστοχίας κλπ. Όταν όμως τα δεδομένα αυτά δεν είναι αρκετά είτε επειδή ποτέ δεν καταγράφηκαν είτε γιατί δεν είναι προσβάσιμα, τότε το χάσμα των πληροφοριών τείνει να καλυφθεί από το εμπειρικό υπόβαθρο του μηχανολόγου μελετητή. Το μοντέλο της ανάλυσης μπορεί να είναι απλό ή πολύπλοκο, αυστηρό ή όχι, ανάλογα πάντα με τις ανάγκες που εξυπηρετεί.

1.4.4.1 Διαδικασία

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες ανάλυσης της φθοράς, από τις οποίες απορρέουν δύο βασικές εκδοχές. Όλες οι μεθοδολογίες στηρίζονται σε δύο κρίσιμα αρχικά στάδια, στην εξέταση του τριβοσυστήματος (examination) και στον χαρακτηρισμό του είδους της φθοράς (characterization). Πολλές φορές τα δύο αυτά στάδια είναι αρκετά στο να δημιουργήσουν το μοντέλο της ανάλυσης, με το οποίο θα αποσαφηνιστεί η συμπεριφορά της φθοράς. Η πρακτική αυτή αποτελεί την πρώτη εκδοχή ανάλυσης φθοράς και χρησιμοποιείται κατά κόρον από πολλούς μηχανολόγους μελετητές με μεγάλη εμπειρία στο κλάδο της αστοχίας. Η δεύτερη εκδοχή συνάδει με τον βέλτιστο τρόπο περιγραφής της συμπεριφοράς της φθοράς. Στην περίπτωση αυτή ο μηχανολόγος μελετητής αξιοποιεί τα στάδια της εξέτασης και του χαρακτηρισμού ως το υπόβαθρο για την επιλογή ειδικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις καταστάσεις φθοράς που έχουν

διαγνωστεί. Εν συνεχεία οι εξισώσεις αυτές αξιολογούνται (evaluation) και συνδυάζονται μεταξύ τους στοιχειοθετώντας ένα μαθηματικό μοντέλο ανάλυσης για την περιγραφή της φθοράς. Η μεθοδολογία της ανάλυσης που θα παρουσιαστεί αφορά την δεύτερη περίπτωση, καθώς αποτελεί ένα ευρύτερο σύνολο στο οποίο εμπεριέχεται και η πρώτη εκδοχή.

Η διαδικασία αυτή αποτελείται από συγκεκριμένα βήματα και χαρακτηρίζεται ως πράξη μοντελοποίησης και μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρονοβόρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επανεξέταση των βημάτων μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές, έως ότου δημιουργηθεί το πληρέστερο υπολογιστικό μοντέλο περιγραφής της συμπεριφοράς της φθοράς. Το στάδιο της αξιολόγησης και της μοντελοποίησης αποτελούν τον βασικό κορμό της ανάλυσης. Μόλις το μοντέλο ολοκληρωθεί είτε ακολουθεί το στάδιο της ανάπτυξης προτάσεων για την επίλυση των αιτιών της φθοράς είτε το μελετούμενο εξάρτημα υποβάλλεται σε δοκιμές φθοράς (wear testing) για την συλλογή περισσοτέρων πληροφοριών. Ύστερα αξιολογούνται οι πιθανές προτάσεις ή τα προκληθέντα από την ανάλυση αποτελέσματα, τα οποία εάν κριθούν ικανοποιητικά, επαληθεύονται και ολοκληρώνεται η διαδικασία. Διαφορετικά επανεξετάζεται, διορθώνεται και εμπλουτίζεται για άλλη μία φορά ο βασικός κορμός της ανάλυσης και η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1.23) αναπαριστάται υπό τη μορφή διαγράμματος ροής τα παραπάνω βήματα της διαδικασίας που αναφέρθηκαν.



Εικόνα 1.23: Διάγραμμα ροής των επιμέρους διαδικαστικών βημάτων της ανάλυσης φθορά [8, εμπνευσμένο από Εικόνα 1.2.1, σελ.3].

Η εξέταση του τριβοσυστήματος αποτελεί το τμήμα συλλογής δεδομένων. Τα στοιχεία που συγκεντρώνονται δεν περιορίζονται μόνο στην μελέτη των φθαρμένων περιοχών αλλά στον έλεγχο ολόκληρου του τριβοσυστήματος. Οι βασικότερες πληροφορίες που συλλέγονται διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες: στις πληροφορίες του εξαρτήματος (γεωμετρία, διαστάσεις, υλικό κλπ.), στην κατάσταση επαφής των επιμέρους μερών του συστήματος (φόρτιση, είδος και προσανατολισμός κίνησης κλπ.), στις συνθήκες λίπανσης (είδος λίπανσης, χαρακτηριστικά λιπαντικού κλπ.), στις περιβαντολλογικές συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, υγρασία, ρύποι κλπ.) και στην παρατήρηση των περιοχών φθοράς (ποσοστό φθοράς, τρόπος και χρόνος χρησιμοποίησης, προσδιορισμός της περιοχής της φθοράς κλπ.).

Ο χαρακτηρισμός του είδους της φθοράς αποτελεί το επόμενο βασικό μέρος της ανάλυσης. Ο χαρακτηρισμός αυτός βασίζεται στις πληροφορίες που συλλέχθηκαν στο προηγούμενο στάδιο, αλλά όχι σε όλες. Επιλέγονται μόνο εκείνα τα δεδομένα που συμμετέχουν ή που μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη της φθοράς. Τα στοιχεία που οπωσδήποτε λαμβάνονται υπόψιν στο στάδιο του χαρακτηρισμού είναι: η περιγραφή της κίνησης που προκάλεσε την φθορά, η περιγραφή της γεωμετρίας επαφής, το είδος της φόρτισης, η περιγραφή των υλικών, ο τύπος της λίπανσης, τα χαρακτηριστικά της επικρατέστερης φθοράς, η τραχύτητα της επιφάνειας, η περιγραφή του περιβάλλοντος λειτουργίας, το μέγεθος της φθοράς και η σχετική χρήση που γινόταν στο εξάρτημα. Εκτός από τα παραπάνω δεδομένα οποιοδήποτε επιπλέον στοιχείο μπορεί να επηρεάσει την κατάσταση της φθοράς πρέπει να προσμετράτε. Τα δεδομένα αυτά δεν περιγράφονται αναλυτικά όπως στο στάδιο της εξέτασης παρά μόνον ονομαστικά. Επειδή, η συμπεριφορά της φθοράς είναι ένα σύνθετο φαινόμενο και το είδος της μπορεί εύκολα να παρερμηνευτεί, είναι σημαντικό τα συλλεγμένα δεδομένα να συνθεθούν καταλλήλως, ώστε να αποδώσουν την βέλτιστη κατάσταση φθοράς. Ο χαρακτηρισμός που θα αποδοθεί είναι υψίστης σημασίας για την εξέλιξη της ανάλυσης, διότι πάνω σε αυτόν θα βασιστεί η επιλογή των υπολογιστικών μοντέλων που εκφράζουν το είδος της φθοράς. Για την ολοκλήρωση της ανάλυσης χρειάζονται περισσότερα και με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στοιχεία από αυτά που χρησιμοποιούνται στο στάδιο του χαρακτηρισμού. Βέβαια ορισμένα από τα επιλεγμένα στοιχεία, όπως η κατάσταση της λίπανσης και οι περιβαντολλογικές συνθήκες, είναι επαρκή έως το τέλος της ανάλυσης. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές τα στοιχεία που σχετίζονται με το είδος και το μέγεθος της φόρτισης, με το ποσοστό επέκτασης της φθοράς, με τις διαστάσεις, το είδος της

κίνησης του μελετούμενου εξαρτήματος κλπ. χρειάζονται μία μεγαλύτερη εμπάθυνση. Η ανάγκη για τον εμπλουτισμό των δεδομένων γίνεται αντιληπτή στο τρίτο στάδιο της ανάλυσης κατά την επιλογή των μαθηματικών μοντέλων. Αυτό συμβαίνει διότι οι μεταβλητές που απαρτίζουν τις επιλεγμένες υπολογιστικές σχέσεις συχνά αντιστοιχούν σε στοιχεία ειδικού χαρακτήρα (π.χ. μέγιστη πίεση επαφής, ταχύτητα κρούσης κλπ.), τα οποία τις περισσότερες φορές δεν λαμβάνονται υπόψη στις αρχικές καταγραφές.

Με την ολοκλήρωση του χαρακτηρισμού της κατάστασης της φθοράς ακολουθεί το στάδιο της **μοντελοποίησης**. Το στάδιο αυτό αποτελεί τον πυρήνα της ανάλυσης της φθοράς και συνήθως ολοκληρώνεται σε τέσσερα βήματα. Αρχικά, επιλέγονται οι γενικές εξισώσεις που πιθανός να χρησιμοποιηθούν για την σύνταξη του μαθηματικού μοντέλου έκφρασης της φθοράς. Η επιλογή των εξισώσεων γίνεται με βάση τον χαρακτηρισμό που έχει αποδοθεί στο προηγούμενο στάδιο. Συγκεκριμένα, ο χαρακτηρισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρεις τρόπους, ο ένας βασίζεται στις συνθήκες λειτουργίας (π.χ. τύπος κίνησης, φόρτιση κλπ.), ο άλλος στους μηχανισμούς φθοράς και ο τρίτος στο συνδυασμό και των δύο. Δεύτερο βήμα της μοντελοποίησης αποτελεί η σύνθεση των μαθηματικών σχέσεων με σκοπό τη δημιουργία ενός ενιαίου μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα σχετίζεται είτε με τη διάρκεια ζωής σε φθορά (wear life) είτε με τη φθορά στους συντελεστές σχεδιασμού (wear to design parameters). Στο τρίτο βήμα πραγματοποιείται η αξιολόγηση του δημιουργημένου μοντέλου και ελέγχεται εάν καλύπτει ικανοποιητικά την κατάσταση της φθοράς που έχει παρατηρηθεί. Στην περίπτωση που κριθεί ανεπαρκές το μοντέλο τροποποιείται ή αναδιαμορφώνεται. Εάν κριθεί αποδεκτό, τότε ακολουθεί το τελευταίο στάδιο της μοντελοποίησης, αυτό της χρήσης του μοντέλου για την αξιολόγηση της επίδρασης που θα έχουν οι διαφορετικές σχεδιαστικές τροποποιήσεις στη συμπεριφορά της φθοράς.

Με το πέρας του σταδίου της μοντελοποίησης η ανάλυση ολοκληρώνεται με δύο τρόπους. Στον έναν ακολουθεί η διαδικασία της ανάπτυξης προτάσεων για την επίλυση των ζητημάτων φθοράς που προέκυψαν από το στάδιο της μοντελοποίησης, οι οποίες αξιολογούνται και τέλος επαληθεύονται ορθώς ή αλλιώς επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Στον άλλο τρόπο πραγματοποιούνται ανάλογα την περίπτωση συγκεκριμένες **δοκιμές φθοράς**. Οι δοκιμές αυτές αποτελούν πειραματικές διατάξεις προσομοίωσης της λειτουργίας του εξεταζόμενου εξαρτήματος. Τα δεδομένα που απορρέουν από τις δοκιμές είτε χρησιμοποιούνται ως μέρος της διαδικασίας της

επαλήθευσης είτε χρησιμοποιούνται ως μέρος της διαδικασίας της μοντελοποίησης, για την κάλυψη πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί αλλά δεν είναι επαρκή.

Η μικροσκοπική ανάλυση δεν αποτελεί μέρος της μεθοδολογίας της ανάλυσης φθοράς. Ωστόσο, ως αναπόσπαστο εργαλείο στην επίλυση προβλημάτων αστοχίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αντικαθιστώντας τις δοκιμές φθοράς ή σε συνδυασμό με αυτές. Όλες οι μεθοδολογίες αναλύσεως αστοχιών βασίζονται στην ίδια αρχή, στην εύρεση της ρίζας του προβλήματος και στην διόρθωσή της. Για το λόγο αυτό οποιαδήποτε τεχνική ή εργαλείο αστοχίας θα μπορούσε να συντελέσει θετικά στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων μπορεί να τεθεί σε λειτουργία.

1.4.4.2 Καταστάσεις εφαρμογής

Υπάρχουν δύο βασικές μηχανολογικές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία της ανάλυσης φθοράς. Οι περιπτώσεις αυτές διακρίνονται στις καταστάσεις επίλυσης του προβλήματος (problem - solving situation) και στις καταστάσεις σχεδιασμού και ελέγχου (design development situation). Η κατάσταση της επίλυσης του προβλήματος αναφέρεται σε μία υπάρχουσα περίπτωση μη επιτρεπτής φθοράς ή μη επιτρεπτής φθοράς συναρτήσει του προσδόκιμου χρόνου λειτουργίας (wear life). Σε αυτήν τη κατάσταση εφαρμόζονται τα βήματα της ανάλυσης της φθοράς που προαναφέρθηκαν με σκοπό την εύρεση και την επίλυση του αιτίου της φθοράς. Η κατάσταση του σχεδιασμού και του ελέγχου λαμβάνει χώρα κατά το στάδιο της μοντελοποίησης του εξαρτήματος και αναφέρεται σε πιθανές και θεωρητικές συνθήκες φθοράς που μπορεί να προκύψουν. Τα πιθανά σενάρια υλοποιούνται συνήθως υπό τη χρήση τρισδιάστατων προγραμμάτων μοντελοποίησης για όσο το δυνατόν εγκυρότερα αποτελέσματα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα έχουν σαν σκοπό την αναδιαμόρφωση των σχεδιαστικών παραμέτρων (κυρίως της γεωμετρίας και του υλικού), όπου αυτή κριθεί ως απαραίτητη.

1.5 Τεχνικές ελέγχου αστοχίας

Πλέον ο μηχανολόγος - μελετητής έχει στη φαρέτρα του ένα εκτενές πλήθος εργαλείων με τα οποία μπορεί να πραγματοποιήσει οποιοδήποτε έλεγχο ενός υλικού ή διερεύνηση μίας αστοχίας. Οι τεχνικές αυτές διακρίνονται σε δύο μεγάλες οικογένειες οι οποίες συνεχώς εμπλουτίζονται: στις καταστρεπτικές και στις μη καταστρεπτικές μεθόδους.

1.5.1 Μη καταστρεπτικές τεχνικές

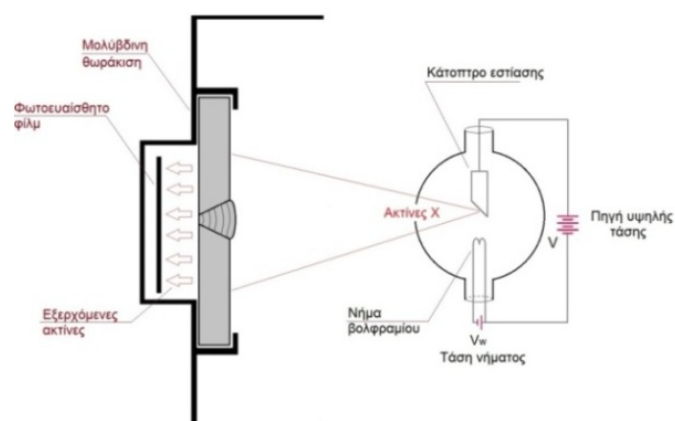
Οι μη καταστρεπτικές τεχνικές (Non - destructive testing) αξιοποιούνται κυρίως στη πρόληψη και στον έλεγχο ενός υλικού χωρίς την απόσπαση κάποιου δείγματος. Με τις μεθόδους αυτές ο μελετητής είναι σε θέση να εντοπίσει μακροσκοπικές και μικροσκοπικές ατέλειες, όπως είναι οι ρωγμές και οι πόροι στη δομή ενός υλικού και να κρίνει εάν και πότε χρειάζεται αντικατάσταση. Με αυτό τον τρόπο δεν επηρεάζεται η ακεραιότητα ούτε η λειτουργικότητα της κατασκευής [11].

Για την υλοποίηση ενός μη καταστροφικού ελέγχου μπορούν να αξιοποιηθούν διάφορες τεχνικές όπως είναι: οι οπτικές, οι ραδιογραφίες (Radiography) ακτινών X και γ, οι μηχανικές, οι μαγνητικές (Magnetic Particle Inspection), οι υπέρηχοι (Ultrasonic Inspection), τα δινορρέυματα (Eddy Current Inspection) και τα φθορίζοντα - διεισδυτικά υγρά (Fluorescent - Penetrant Inspection).

Οι **οπτικές τεχνικές** χρησιμοποιούνται για τη μεγέθυνση και τη μελέτη των επιφανειακών αλλοιώσεων που δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές δια γυμνού οφθαλμού και εφαρμόζονται με τη χρήση στερεοσκοπίων και άλλων συσκευών μεγεθύνσεως και αναλύσεως εικόνας. Η μεγέθυνση που μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την χρήση ενός στερεοσκοπίου φτάνει τα 250x.

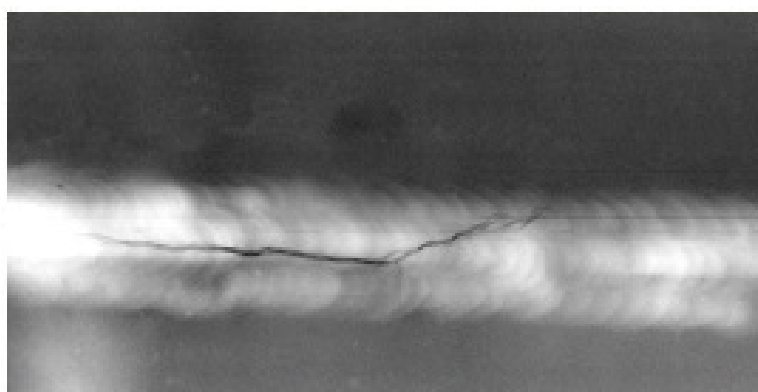
Οι **ραδιογραφίες** χάρις το μικρό μήκος κύματος των ακτινών X και γ προσφέρουν τη δυνατότητα διείσδυσης και εξέτασης υλικών αρκετά μεγάλου πάχους. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως κατά τον έλεγχο ποιότητας συγκολλητών, χυτών, και σφυρήλατων κατασκευών. Οι ακτίνες γ παρουσιάζουν μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα συγκριτικά με τις X, αλλά μικρότερη ευαισθησία. Οι ακτίνες αυτές αποτελούν τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και είναι αποτέλεσμα ραδιενεργών αντιδράσεων. Η ραδιενεργή πηγή των ακτινών X ή γ απαρτίζεται από ένα νήμα βολφραμίου που λειτουργεί ως κάθοδος και από ένα κάτοπτρο εστίασης που λειτουργεί ως άνοδος. Το εξεταζόμενο υλικό συγκρατείται σε κατάλληλες εσοχές

και πίσω από αυτό τοποθετείται ένα φωτοευαίσθητο φιλμ. Όλη η διάταξη θωρακίζεται από μολύβδινα τοιχώματα για την αποφυγή της διασποράς της βλαβερής για τον άνθρωπο ακτινοβολίας. Η εστιασμένη από το κάτοπτρο ακτινοβολία προσπίπτει στο σημείο ελέγχου και στη συνέχεια ένα μέρος της διαπερνάει το υλικό και αποτυπώνεται στο φωτοευαίσθητο φιλμ που βρίσκεται πίσω από το υλικό (Εικόνα 1.24) [11].



Εικόνα 1.24: Σχηματική αναπαράσταση μίας τυπικής διάταξης ελέγχου συγκολλητής κατασκευής με ακτίνες X [11, εμπνευσμένο από ΣΧΗΜΑ 16.12, σελ.611].

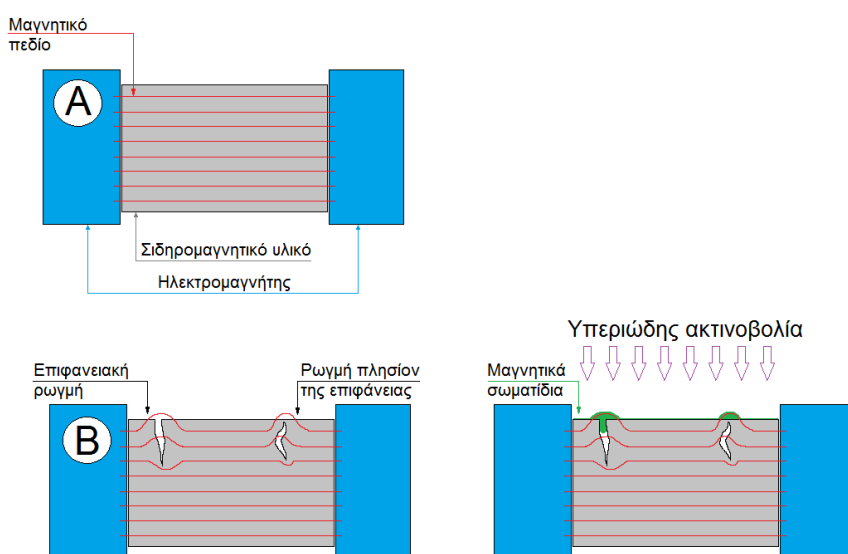
Οι χωρίς ασυνέχειες περιοχές αποτελούν περιοχές μεγάλης πυκνότητας και απορροφούν μεγαλύτερες ποσότητες ακτινοβολίας συγκριτικά με τις περιοχές των ρωγμών. Για το λόγο αυτό οι περιοχές των ρωγμών, των εγκλεισμάτων και των πόρων σκιάζουν περισσότερο στην αποτύπωση τους στο φιλμ (Εικόνα 1.25).



Εικόνα 1.25: Αποτύπωση ραδιογραφίας με ακτίνες X, μίας ρωγμάτωσης στη περιοχή της ραφής δύο συγκολλημένων μετάλλων [12].

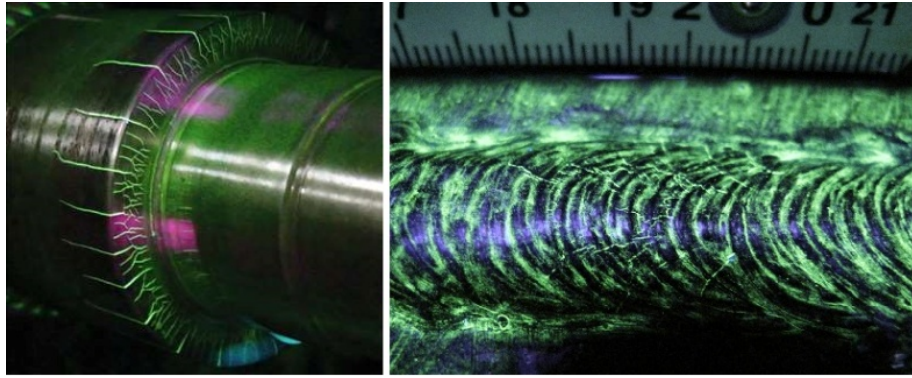
Οι μηχανικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για την επιφανειακή εξέταση ενός υλικού και εφαρμόζονται μέσα από τη χρήση διάφορων μεθόδων, όπως είναι η σκληρομέτρηση, η μικροσκληρομέτρηση και η τραχυμέτρηση.

Οι **μαγνητικές τεχνικές** εφαρμόζονται σε σιδηρομαγνητικά υλικά (ferromagnetic materials) και χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση ασυνεχειών, όπως είναι οι ρωγμές, οι πόροι και τα μη μεταλλικά εγκλείσματα που βρίσκονται επιφανειακά ή σε μικρό βάθος. Η διαδικασία ελέγχου γίνεται με την τοποθέτηση του προς εξέταση τεμαχίου ανάμεσα σε δύο πόλους ενός ηλεκτρομαγνήτη, ο μαγνήτης ενεργοποιείται ενώ ταυτόχρονα (συνεχής τεχνική) ή αμέσως μετά (ασυνεχής τεχνική) το υλικό καλύπτεται επιφανειακά με εναιώρημα ή σκόνη μαγνητικών σωματιδίων (suspension of magnetic particles). Στη συνέχεια, το αντικείμενο εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV light), όπου και γίνονται ευκρινείς οι επιφανειακές ή οι πλησίον στην επιφάνεια ατέλειες (Εικόνα 1.26).



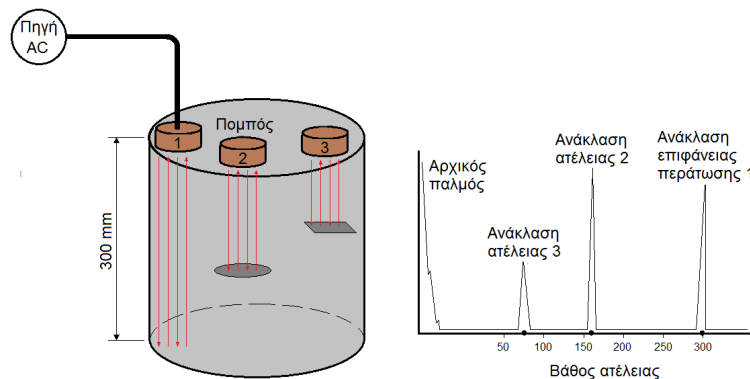
Εικόνα 1.26: Σχηματική αναπαράσταση διαμήκης μαγνήτισης εξεταζόμενου δοκιμίου (A) χωρίς ασυνέχειες (B) με ασυνέχειες.

Ανάλογα με τη φορά του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τους πόλους μπορεί να γίνουν αντιληπτές συγκεκριμένες ασυνέχειες. Για το λόγο αυτό η φορά του μαγνητικού πεδίου αλλάζει από διαμήκη σε περιφερειακή, ώστε να εντοπιστούν όσο το δυνατόν περισσότερες ασυνέχειες. Οι τεχνικές αυτές συνίσταται να εφαρμόζονται σε συγκολλήσεις και σε υλικά που έχουν υποστεί κάποια θερμική κατεργασία (Εικόνα 1.27).



Εικόνα 1.27: Περιπτώσεις εντοπισμού ρωγματώσεων: στο σώμα ατράκτου (αριστερά) στην περιοχή της ραφής δύο συγκολλημένων μετάλλων (δεξιά) [13].

Οι **υπερήχοι** εντοπίζουν εσωτερικές ανωμαλίες με τη χρήση ηχητικών κυμάτων. Η εύρεση αλλά και το μέγεθος των ασυνεχειών στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υλικού προσδιορίζεται από την ανάκλαση του σήματος, από τις ατέλειες πίσω στον πομπό. Ο πομπός **απαρτίζεται** από μία διάταξη πιεζοκρυστάλλων και τροφοδοτείται από μία πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Όταν ο πιεζοκρυστάλλος αρχίζει να διαρρέεται με εναλλασσόμενο ρεύμα, τότε αρχίζει να διαστέλλεται και να συστέλλεται με την ίδια συχνότητα με αυτήν του ρεύματος. Η μηχανική δόνηση που παρουσιάζει η διάταξη των πιεζοκρυστάλλων είναι υπεύθυνη για την παραγωγή των υπερήχων. Το μήκος και η ένταση του παραγόμενου ηχητικού κύματος ελέγχεται από τον χειριστή μέσα από την αυξομείωση της συχνότητας του ρεύματος. Για τη βέλτιστη επαφή μεταξύ πομπού και επιφάνειας υλικού τοποθετείται κατάλληλο λιπαντικό σε μορφή gel. Οι ατέλειες γίνονται αντιληπτές από τις κυματομορφές εξόδου που παρουσιάζονται με τη χρήση παλμογράφου ή κάποιου άλλου προγράμματος. Κάθε ατέλεια διαθέτει διαφορετική κυματομορφή ανάκλασης (Εικόνα 1.28). Εκτός από τους πόρους, τις ρωγμές και τα εγκλείσματα με την τεχνική αυτή μπορούν να εντοπιστούν διεπιφανειακές ατέλειες μεταξύ επιστρώματος και υποστρώματος, αλλά και να υπολογιστεί το πάχος σωληνώσεων.



Εικόνα 1.28: Αναπαράσταση εντοπισμού εσωτερικών ασυνεχειών με τη χρήση υπερήχων και απεικόνιση της κυματομορφής εξόδου σε τρεις θέσεις.

Η μέθοδος των **δινορρευμάτων** αξιοποιεί την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή για να εντοπίσει δομικές ατέλειες στο υλικό. Σε αυτήν τη διαδικασία το προς εξέταση υλικό εισέρχεται διαμέσου ενός επαγωγικού πηνίου το οποίο διαρρέεται με εναλλασσόμενο ρεύμα, με αποτέλεσμα να παράγεται μαγνητικό πεδίο. Μέρος του μαγνητικού πεδίου διεισδύει στο διερχόμενο υλικό και επάγει ρεύματα ίδιας συχνότητας με αυτή της μεταβολής του πεδίου στο εσωτερικό του. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται με τη σειρά του από τα επαγωγικά ρεύματα στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υλικού μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο μπορεί εύκολα να αναγνωσθεί με τη χρήση κατάλληλων μετρητικών οργάνων. Ο εντοπισμός των ασυνεχειών ανιχνεύεται μέσα από τη μεταβολή της έντασης του ρεύματος. Για παράδειγμα, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο αυξάνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα όταν το υλικό εισέρχεται στο πηνίο και κάθε φορά που προσπερνάει μία ατέλεια μειώνεται. Είναι πιθανό να μην γίνουν αντιληπτές όλες οι ατέλειες, διότι ορισμένες φορές το πεδίο των δινορρευμάτων που δημιουργείται στη περιοχή των ασυνεχειών είναι παράλληλο με το μαγνητικό πεδίο του πηνίου, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται η ένταση του ρεύματος.

Τα **φθορίζοντα - διεισδυτικά υγρά** χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό επιφανειακών αλλοιώσεων σε χυτές και συγκολλητές κατασκευές, αλλά και μετά από κατεργασίες απομάκρυνσης υλικού όπως είναι η κοπή και το φρεζάρισμα. Η βασική δομή της τεχνικής διακρίνεται σε τέσσερα στάδια. Αρχικά ένα λεπτό στρώμα υγρού εναποτίθεται στην προς έλεγχο επιφάνεια για δεδομένο χρονικό διάστημα. Εξαιτίας της υψηλής διεισδυτικής ικανότητας του το υγρό εισχωρεί εντός των επιφανειακών ατελειών. Στη συνέχεια, ψεκάζεται με νερό η επιφάνεια απομακρύνοντας μόνο το υγρό που βρίσκεται πάνω της, αφήνοντας ανέπαφο το υγρό εσωτερικά των ατελειών. Έπειτα τοποθετείται στην επιφάνεια κατάλληλη σκόνη, η οποία τραβάει προς τα έξω μέρος του υγρού από τις ρωγμές και τους πόρους, μεγεθύνοντας το ίχνος της αλλοίωσης. Για το λόγο αυτό η σκόνη χαρακτηρίζεται ως «εμφανιστής». Τέλος, υπό το φως υπεριώδους ακτινοβολίας τα υγρά αυτά φωσφορίζουν, αναδεικνύοντας τις ατέλειες (Εικόνα 1.29).



Εικόνα 1.29: Εντοπισμός ρωγμών με τη χρήση φθορίζοντων - διεισδυτικών υγρών [14].

1.5.2 Καταστρεπτικές τεχνικές

Οι καταστρεπτικές τεχνικές (Destructive testing) είναι μέθοδοι ελέγχου κατά τις οποίες είναι απαραίτητη η απόσπαση δείγματος συγκεκριμένων διαστάσεων από το εξεταζόμενο υλικό. Γενικά, οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται για τη μελέτη της μικροδομής ενός υλικού. Για το λόγο αυτό, εάν κριθεί απαραίτητη η σε βάθος ανάλυση μίας δομικής ασυνέχειας τότε οι καταστρεπτικές δοκιμές είναι μονόδρομος.

Οι τεχνικές που μπορούν να αξιοποιηθούν για την πραγματοποίηση ενός καταστροφικού ελέγχου διακρίνονται στις εξής κατηγορίες: στις φωτο - ηλεκτρομαγνητικές, στις ηλεκτρονικές, στη περίθλαση, στις ατομικές - ιοντικές, στις θερμικές και στις μηχανικές. Οι **φωτο - ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές** διακρίνονται στην οπτική μικροσκοπία, στη μικροσκοπία laser (SLM, Raman), στην ακουστική μικροσκοπία, στην φωτοηλεκτρική φασματοσκοπία με ακτίνες X (XPS) και στη φασματοσκοπία Mossbauer. Οι **ηλεκτρονικές τεχνικές** ελέγχου απαρτίζονται από την ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM, TEM), την ηλεκτρονική μικροανάλυση με ακτίνες X (EPMA, EDS) και τη φασματοσκοπία Auger (AES). Οι μέθοδοι ελέγχου μέσω της **περίθλασης** διακρίνονται στην περίθλαση ακτίνων X (XRD), στη περίθλαση ηλεκτρονίων (ED) και στη περίθλαση νετρονίων (ND). Στις **ατομικές - ιοντικές τεχνικές** ελέγχου ανήκει η φασματομετρία μάζας δευτερογενών ιόντων (SIMS) και η ιοντική μικροσκοπία πεδίου (FIM). Οι **θερμικές τεχνικές** απαρτίζονται από τη διαφορική θερμική ανάλυση (DTA), από τη διαφορική θερμιδομετρική ανίχνευση (DSC) και από τη θερμοβαρυτική ανάλυση (TGA). Οι **μηχανικές τεχνικές** ελέγχου αποτελούνται από τις διάφορες στατικές και δυναμικές πειραματικές διατάξεις, όπως είναι η δοκιμή σε εφελκυσμό, κάμψη, θλίψη, κρούση, κόπωση κλπ.

Κάθε μία από τις παραπάνω τεχνικές μπορεί να αποδώσει και μία διαφορετική οπτική στην μελετούμενη ατέλεια. Οι τεχνικές μικροσκοπίας έχουν σαν σκοπό την απεικόνιση της εκάστοτε αλλοίωσης σε μεγάλες σκάλες μεγέθυνσης, επιτρέποντας στον μελετητή την σε βάθος μελέτη της. Ορισμένα είδη μικροσκοπίας μπορούν να αποδώσουν μεγαλύτερες μεγεθύνσεις και υψηλότερη σε ποιότητα ανάλυση έναντι άλλων. Οι τεχνικές μικροανάλυσης, φασματοσκοπίας και φασματομετρίας μαζών χρησιμοποιούνται κυρίως για την διερεύνηση της χημικής σύστασης του υλικού σε ποιοτικό και ποσοτικό επίπεδο. Οι τεχνικές περίθλασης χρησιμοποιούνται για την κρυσταλλογραφική αποκωδικοποίηση της δομής των στοιχείων προσθήκης και των φάσεων στο εξεταζόμενο υλικό. Οι θερμικές τεχνικές αξιοποιούνται στην ποιοτική και ποσοτική ανάλυση της χημικής σύστασης και της αναλογίας των φάσεων στο προς εξέταση υλικό.

Η οπτική μικροσκοπία αποτελεί μία από τις ευρέως πιο διαδεδομένες και αξιόπιστες τεχνικές παρατήρησης και χαρακτηρισμού της μικροδομής ενός υλικού. Τα οπτικά μικροσκόπια χρησιμοποιούν ως πηγή ακτινοβολίας το λευκό φως, διαθέτουν μεγεθυντική ικανότητα συνήθως μέχρι το 1000x και διακριτική ικανότητα περίπου έως τα 200nm [11]. Της μεθόδου προηγούνται τέσσερα στάδια προετοιμασίας του προς μελέτη εξαρτήματος. Το πρώτο στάδιο αφορά την κοπή του εξαρτήματος σε δοκίμια συγκεκριμένου μεγέθους. Το στάδιο αυτό αν και φαινομενικά εύκολο μπορεί να κρύβει ορισμένες δυσκολίες ανάλογα με τον υπάρχον εξοπλισμό και τη γεωμετρία του εξαρτήματος. Αποφεύγεται να χρησιμοποιούνται συμβατικοί τροχοί κοπής, αλλά τροχοί υγρής κοπής, συγκεκριμένης σύστασης και κοκκομετρίας, οι οποίοι εξασφαλίζουν μία ομοιόμορφη επιφάνεια κοπής. Μία καλή επιφάνεια κοπής διευκολύνει αισθητά το στάδιο της λείανσης, ειδικά όταν γίνεται χειροκίνητα. Εκτός από τα πρότυπα το μέγιστο μέγεθος των δοκιμίων εξαρτάται από τις διαστάσεις του θαλάμου εγκιβωτισμού, έτσι ώστε η ρητίνη να εναγκαλιάσει όσο το δυνατόν καλύτερα την πλευρική επιφάνεια του δοκιμίου. Ο εγκιβωτισμός αποτελεί το δεύτερο στάδιο της προετοιμασίας και έχει σαν σκοπό τη διεύρυνση της επιφάνειας συγκράτησης και της επιφάνειας λείανσης του δοκιμίου. Με αυτό το τρόπο διευκολύνεται η συγκράτηση του δοκιμίου και μειώνεται ο κίνδυνος της καμπύλωσης ακμών και της διαμόρφωσης ολόκληρης της επιφάνειας του δοκιμίου σε κεκλιμένη. Το τρίτο στάδιο αναφέρεται στο στάδιο της λείανσης, το οποίο διακρίνεται σε δύο μέρη και έχει ως σκοπό την εξομάλυνση των επιφανειακών ανωμαλιών. Κατά το πρώτο μέρος η επιφάνεια ελέγχου λειαίνεται διαδοχικά με

λειαντικά χαρτιά συγκεκριμένης κοκκομετρίας (SiC και Al_2O_3), ενώ παράλληλα ψεκάζεται με νερό για την απομάκρυνση των στερεών αποβλήτων και την διατήρηση της θερμοκρασίας της λειαινόμενης επιφάνειας σε χαμηλά επίπεδα. Η αρίθμηση των λειαντικών χαρτιών ξεκινάει από το P60 και ολοκληρώνεται στο P2400. Ωστόσο, με μία καλή επιφάνεια κοπής μπορεί να αποφευχθεί η χρήση ορισμένων αρχικών λειαντικών χαρτιών και έτσι να εξοικονομηθεί χρόνος κατά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας. Το δεύτερο και τελικό μέρος της λείανσης ονομάζεται στίλβωση και αφορά την λείανση της επιφάνειας με ειδικά βελούδα τραχύτητας από 6μm έως 0,1μm. Το στάδιο της στίλβωσης δεν είναι απαραίτητο να ολοκληρωθεί στα 0,1μm, αλλά μπορεί να περατωθεί σε βελούδα μεγαλύτερης τραχύτητας, κάτι που αποφασίζεται από την αυστηρότητα της μελέτης. Σε αυτή τη περίπτωση το λιπαντικό εκτριβής δεν είναι το νερό, αλλά ένα κολλοειδές αιώρημα αλουμίνιας ή διαμαντιού. Κάθε στίλβωτικό βελούδο διαθέτει το δικό του αντίστοιχο λιπαντικό λείανσης, με ιξώδες αντίστοιχο της τραχύτητας του. Το τέταρτο στάδιο της προετοιμασίας είναι η χημική προσβολή, κατά την οποία η στίλβωμένη πλέον επιφάνεια εμβαπτίζεται σε κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο (π.χ. Nitral) για δεδομένη χρονική διάρκεια. Το είδος και η δραστηριότητα του αντιδραστήριου καθορίζεται από τη χημική σύσταση του εξεταζόμενου υλικού. Με αυτήν τη διαδικασία τα όρια των κόκκων διαβρώνονται αποκαλύπτοντας υπό τη χρήση ενός μεταλλογραφικού οπτικού μικροσκοπίου τον κρυσταλλικό δεσμό του υλικού.

1.6 Αστοχία εναζωτωμένου στρώματος

1.6.1 Προβλήματα κατά την διαδικασία της εναζώτωσης

Το προσχεδιασμένο αποτέλεσμα μίας εναζωτωμένης επιφάνειας μπορεί να αποκλίνει εξαιτίας τριών παραγόντων: της διαδικασίας (αέρια, υγρή ή με ακτίνες ιόντων εναζώτωση), του υλικού (π.χ. ορισμένα υλικά κρίνονται ως ακατάλληλα προς εναζώτωση) και των σταδίων παραγωγής (π.χ. οι θερμικές και μηχανουργικές κατεργασίες που εφαρμόστηκαν στο υλικό πριν την εναζώτωση). Το τελικό αποτέλεσμα της αστοχίας μπορεί να οφείλεται μεμονωμένα ή στο συνδυασμό των τριών παραπάνω παραγόντων. Το υποκεφάλαιο αυτό ασχολείται με την παρουσίαση των προβλημάτων που προκύπτουν αποκλειστικά και μόνο από τη διαδικασία της εναζώτωσης που ακολουθείται [15].

Σε όλες τις επιφανειακές θερμικές και θερμοχημικές κατεργασίες η προσοχή επικεντρώνεται στην επιφανειακή σκληρότητα και στο βάθος του επιφανειακά δημιουργημένου στρώματος που αποκτάται. Είναι λογικό τα συνηθέστερα προβλήματα που προκύπτουν από μία τέτοια κατεργασία να σχετίζονται με την επιφανειακή σκληρότητα (low surface hardness) και με το βάθος του εναζωτωμένου στρώματος.

Η απώλεια της σκληρότητας στην περίπτωση της αέριας διαδικασίας (gas nitriding) οφείλεται κυρίως σε προβλήματα που προκύπτουν κατά την διάσπαση του αερίου (gas dissociation). Οι πιο συνηθισμένοι από τους παράγοντες που μπορούν να διαταράξουν τη διάσπαση του αερίου είναι τα χαμηλά επίπεδα σε αμμωνία, η μειωμένη ροή του αερίου στο θάλαμο, π.χ. εξαιτίας μία πιθανής στένωσης στο σύστημα παροχής και η οξείδωση του θαλάμου μέσα στον οποίο τοποθετείται το εξάρτημα. Το μικρό βάθος της εναζωτωμένης ζώνης οφείλεται κυρίως στην απώλεια του αζώτου (loss of nitriding), όπου οφείλεται στη πίεση λειτουργίας του θαλάμου ή σε πιθανές διαρροές λόγω της ανεπαρκούς στεγανότητας του.

Στην περίπτωση της διαδικασίας με χρήση πλάσματος (ion nitriding) η απώλεια της σκληρότητας οφείλεται συνήθως στην υπερθέρμανση του κατεργαζόμενου τεμαχίου (part overheating) ή στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου (arc discharge). Η υπερθέρμανση του τεμαχίου μπορεί να οφείλεται στη χρήση λανθασμένης θερμοκρασίας ή στην αυξομείωση της τάσης και της έντασης του ρεύματος ή λόγω επηρεασμού της αγωγιμότητας (hollow - cathode effect), που

εμφανίζεται όταν τα τεμάχια προς εναζώτωση τοποθετούνται πολύ κοντά το ένα με το άλλο. Ένα υπερθερμασμένο τεμάχιο μπορεί να αναγνωρισθεί είτε από τη σκοτεινή απόχρωση που πιθανόν να έχει αποκτηθεί είτε μέσω της σκληρομέτρησης, όπου μπορεί να διακριθεί η υπέρμετρη διαφορά στη σκληρότητα μεταξύ των υπερθερμασμένων και μη υπερθερμασμένων περιοχών. Όσον αφορά τη δημιουργία του ηλεκτρικού τόξου, αυτή οφείλεται στην ύπαρξη υψηλής τάσης κατά τη διεργασία. Το ηλεκτρικό τόξο αποτελεί μία μικρογραφία ενός κεραυνού και συνήθως προσελκύεται σε αιχμηρές γωνίες του εξαρτήματος προκαλώντας του τοπικά υπερθέρμανση ή καύση μέχρι και τήξη. Όπως και στη προηγούμενη διαδικασία η απουσία ή η ύπαρξη σχετικά μικρού εναζωτωμένου στρώματος οφείλεται στην απώλεια του αζώτου (loss of nitriding). Στην περίπτωση που η στεγανότητα του θαλάμου είναι επαρκής και δεν παρατηρείται κάποια διαρροή αερίου, τότε η απώλεια του αζώτου οφείλεται στη λανθασμένη ρύθμιση της πίεσης λειτουργίας ή σε κάποιο πρόβλημα στο μηχανισμό ελέγχου της πίεσης [16].

Η απώλεια σκληρότητας μπορεί να συναντηθεί και στην περίπτωση της χρήσης τετηγμένων αλάτων (salt - bath nitriding) κυρίως λόγω προβλημάτων στη διάσπαση των αζωτούχων αλάτων ή στην υπερθέρμανση του τεμαχίου. Η μη ορθή διάσπαση των αζωτούχων αλάτων μπορεί να προκύψει είτε από λάθος στη δοσολογία του μίγματος τους, είτε από λάθος ρύθμιση της θερμοκρασίας ζέσης ή την αστοχία κάποιου εξαρτήματος του συστήματος θέρμανσης του λουτρού. Αντίστοιχα, η υπερθέρμανση του τεμαχίου μπορεί να προκύψει από τη λάθος ρύθμιση της θερμοκρασίας ή την αστοχία κάποιου εξαρτήματος του συστήματος θέρμανσης του λουτρού. Όσον αφορά το βάθος της εξωτερικής στιβάδας έχει παρατηρηθεί ότι από τη διαδικασία της υγρής εναζώτωσης προκύπτει καλύτερη ομοιογένεια στο στρώμα και αντίστοιχα μεγαλύτερο βάθος, χωρίς κάποια πολύπλοκη ρύθμιση.

1.6.2 Βασικές καταστάσεις επιφανειακής βλάβης

Ανεξάρτητα από το είδος της εναζώτωσης οι βασικές επιφανειακές βλάβες που τις περισσότερες φορές παρατηρούνται πάνω στο εναζωτωμένο στρώμα διακρίνονται σε έξι περιπτώσεις. Οι περιπτώσεις αυτές είναι: ο επιφανειακός αποχρωματισμός (surface discoloration), η μορφολογία φλοιού πορτοκαλιού (orange - peel effect), η αποφλοΐωση του επιφανειακού στρώματος (case exfoliation), η επιφανειακή εκλέπιση (case/part/surface chipping), το επιφανειακό ξεφλούδισμα ή απολέπιση (case/surface flaking or spalling) και η ρωγμάτωση του επιφανειακού

στρώματος (case crushing). Με βάση το μέγεθος της επιφανειακής βλάβης οι περιπτώσεις αποκολλήσεων υλικού ταξινομούνται με την εξής φθίνουσα φορά: αποφλοίωση, εκλέπιση, ξεφλούδισμα και απολέπιση (exfoliation > chipping > flaking > spalling).

Ο **επιφανειακός αποχρωματισμός** εμφανίζεται με το πέρας της εναζώτωσης και αποδίδεται συνήθως στην είσοδο οξυγόνου ή κάποιου ρύπου που έχει παραμείνει στην επιφάνεια του τεμαχίου μετά το στάδιο του καθαρισμού. Ο αποχρωματισμός δεν αποτελεί απαραίτητα δυσμενή επίδραση ως προς την επιφανειακή μεταλλουργία του υλικού. Αντιθέτως έχει παρατηρηθεί ότι η αποχρωματισμένες περιοχές διακρίνονται για την βελτιωμένη αντοχή τους ενάντια στη διάβρωση, συγκριτικά πάντα με τις μη αποχρωματισμένες περιοχές. Για το λόγο αυτό σε ορισμένες διαδικασίες απελευθερώνονται σκόπιμα ποσότητες οξυγόνου, για τη δημιουργία ενός επιφανειακού ανθεκτικού φράγματος κατά της διάβρωσης. Οι διεργασίες αυτές συναντούνται με διάφορες εμπορικές ονομασίες όπως oxy - nitride, nitrox, niox κλπ.

Η **μορφολογία φλοιού πορτοκαλιού** εμφανίζεται σε τυχαίες περιοχές πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου και αποτελούν μικρά εξογκώματα, τα οποία θυμίζουν την μορφολογία ενός πορτοκαλιού. Τα εξογκώματα αυτά δεν εμφανίζονται μόνο στις εναζωτωμένες, αλλά και στις ενανθρακωμένες επιφάνειες και σχετίζονται με την ύπαρξη επιφανειακής εξανθράκωσης.

Η **αποφλοίωση του επιφανειακού στρώματος** αναφέρεται στην αποφλοίωση της εναζωτωμένης επιφάνειας του εξαρτήματος και οφείλεται στην ύπαρξη επιφανειακής εξανθράκωσης. Σε αυτήν τη περίπτωση το κύριο αίτιο της εξανθράκωσης είναι η ανεπαρκής απομάκρυνση υλικού ή ο ανεπαρκής καθαρισμός της επιφάνειας από οξειδία και άλλου είδους ακαθαρσίες, που προηγείται της εναζώτωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξανθράκωση δεν πραγματοποιείται κατά την κύρια διαδικασία της εναζώτωσης, αλλά κατά το στάδιο της προθέρμανσης του τεμαχίου εντός του θαλάμου ή εντός του λουτρού αντίστοιχα.

Οι **επιφανειακές εκλεπίσεις** είναι ψαθυρές αποκολλήσεις υλικού, οι οποίες παρατηρούνται ιδιαίτερα στις γωνιακές περιοχές του τεμαχίου. Το είδος αυτών των θραύσεων οφείλεται στη τάση των σχηματισμένων από το άζωτονιτριδίων να συγκεντρώνονται στις αιχμηρές περιοχές του εναζωτωμένου εξαρτήματος (corner effect). Οι συγκεντρώσεις αυτές αποτελούν υπερκορεμένες με άζωτο περιοχές, υψηλής σκληρότητας, αλλά ταυτόχρονα χαμηλής δυσθραυστότητας. Ο υπερκορεσμός με άζωτο γίνεται αντιληπτός κατά τον μεταλλογραφικό έλεγχο εξαιτίας του τρόπου

συγκέντρωσης των νιτριδίων, η οποία χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό δικτύων (nitride networking).

Το **ξεφλούδισμα/απολέπιση** του επιφανειακού στρώματος αναφέρονται στην απομάκρυνση υλικού από μία επιφάνεια με τη μορφή νιφάδων. Οι απολεπίσεις αυτής της μορφολογίας αποτελούν σχετικά μικρές περιοχές θραύσεως. Εμφανίζονται κυρίως σε περιπτώσεις κόπωσης και κρούσης. Αυτού του είδους η φθορά συνηθίζεται να παρατηρείται σε ρουλεμάν κύλισης και σε οδοντωτούς τροχούς [7].

Η **ρωγμάτωση του επιφανειακού στρώματος** αναφέρεται στη σύνθλιψη του εναζωτωμένου στρώματος κατά την επιβολή κάποιου φορτίου. Η ρωγμάτωση του στρώματος οφείλεται στην μεγάλη διαφορά σκληρότητας μεταξύ της σκληρής εξωτερικής στιβάδας και του μαλακού πυρήνα, με αποτέλεσμα ο μαλακός πυρήνας να μην μπορεί να υποστηρίξει την σκληρή επιφάνεια. Ένα άλλο πιθανό αίτιο ρωγμάτωσης του στρώματος σχετίζεται με το πολύ μικρό βάθος του διαμορφωμένου εναζωτωμένου στρώματος, το οποίο ως επακόλουθο δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στη φόρτιση που δέχεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΛΛΟΤΕΧΝΙΑ

2.1 Μεταλλικά υλικά

Τα μεταλλικά υλικά αποτελούν ανόργανες ουσίες που απαρτίζονται από ένα ή περισσότερα μεταλλικά στοιχεία. Παρατηρώντας τον περιοδικό πίνακα των στοιχείων (Εικόνα 2.1) μπορεί εύκολα να διακριθεί το πλήθος των μεταλλικών, των μεταλλοειδών (άλλοτε λειτουργούν ως μέταλλα και άλλοτε ως αμέταλλα) και των αμέταλλων στοιχείων, τα οποία παίρνουν μέρος σε διάφορες ενώσεις. Τα μεταλλικά στοιχεία τα οποία συναντιούνται πιο συχνά σε διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές είναι ο σίδηρος (Fe), ο χαλκός (Cu), το αλουμίνιο (Al), το νικέλιο (Ni), το τιτάνιο (Ti), το χρώμιο (Cr) και το βανάδιο (V). Οι προσμίξεις είναι συνήθως ο άνθρακας (C), το άζωτο (N), το οξυγόνο (O) και το θείο (S) [11].

The image shows a periodic table of elements with color-coded regions. A legend at the top identifies the regions: Metals (Μέταλλα) in yellow, Metalloids (Μεταλλοειδή) in green, and Non-metals (Αμέταλλα) in blue. The legend also lists sub-categories: Alkali metals (Αλκαλικές γαίες), Alkaline earth metals (Αλκαλικές γαίες), Lanthanides (Λανθανίδες), Actinides (Ακτινίδες), Transition metals (Στοιχεία μετάπτωσης), and Other elements (Άλλα στοιχεία). The periodic table itself is color-coded according to these regions. The elements are arranged in rows and columns, with their atomic number, symbol, and name in Greek. The lanthanide and actinide series are shown as separate rows at the bottom of the table.

Εικόνα 2.1: Περιοδικός πίνακας στοιχείων. Επισήμανση μεταλλικών, μεταλλοειδών και μη μεταλλικών στοιχείων [17].

Ο μεταλλικός χαρακτηρισμός που προσδίδεται σε ένα υλικό πηγάζει από τις φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζει στη στερεή του κατάσταση. Οι κυριότερες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα μέταλλα είναι [11]:

- Τα άτομα που συντελούν το εκάστοτε μεταλλικό στοιχείο συνδέονται μεταξύ τους μέσω μεταλλικού δεσμού, σχηματίζοντας κρυσταλλική δομή.
- Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος συναντώνται σε στερεή μορφή, με μόνη εξαίρεση τον υδράργυρο (Hg) που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση.
- Διαθέτουν μία χαρακτηριστική λάμψη, η οποία ονομάζεται μεταλλική. Στις περισσότερες περιπτώσεις η λάμψη αυτή διαθέτει λευκό χρώμα, εξαιτίας της

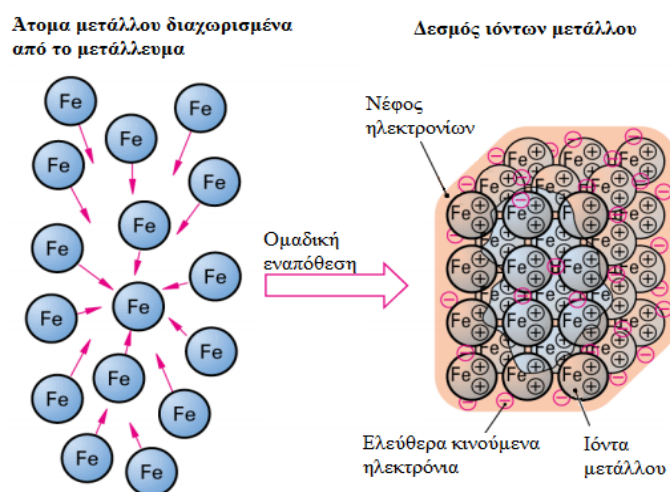
ανάκλασης όλων των μηκών κύματος του φωτός. Εξαίρεση αποτελούν ο χαλκός (Cu) με ερυθρό χρώμα και ο χρυσός (Au) με κίτρινο χρώμα.

- Υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου μπορούν με ευκολία να μαγνητίζονται ως ένα βαθμό και αντίστοιχα να απομαγνητίζονται. Τα στοιχεία του σιδήρου (Fe), του νικελίου (Ni) και του κοβαλτίου (Co) παρουσιάζουν εκμεταλλεύσιμο μαγνητισμό.
- Εμφανίζουν υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- Διαθέτουν υψηλή πυκνότητα (ρ).
- Διαθέτουν σχετικά υψηλό σημείο τήξης.
- Έχουν μεγάλη συνοχή.
- Είναι όλκιμα υλικά και παρουσιάζουν πολύ καλή κατεργασιμότητα.
- Εμφανίζουν ελάχιστη διαπερατότητα στις ακτίνες X.

2.2 Μεταλλική εσωτερική δομή

2.2.1 Μεταλλικός δεσμός

Ο μεταλλικός δεσμός αποτελεί έναν εκ των τριών στοιχειωδών δεσμών μεταξύ των ατόμων. Ο δεσμός αυτός είναι κοινός τόσο στα καθαρά μέταλλα όσο και στα κράματα μετάλλων. Ο μεταλλικός δεσμός που αναπτύσσεται μεταξύ των ατόμων διαφέρει από τους άλλους δύο τύπους δεσμού, τον ιοντικό ή ετεροπολικό και τον ομοιοπολικό, τόσο ως προς την διάταξη των στοιχείων μετά την ένωση τους όσο και ως προς την θέση που καταλαμβάνουν τα ηλεκτρόνια γύρω από τα ιόντα^[11]. Τα ηλεκτρόνια σθένους δεν καταλαμβάνουν συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο, ούτε ακολουθούν τους κανόνες της αμοιβαίας συνεισφοράς ή της ουδετερότητας του φορτίου, που ισχύουν στην περίπτωση του ομοιοπολικού και ιοντικού αντίστοιχα δεσμού. Αντιθέτως σχηματίζουν ένα αρνητικά φορτισμένο νέφος ηλεκτρονίων, το οποίο περιβάλλει το σμήνος των κατιόντων που απαρτίζουν το μεταλλικό πλέγμα (Εικόνα 2.2). Εντός αυτού του νέφους τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια έλκονται από τα θετικά φορτισμένα ιόντα του μετάλλου. Παράλληλα, όμως, τα ηλεκτρόνια απωθούνται μεταξύ τους, το ίδιο και τα θετικά ιόντα. Με αυτό τον τρόπο τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινούνται με μεγάλη ευκολία εντός του νέφους, δηλαδή εντός της σχηματισμένης κρυσταλλικής δομής, αλλά δεν μπορούν να φύγουν [18].



© [ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ], [2η Ελληνική Έκδοση], [Σελίδα: 17], Verlag Europa-Lehrmittel

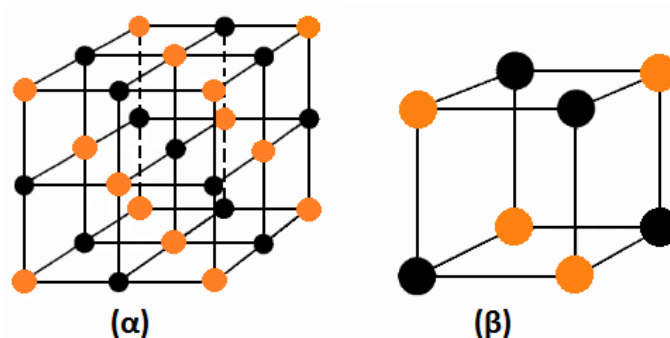


Εικόνα 2.2: Δημιουργία μεταλλικού δεσμού από άτομα σιδήρου (Fe) [18, Εικόνα 2, σελ. 17].

Οι περισσότερες από τις βασικές ιδιότητες των μετάλλων είναι αποτέλεσμα της συνοχής του μεταλλικού δεσμού και του αριθμού των ηλεκτρονίων σθένους. Με την αύξηση των ηλεκτρονίων σθένους αυξάνεται η ενέργεια του μεταλλικού δεσμού και του σημείου τήξης. Η θερμική, η ηλεκτρική και η μαγνητική ιδιότητα που χαρακτηρίζει τα μεταλλικά υλικά συνδέεται με την ικανότητα της ελεύθερης κίνησης των ηλεκτρονίων σθένους εντός του νέφους. Η ψαθυρότητα, η ολκιμότητα και η πλαστικότητα είναι ιδιότητες που οφείλονται στη φύση της μεταλλικής δομής που δημιουργούν τα θετικά ιόντα μεταξύ τους, αλλά και στο ηλεκτραρνητικό νέφος που τα περιβάλλει, καθώς ο συνδυασμός τους καθιστά δυνατή τη σχετικά μόνιμη μετατόπιση των κατιόντων του μετάλλου [11].

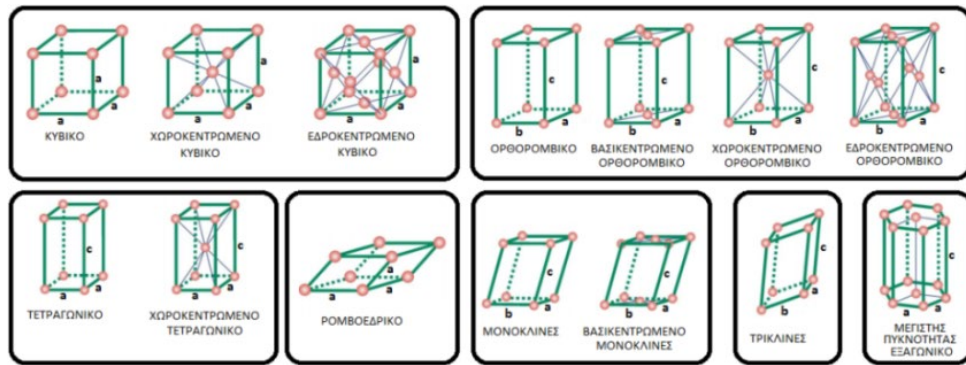
2.2.2 Κρυσταλλική δομή

Ένα στερεό σώμα ονομάζεται πραγματικό ή κρυσταλλικό όταν στη στερεά του κατάσταση τα θετικά ιόντα που το συνθέτουν, διευθετούνται μεταξύ τους στο χώρο ακολουθώντας συγκεκριμένες γεωμετρικές διατάξεις. Οι διατάξεις αυτές συνδέονται μεταξύ τους επαναλαμβανόμενα ή περιοδικά για μεγάλες ατομικές αποστάσεις και στα τρία επίπεδα του χώρου (x, y, z), ορίζοντας έτσι την κρυσταλλική δομή ή το κρυσταλλικό πλέγμα του στερεού (Εικόνα 2.3: α). Το μικρότερο σύνολο κατιόντων που στοιχειοθετεί την δομική μονάδα της κρυσταλλικής δομής, ονομάζεται στοιχειώδες κύτταρο (Εικόνα 2.3: β) [2, 11].



Εικόνα 2.3: (α) Επαναλαμβανόμενη τρισδιάστατη διάταξη, κρυσταλλική δομή, (β) Στοιχειώδες κύτταρο κρυσταλλικής δομής [11, εμπνευσμένο από Εικόνα 2.1, σελ.23].

Οι τρόποι διευθέτησης των θετικών ιόντων στο χώρο διακρίνονται σε 14 είδη, τα οποία προκύπτουν από 7 συστήματα κρυστάλλωσης (1848, Auguste Bravais), το κυβικό, το τετραγωνικό, το ορθορομβικό, το ρομβοεδρικό, το μονοκλινές, το τρικλινές και το εξαγωνικό (Εικόνα 2.4).






Εικόνα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση των μοναδιαίων κυψελίδων των δεκατεσσάρων ειδών κρυσταλλικών πλεγμάτων [19, Εικόνα 3.6, σελ.34].

Εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε μοναδιαία κυψελίδα χαρακτηρίζεται από τέσσερα βασικά στοιχεία. Τον αριθμό των ατόμων (τ) σε κάθε στοιχειώδες κύτταρο, την ελάχιστη απόσταση (δ) μεταξύ των κέντρων δύο γειτονικών ατόμων, τον αριθμό συνδιάταξης (CN), και τον συντελεστή ατομικής πλήρωσης (APF). Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συντελεστής ατομικής πλήρωσης, από τον οποίο προκύπτει το ποσοστό του όγκου του στοιχειώδους κυττάρου που πληρείται από άτομα και αντίστοιχα το ποσοστό του ενδοκρυσταλλικού χώρου που παραμένει κενό. Έτσι γίνεται αντιληπτό εάν η εκάστοτε κυψελίδα αποτελεί συμπαγής δομή ή όχι. Οι κενοί χώροι που προκύπτουν καθορίζουν το μέγιστο μέγεθος ξένων ενδόθετων ατόμων που μπορούν να τοποθετηθούν. Τα είδη των κενών που σχηματίζονται στις τρεις κύριες κρυσταλλικές δομές του σιδήρου, είναι οκταεδρικής ή τετραεδρικής μορφής [11].

Οι κύριες κρυσταλλικές δομές των μετάλλων είναι το κυβικό χωροκεντρομένο (bcc), το κυβικό εδροκεντρωμένο (fcc) και το μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικό (hcp). Από τις τρεις δομές ως πιο συμπαγείς χαρακτηρίζονται οι fcc και hcp, διότι διαθέτουν μεγαλύτερο συντελεστή APF. Τα μεταλλικά στοιχεία που κρυσταλλώνονται σε αυτές τις τρεις δομές ταξινομούνται και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

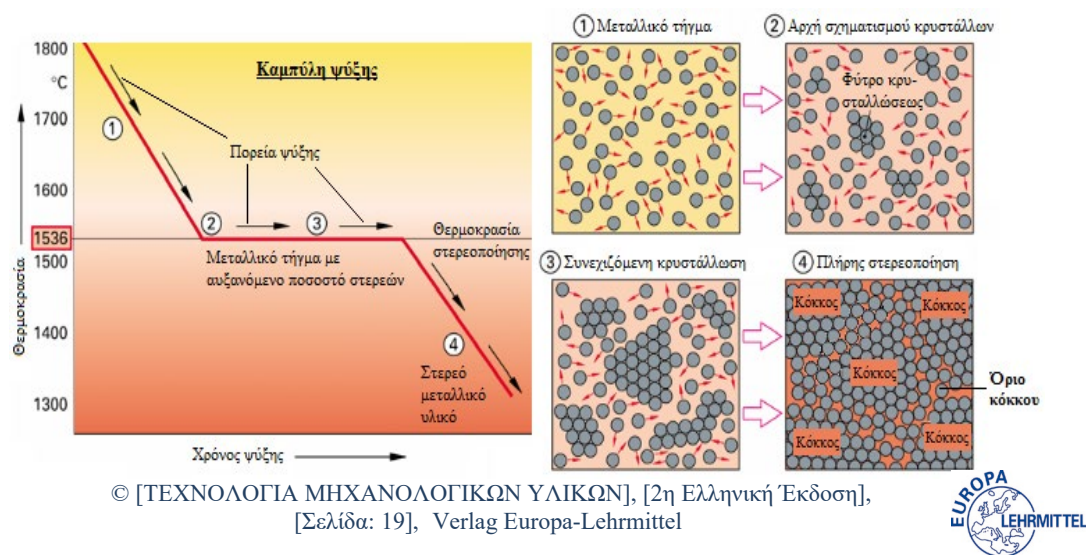
Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά κύριων κρυσταλλικών δομών [20].

Κρυσταλλικό Σύστημα	CN	APF (%)		Μεταλλικά Στοιχεία
		Άτομα	Κενό	
 Δομή bcc	8	68	32	Na, K, Cr, Ti (σε υψηλές θερμοκρασίες), W, α -Fe (σταθερός μέχρι τους 912 °C)
 Δομή fcc	12	74	26	Al, Ca, Ni, Cu, Ag, Au, Pb, και γ -Fe (σταθερός μέχρι τους 912 °C)
 Δομή hcp	12	74	26	Mg, Ti (σε χαμηλές θερμοκρασίες), Co, Zn, Zr και Cd

2.2.3 Κρυσταλλικός δεσμός

Ονομάζεται κρύσταλλος ή κρυσταλλίτης ή κόκκος το τμήμα της στερεάς ύλης που παρουσιάζει σε όλη την έκταση του την ίδια συνεχή κρυσταλλική δομή. Οι κόκκοι διαθέτουν ακανόνιστη περίμετρο, εφάπτονται μεταξύ τους και παρουσιάζουν διαφορετικούς προσανατολισμούς. Ανάμεσα στους γειτονικούς κρυσταλλίτες σχηματίζονται ακανόνιστες οριακές στοιβάδες που συντελούν τα όρια των κόκκων.

Τα όρια αυτά είναι το αποτέλεσμα όσων ιόντων του μετάλλου, μαζί και με ξένα άτομα, δεν κατάφεραν να ενταχθούν σε κάποιο κρυσταλλικό πλέγμα. Η δημιουργία των κόκκων ενός υλικού διακρίνεται σε τέσσερα στάδια, στο μεταλλικό τήγμα (Εικόνα 2.5: 1), στην έναρξη δημιουργίας φύτρων κρυσταλλώσεως (Εικόνα 2.5: 2), στην αρχή δημιουργίας κρυσταλλικών περιοχών (Εικόνα 2.5: 3) και στην ολοκλήρωση του κρυσταλλικού ιστού (Εικόνα 2.5: 4) [11].

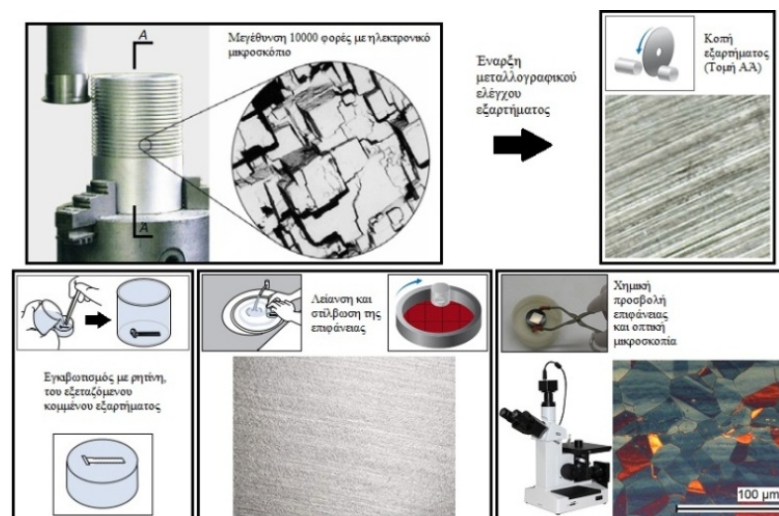


© [ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ], [2η Ελληνική Έκδοση],
[Σελίδα: 19], Verlag Europa-Lehrmittel

Εικόνα 2.5: Μεταβολές στην ατομική περιοχή, κατά την ψύξη και στερεοποίηση του καθαρού σιδήρου (Fe) [18, Εικόνα 2, σελ.19].

Ο κρυσταλλικός ιστός ενός μεταλλικού υλικού μελετάτε από συγκεκριμένο κλάδο της μεταλλουργίας, την μεταλλογραφία. Μέσα από μία αυστηρή αλληλουχία βημάτων, την κοπή, τον εγκιβωτισμό, την λείανση, την στίλβωση, την χημική προσβολή της επιφάνειας και υπό τη χρήση κατάλληλου μεταλλογραφικού μικροσκοπίου, μπορεί να επιτευχθεί η μελέτη του κρυσταλλικού ιστού του υλικού (Εικόνα 2.6). Ως κρυσταλλικός ιστός ονομάζεται το σύνολο των σχηματισμένων κόκκων και των ορίων τους, που απαρτίζουν την δομή ενός μεταλλικού υλικού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [11]. Οι κρύσταλλοι και τα όρια τους δεν γίνονται

εμφανή δια γυμνού οφθαλμού, εξαιτίας του μικροσκοπικού μεγέθους τους, που είναι της τάξεως του 1μm έως 100μm [18].



© [ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ], [2η Ελληνική Έκδοση],
[Σελίδα: 17], Verlag Europa-Lehrmittel



Εικόνα 2.6: Βήματα μεταλλογραφικής ανάλυσης [18, Εικόνα 1 (πάνω αριστερά), σελ.17] & [21].

2.2.4 Δομικά κρυσταλλικά σφάλματα

Καμία κρυσταλλική δομή δεν ακολουθεί σε απόλυτο βαθμό τα θεωρητικά μοντέλα. Σε όλα τα κρυσταλλικά πλέγματα συναντώνται διάφορες αταξίες ατόμων και στα τρία επίπεδα του χώρου. Οι πλεγματικές αυτές ανωμαλίες παρουσιάζουν τις περισσότερες φορές θετικό πρόσημο, καθώς προσδίδουν ειδικά χαρακτηριστικά στις ιδιότητες των υλικών και για αυτό το λόγο, συχνά εισάγονται σκοπίμως με ελεγχόμενο τρόπο εντός των δομών τους. Οποιαδήποτε αλλοίωση ή παρέκκλιση από το αρχικό τέλει - θεωρητικό πρότυπο του μεταλλικού χωρικού πλέγματος, ονομάζεται κρυσταλλικό δομικό σφάλμα ή ατέλεια. Τα δομικά κρυσταλλικά σφάλματα που εμφανίζονται στα στερεά σώματα διαιρούνται σε πέντε κατηγορίες, στις σημειακές ατέλειες, στις γραμμικές ατέλειες, στις διεπιφανειακές ατέλειες, στις ατέλειες όγκου και στις ατέλειες εξαιτίας των ατομικών δονήσεων. Σε κάθε μεταλλικό στερεό υλικό παρουσιάζονται πολύ περισσότερα από ένα δομικά σφάλματα, από τα οποία όμως μόνο μία κατηγορία υπερισχύει ως προς την εξέλιξη κάποιου φαινομένου [2, 20].

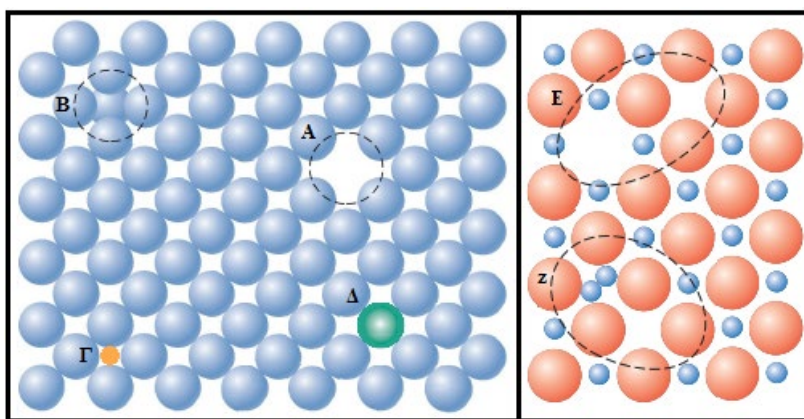
2.2.4.1 Σημειακές ατέλειες

Στις σημειακές ατέλειες ανήκουν οι κενές θέσεις, οι αυτοπαρεμβολές, και οι προσμίξεις ξένων ατόμων εντός της κρυσταλλικής δομής.

Οι **κενές θέσεις** (Εικόνα 2.7: Α) αποτελούν κενές πλεγματικές περιοχές οι οποίες κανονικά θα έπρεπε να καταλαμβάνονται από κάποιο άτομο. Σε αυτή την υποκατηγορία μπορούν να ενταχθούν οι ατέλειες Schottky (Εικόνα 2.7: Ε) και οι ατέλειες Frenkel (Εικόνα 2.7: Ζ), που εμφανίζονται στους ιοντικούς δεσμούς μεταξύ των μεταλλικών στοιχείων. Μέσα από αξιώματα της θερμοδυναμικής προκύπτει ότι η παρουσία κενών θέσεων αυξάνει την εντροπία, δηλαδή, την τυχαιότητα του κρυστάλλου και ότι ο αριθμός των κενών θέσεων αυξάνεται εκθετικά συναρτήσει της θερμοκρασίας. Στα περισσότερα μεταλλικά συστήματα, οι κενότητες συμβάλλουν σημαντικά στους μηχανισμούς διάχυσης [2, 20].

Οι **ατέλειες αυτοπαρεμβολής** (Εικόνα 2.7: Β) οφείλονται στα ίδια τα άτομα της δομής, τα οποία δεν καταφέρνουν να κρυσταλλωθούν στις προβλεπόμενες θέσεις της κυψελίδας, αλλά τοποθετούνται ή παρεμβάλλονται μεταξύ των μικρών κενών χώρων που σχηματίζονται ανάμεσα στα άτομα, όπου υπό κανονικές συνθήκες δεν θα ήταν κατειλημμένοι. Οι αυτοπαρεμβολές με αυτόν τον τρόπο, παραμορφώνουν το γειτονικό τους κρυσταλλικό περιβάλλον. Οι παραμορφώσεις αυτές οφείλονται στο μεγάλο μέγεθος των ατόμων της δομής και στο μικρό μέγεθος του μη κανονικά κατειλημμένου χώρου [2].

Οι **προσμίξεις** αποτελούν ξένα άτομα τα οποία εισέρχονται στην κρυσταλλική δομή του υλικού υποδοχής και διακρίνονται σε δύο περιπτώσεις. Στις προσμίξεις αντικατάστασης, όπου τα ξένα στοιχεία τοποθετούνται σε κορυφές των κυψελίδων (Εικόνα 2.7: Δ) και καταλαμβάνουν θέσεις που κανονικά αντιστοιχούν σε άτομα της κύριας δομής και στις προσμίξεις ετεροπροβολής, όπου τοποθετούνται στα ενδιάμεσα κενά διαστήματα των κύριων ατόμων (Εικόνα 2.7: Γ). Συνήθως οι προσμίξεις είναι σκόπιμες και έχουν ως στόχο την βελτίωση του προγενέστερου μετάλλου, δημιουργώντας έτσι τα κράματα [22].



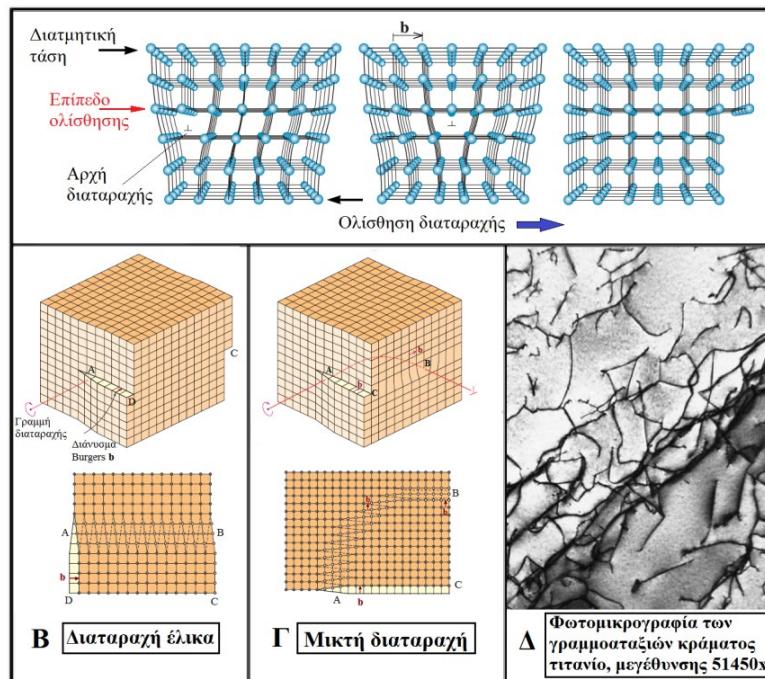
Εικόνα 2.7: Δισδιάστατη απεικόνιση των σημειακών ατελειών [23, Εικόνα 4.1, 4.2 & 12.21].

2.2.4.2 Γραμμοαταξίες

Η γραμμική ατέλεια ή γραμμοαταξία αποτελεί μία μονοδιάστατη γραμμική διαταραχή, γύρω από την οποία ορισμένα άτομα παρατάσσονται κακοευθυγραμμισμένα [2]. Οι γραμμικές ατέλειες είναι υπεύθυνες για τις πλαστικές παραμορφώσεις των μετάλλων. Οι γραμμοαταξίες σχετίζονται άμεσα με την αστοχία του νόμου του Hooke [20], όπου όταν το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα, τα άτομα ολισθαίνουν ομαδικά πάνω από άλλα γειτονικά σε αυτά άτομα και οριοθετούνται σε νέες θέσεις ισορροπίας. Διακρίνεται σε δύο τύπους, σε διαταραχές ακμής και σε διαταραχές έλικα. Όταν σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα υπάρχουν διαταραχές ακμής και διαταραχές έλικα, τότε η προκαλούμενη διαταραχή ονομάζεται μικτού τύπου (Εικόνα 2.8: Γ, Δ). Όλες οι γραμμικές διαταραχές που υπάρχουν στα κρυσταλλικά υλικά μπορούν να εντοπιστούν με τεχνικές ηλεκτρονικής μικρογραφίας [2].

Ως **διαταραχή ακμής** (Εικόνα 2.8: A) ονομάζεται ένα ημιεπίπεδο ατόμων που παρεμβάλλεται στο πλέγμα και η ακμή του καταλήγει εντός του κρυστάλλου, μεταβάλλοντας τα κάθετα επίπεδα των ατόμων σε ελαφρώς κυρτωμένα [2].

Η **ελικοειδής γραμμοαταξία** (Εικόνα 2.8: B), ακολουθεί μία κοχλιωτή διαδρομή που εντοπίζεται γύρω από την γραμμή διαταραχής των επιπέδων των ατόμων. Μορφολογικά θα μπορούσε να θεωρηθεί ως αποτέλεσμα εφαρμογής διατμητικών τάσεων [2]. Εξαιτίας της ελικοειδούς διαδρομής που ακολουθεί η διαταραχή, είναι συχνό το φαινόμενο εισαγωγής μίας ρωγμής στον πυρήνα της γραμμοαταξίας, στο όριο μεταξύ ολισθημένου και μη ολισθημένου κρυσταλλικού τμήματος. Το μέγεθος της σχηματιζόμενης ρωγμής είναι ανάλογο της σκληρότητας των ατόμων που λαμβάνουν χώρα στο κρυσταλλικό σύστημα [20].



Εικόνα 2.8: Δισδιάστατη απεικόνιση των γραμμοαταξιών ακμής, έλικα και μικτού τύπου, καθώς και της πραγματική απεικόνιση των γραμμοαταξιών σε ένα κράμα [22, Εικόνα 4-8, σελ.101] & [23, Εικόνα 4.4, 4.5, 4.6, σελ. 100-102].

2.2.4.3 Διεπιφανειακές ατέλειες

Οι διεπιφανειακές ατέλειες ή ατέλειες δύο διαστάσεων ή επίπεδες ατέλειες αποτελούν όρια ή επίπεδα τα οποία διαχωρίζουν το υλικό σε περιοχές, οι οποίες έχουν την ίδια κρυσταλλική δομή αλλά διαφορετικό προσανατολισμό. Οι δομικές αυτές ατέλειες περιλαμβάνουν τις εξωτερικές επιφάνειες, τα διαχωριστικά όρια των κόκκων, τις διδύμιες, τα σφάλματα επιστοίβασης και τα όρια των φάσεων [22].

Οι εξωτερικές επιφάνειες αντιπροσωπεύουν τα φυσικά όρια περάτωσης ενός υλικού, στις οποίες οι κρύσταλλοι απότομα τερματίζονται. Ο αριθμός συνδυάταξης (C.N. - Coordination Number), καθώς και ο ατομικός μεταλλικός δεσμός κάθε ατόμου που ανήκει σε εξωτερική επιφάνεια είναι παραμορφωμένος [22]. Τα επιφανειακά άτομα δεν συνδέονται με τον μέγιστο προβλεπόμενο αριθμό γειτονικών ατόμων, με αποτέλεσμα να ανήκουν σε υψηλότερο ενεργειακά επίπεδο από τα αντίστοιχα άτομα των εσωτερικών θέσεων του χωρικού πλέγματος, καθώς είναι γνωστό ότι κατά τη πραγματοποίηση χημικών ενώσεων καταναλώνεται ενέργεια [2].

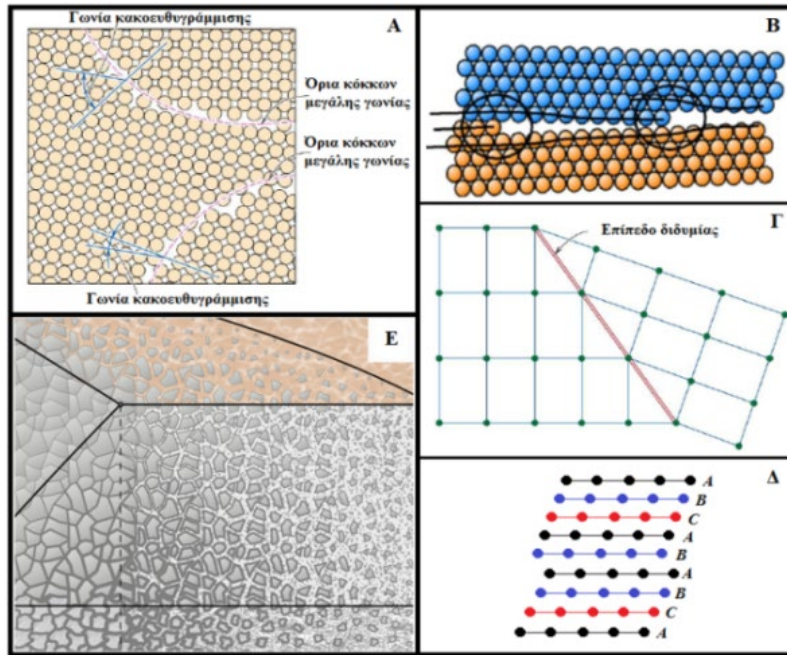
Τα **όρια των κόκκων** αποτελούν διαχωριστικά όρια μεταξύ δύο ή περισσότερων κρυστάλλων ή κόκκων. Σε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό οι κόκκοι παρουσιάζουν διαφορετικούς κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς. Υπό μία ατομική προοπτική ενός κρυσταλλικού ιστού (Εικόνα 2.9: Α) οι διαφορετικοί

προσανατολισμοί των κρυστάλλων εκφράζονται ως ατομικές δυσευθυγραμμίσεις. Στα όρια των κόκκων οι δυσευθυγραμμίσεις οδηγούν στην παραμόρφωση των δεσμών των γύρω ατόμων. Το μέγεθος των δυσευθυγραμμίσεων μεταξύ των γειτονικών ατόμων, εκατέρωθεν του διαχωριστικού ορίου, εκφράζεται από την δημιουργούμενη γωνία απόκλισης. Όσο μικρότερη είναι η σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ των γειτονικά διαχωρισμένων ατόμων, τόσο ομαλότερη είναι και η μετάβαση από τον ένα κόκκο στον άλλο. Τα όρια των κόκκων μικρής γωνίας είναι αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης των ατελειών ακμής (Εικόνα 2.9: Β) [2].

Η **διδυμία** αποτελεί ένα όριο διαχωρισμού (Εικόνα 2.9: Α), κατά το μήκος του οποίου οι εκατέρωθεν κρυσταλλίτες παρουσιάζουν μία κατοπτρική συμμετρία. Οι διδυμίες παράγονται είτε από την εφαρμογή μηχανικών διατμητικών τάσεων και ονομάζονται μηχανικές διδυμίες, είτε κατά τη θερμική κατεργασία της ανόπτησης και ονομάζονται με τη σειρά τους διδυμίες ανόπτησης. Οι μηχανικές διδυμίες εμφανίζονται συνήθως στις κρυσταλλικές δομές bcc και hcp, ενώ οι διδυμίες ανόπτησης στη κρυσταλλική δομή fcc [2].

Τα **σφάλματα επιστοίβασης** συναντώνται συνήθως σε κυβικές εδροκεντρωμένες δομές (fcc) και εμφανίζονται όταν διαταραχθεί τοπικά η προβλεπόμενη αλληλουχία διάταξης των κρυσταλλογραφικών επιπέδων (Εικόνα 2.9: Δ). Η κανονική ακολουθία επιστοίβασης ενός μετάλλου κυβικής εδροκεντρωμένης δομής είναι *ABCABCABC*, ενώ η συνήθεις διαταραγμένη ακολουθία της ίδιας δομής είναι *ABCABABCABC*, η οποία διαφέρει σε σχέση με την πρώτη ως προς την αντικατάσταση ενός επιπέδου C με ένα A [22].

Τα **όρια των φάσεων** διαχωρίζουν τα ομοιογενή τμήματα ενός πολυφασικού συστήματος, με βάση τα ομοιόμορφα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους (Εικόνα 2.9: Ε) [2].



Εικόνα 2.9: Αναπαράσταση διεπιφανειακών ατελειών. (A): όρια κόκκων, (B): δημιουργία ορίου κόκκων, εξαιτίας της ευθυγράμμισης των γραμμοσταζιών ακμής, (Γ): επίπεδο διδυμίας, (Δ): ατέλειες επιστοίβασης και (E): όρια φάσεων [24].

2.2.4.4 Ατέλειες κύριας μάζας

Στις ατέλειες όγκου ή κύριας μάζας ανήκουν οι ατέλειες που είναι πολύ πιο έντονες σε σχέση με τις προηγούμενες και σχετίζονται με την εμφάνιση πόρων, ρωγμών, ξένων εγκλεισμάτων και άλλων φάσεων. Τις περισσότερες φορές οι ατέλειες αυτές δημιουργούνται κατά το στάδιο της παρασκευής και της κατεργασίας [2].

2.2.4.5 Ατέλειες ατομικών δονήσεων

Κάθε άτομο που συμμετέχει σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα δονείται γύρω από την πλεγματική του θέση. Η δονητική ενέργεια παρουσιάζει τυχαία μεταβολή ως προς τον χρόνο και ενεργειακή αύξηση με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα άτομα δονούνται με διαφορετική συχνότητα, εύρος και ενέργεια. Κατά μία έννοια, οι διαφορές αυτές αποτελούν ανωμαλίες και ονομάζονται ατέλειες ατομικών δονήσεων [2].

2.3 Θερμικές κατεργασίες χαλύβων

Οι θερμικές κατεργασίες αποτελούν διεργασίες, όπου υπό την επίδραση της θερμότητας μεταβάλλεται μόνιμα η μεταλλική δομή ενός υλικού, διαμορφώνοντας ανάλογα με τον σκοπό της χρησιμοποίησής του, τις ιδιότητες του. Οι θερμικές κατεργασίες στοχεύουν στη βελτίωση συγκεκριμένων μεταλλικών ιδιοτήτων και με βάση τον τρόπο εφαρμογής τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας και σε επιφανειακές κατεργασίες [11].

Οι βασικοί παράμετροι για την ολοκλήρωση μίας επιτυχημένης θερμικής κατεργασίας ενός μεταλλικού εξαρτήματος είναι η διάρκεια διατήρησης σε δεδομένη θερμοκρασία και η ταχύτητα απόψυξης (συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος). Αναλόγως το μεταλλικό υλικό οι παράμετροι αυτοί μεταβάλλονται [11]. Γενικά στους κραματωμένους χάλυβες οι θερμοκρασίες καθώς και οι χρόνοι διατήρησης είναι συνήθως υψηλότεροι από τις αντίστοιχες των κοινών χαλύβων. Αυτές οι πληροφορίες περιέχονται στους κανονισμούς για τη θερμική κατεργασία, που συνοδεύουν το εκάστοτε υλικό με την αγορά του [18].

2.3.1 Θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας

Οι θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας αποβλέπουν κυρίως στην ρύθμιση του μεγέθους ή και στην μορφολογική μετάσταση των κόκκων σε όλη την μάζα ενός μεταλλικού στοιχείου. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αυξηθεί η σκληρότητα ενός υλικού, κάνοντας το ανθεκτικότερο έναντι της πλαστικής παραμόρφωσης. Μπορούν να απαλειφθούν ή να ελαττωθούν οι όποιες εσωτερικές μηχανικές τάσεις, βελτιώνοντας έτσι την αντοχή και την κατεργασιμότητα του. Μπορούν επίσης, να βελτιωθούν και πλήθος άλλων μηχανικών ιδιοτήτων όπως είναι η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητα. Οι θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας διακρίνονται σε τρεις βασικές διεργασίες, στην ανόπτηση, στην βαφή και στην επαναφορά [11].

2.3.1.1 Ανόπτηση

Η ανόπτηση αποτελεί συνήθως το πρώτο στάδιο των θερμικών κατεργασιών εντός της μάζας ενός μεταλλικού υλικού. Η θερμική αυτή κατεργασία συγκροτείται από βραδεία θέρμανση (έως ότου αποκτηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία ανοπτήσεως), διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και τέλος ακολουθεί βραδεία απόψυξη [18]. Η εφαρμογή της στοχεύει στην πλήρη ή, έως έναν βαθμό, στην ανασυγκρότηση της κατάστασης ισορροπίας της μεταλλικής δομής του

υλικού, σε φυσικοχημικό ή δομικό επίπεδο. Συνήθως εφαρμόζεται σε ελατά μέταλλα και κράματα, τα οποία πρόκειται ή έχουν ήδη υποστεί κάποιου είδους ψυχρηλασίας και κατά επέκταση έχουν σκληρυνθεί μέσω του φαινομένου της ενδοτράχυνσης, όπως συμβαίνει στις λαμαρίνες μετά από ψυχρή έλαση. Τα κυριότερα είδη των ανοπτήσεων που συναντώνται στους χάλυβες και στα κράματα αυτών, είναι η ανόπτηση κατεργασίας, η ανόπτηση εξομάλυνσης, η πλήρης ανόπτηση, η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης, η ανόπτηση αποκατάστασης, η αποτατική ανόπτηση, η ανόπτηση σφαιροποίησης και η ταλαντευτική ανόπτηση. Τα είδη καθώς και ο σκοπός εφαρμογής τους είναι αρκετά παρεμφερείς, διαφοροποιούνται μόνο ως προς την θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής τους. Σε όλες τις περιπτώσεις η απόψυξη γίνεται άλλοτε στο περιβάλλον και άλλοτε με πολύ βραδύτερους ρυθμούς, εντός του φούρνου, με αποτέλεσμα το θερμαινόμενο υλικό να κρυσταλλώνεται και πάλι στις θέσεις ισορροπίας του [11].

Η **ανόπτηση κατεργασίας** ονομάζεται η θερμική κατεργασία που πραγματοποιείται συνήθως μετά από εν ψυχρώ διαμορφώσεις, ώστε να αυξηθεί η ολκιμότητα του υλικού, αναιρώντας ταυτόχρονα τις επιπτώσεις της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση που έχουν εμφανιστεί. Το επιθυμητό αποτέλεσμα αυτής της θερμικής κατεργασίας είναι η απόκτηση λεπτοκρυσταλλικής δομής. Κατά τη διάρκεια της ανόπτησης κατεργασίας είναι δυνατόν να γίνουν και οι ανοπτήσεις αποκατάστασης και ανακρυστάλλωσης [11].

Η **ανόπτηση εξομάλυνσης** είναι η θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται ένα μεταλλικό εξάρτημα, όταν οι κόκκοι του εμφανίζουν βελονοειδής μορφή, προσδίδοντάς του εύθραυστο χαρακτήρα. Αυτό το είδος ανόπτησης εφαρμόζεται προκειμένου να δημιουργηθεί ομοιόμορφη κυτταροειδής και λεπτοκρυσταλλική δομή. Μία ακόμη χρήση αυτής της θερμικής κατεργασίας, είναι η εκλέπτυνση των κόκκων, όταν εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας το μέγεθος των κόκκων έχει υπερβολικά αυξηθεί. Στους χάλυβες και στα κράματα αυτών, ανάλογα το % κ.β. συγκέντρωσης σε C, η θερμοκρασία παραμονής ανέρχεται πάνω από την άνω κρίσιμη θερμοκρασία A_{c3} ή A_{cm} και διατηρείται σε αυτήν για περίπου μία ώρα [11].

Η **πλήρης ανόπτηση** μοιάζει με την ανόπτηση εξομάλυνσης και πραγματοποιείται κυρίως σε χάλυβες με χαμηλής έως μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι οποίοι πρόκειται στη συνέχεια να κατεργαστούν. Σκοπός της είναι τόσο η εκλέπτυνση των κόκκων όσο και η δημιουργία ομοιόμορφης κρυσταλλικής δομής.

Η διαφορά της με την ανόπτηση εξομάλυνσης είναι ότι το μεταλλικό εξάρτημα παραμένει για περισσότερο χρόνο εντός του φούρνου και αποψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ακολουθώντας την ταχύτητα απόψυξης του φούρνου. Για τους κραματωμένους ή κοινούς χάλυβες η θερμοκρασία παραμονής ανέρχεται πάνω από την άνω κρίσιμη θερμοκρασία A_{c3} [11].

Οι **ανοπτήσεις ανακρυστάλλωσης** και **αποκατάστασης** πραγματοποιούνται για τους ίδιους λόγους, αλλά σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασίας. Στην ανόπτηση ανακρυστάλλωσης ένα μεταλλικό υλικό θερμαίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του. Ενώ στην ανόπτηση αποκατάστασης η θέρμανση πραγματοποιείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του. Σε κάθε περίπτωση η απόψυξη γίνεται στον αέρα σε αργό ρυθμό, και εφαρμόζεται κυρίως στους εν ψυχρώ διαμορφωμένους χάλυβες για την εξάλειψη του ιστού της ενδοτράχυνσης, ώστε στη συνέχεια να μπορούν να επεξεργαστούν περαιτέρω [11].

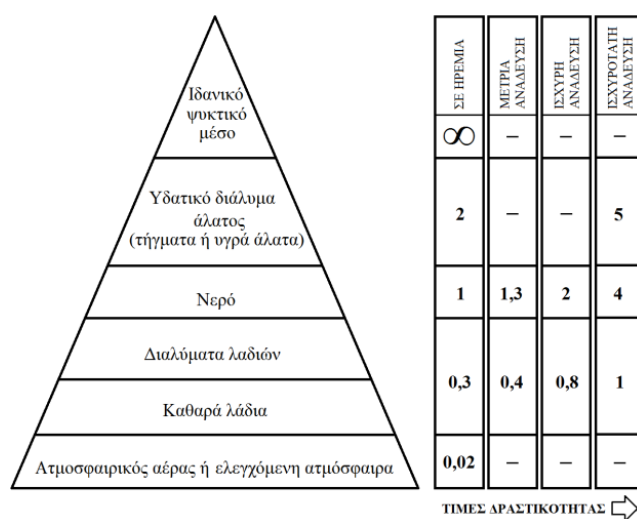
Η **αποτατική ανόπτηση** συμβάλλει στη μείωση ή εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων που έχουν δημιουργηθεί στο εσωτερικό ενός μεταλλικού υλικού κατά το στάδιο της παραγωγής και επεξεργασίας του. Με το πέρας αυτής της θερμικής κατεργασίας, το θερμαινόμενο μεταλλικό υλικό αποψύχεται αργά στον αέρα. Με αυτό τον τρόπο δεν μεταβάλλεται η μικρογραφική μορφή του μετάλλου. Οι χάλυβες ή τα κράματα των χαλύβων θερμαίνονται εντός της φερριτικής περιοχής τους σε θερμοκρασίες περίπου από 580°C έως 650°C [11].

Η **ανόπτηση σφαιροποίησης** και η **ταλαντευτική ανόπτηση** συντελούνται κατά κύριο λόγο στους χάλυβες και στα κράματα αυτών, καθώς έχουν ως σκοπό την σφαιροποίηση του σεμεντίτη, χωρίς όμως να μετασχηματιστεί η φάση τους. Η σφαιροποίηση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ολκιμότητας του υλικού και κατά συνέπεια τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του. Στην ανόπτηση σφαιροποίησης ο χάλυβας θερμαίνεται σε σταθερή θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη της κρίσιμης θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης A_{c1} (περίπου 700°C) και παραμένει σε αυτήν για πολλές ώρες, έως και 25 ώρες. Ενώ στην ταλαντευτική υπόκειται σε κυμαινόμενο εύρος θέρμανσης, πάνω - κάτω της κρίσιμης θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης A_{c1} (εύρος διακύμανσης περίπου $\pm 50^{\circ}\text{C}$) [11].

2.3.1.2 Βαφή

Η βαφή είναι μία θερμική κατεργασία η οποία πραγματοποιείται για την αύξηση της σκληρότητας των μετάλλων και αποτελείται από δύο στάδια. Αρχικά το αντικείμενο θερμαίνεται και παραμένει αυστηρά, για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια σε κάποια προεπιλεγθείσα θερμοκρασία. Εν συνεχεία αποψύχεται με ταχείς ρυθμούς μέσω της εμβάπτισης του, σε νερό ή σε λάδι ή σε υδατικά διαλύματα άλατος. Με αυτό τον τρόπο το μέταλλο δεν μετασηματίζεται στην κατάσταση ισορροπίας του, αλλά σε φάσεις εκτός ισορροπίας. Επομένως, ως βαφή ενός μετάλλου ονομάζεται η διαδικασία της βίαιης απόψυξης σε κατάλληλο μέσο εμβάπτισης, που στοχεύει στη διαμόρφωση καινούργιας μικροδομής στο υλικό [11].

Η δραστηριότητα των μέσων βαφής συμβολίζεται με το γράμμα Η και εξαρτάται άμεσα τόσο από το ίδιο το μέσο, αλλά παράλληλα και από την ισχυρότητα της ανάδευσης (Εικόνα 2.10). Οι τιμές του δείκτη δραστηριότητας κυμαίνονται από το 0,02 έως τον αριθμό 5. Στην περίπτωση ενός ιδανικού ψυκτικού μέσου εμβάπτισης, η ανάδευση δεν είναι απαραίτητη, διότι η τιμή του δείκτη στη κατάσταση ηρεμίας του μέσου τείνει στο άπειρο, επιτυγχάνοντας δηλαδή ακαριαία απόψυξη [11].



Εικόνα 2.10: Αναπαράσταση της σειράς φθίνουσας δραστηριότητας των ψυκτικών εμβαπτότητας, συναρτήσει της ισχυρότητας της ανάδευσης [11, εμπνευσμένο από Πίνακα 13.3, σελ.479].

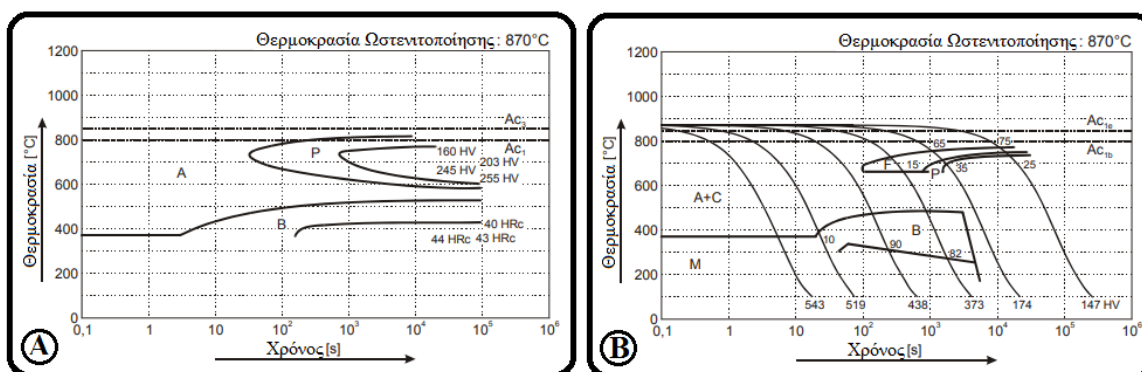
Η ταχύτητα απόψυξης δεν εξαρτάται μόνο από το είδος, τη θερμοκρασία και την ανάδευση του ψυκτικού μέσου, αλλά και από τη γεωμετρία, το μέγεθος, τη μάζα και την κατάσταση της επιφάνειας του εξαρτήματος. Η επιλογή του μέσου (φούρνος, αέρας, λάδι, νερό) και η θερμοκρασία του λουτρού εμβάπτισης εξαρτάται από την επιθυμητή μικροδομή που επιδιώκεται να αποκτηθεί [11].

Ο τρόπος μετασχηματισμού των φάσεων και διαμόρφωσης της μικροδομής ενός απλού ή κεκραμένου χάλυβα διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη ομάδα καλύπτει τους ισόθερμους μετασχηματισμούς TTT (Time Temperature Transformation) ή IT (Isothermal Transformation) και η δεύτερη τους μετασχηματισμούς συνεχούς ψύξης CCT (Continues Cooling Transformation) [3].

Στην **συνεχή βαφή CCT** (Εικόνα 2.11: B), το χαλύβδινο στοιχείο αφού πρώτα πυρακτωθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και παραμένει σε αυτή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, αποψύχεται με συνεχή τρόπο σε λουτρό θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή χαμηλότερης [25]. Η μέθοδος αυτή για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους, εφαρμόζεται κυρίως σε μαζικής παραγωγής χαλύβδινα εξαρτήματα. Τα διαγράμματα συνεχούς βαφής διαβάζονται κατά μήκος των καμπυλών αποψύξεως, στην βάση των οποίων αναγράφεται η σκληρότητα μαζί με την παράμετρο απόψυξης λ [26]. Κάθε διάγραμμα διαθέτει μία καμπύλη συνεχούς απόψυξης, που αντιστοιχεί στην κρίσιμη ταχύτητα βαφής (V_c). Η ταχύτητα αυτή ορίζει την ελάχιστη τιμή της ταχύτητας βαφής, η οποία μπορεί να επιλεγεί, πέρα από την οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί ο πλήρης μαρτενσιτικός μετασχηματισμός [11]. Οι μικροδομές που μπορούν να παρατηρηθούν από τον μετασχηματισμό του ωστενίτη είναι, ο χονδρόκοκκος περλίτης, ο λεπτόκοκκος περλίτης, ο περλίτης και μαρτενσίτης (σε διάφορα ποσοστά) και ο 100% μαρτενσίτης. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της ταχύτητας βαφής (θερμοκρασία/sec), τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το ποσοστό του εμφανιζόμενου μαρτενσίτη [3].

Στην **ισόθερμη βαφή TTT** (Εικόνα 2.11: A), το χαλύβδινο εξάρτημα πυρακτώνεται και πάλι στην περιοχή του κυβικού εδροκεντρωμένου συστήματος (fcc) της γ -φάσης του ωστενίτη, για συγκεκριμένο χρόνο (χρόνος πλήρους ωστενιτοποίησης). Στη συνέχεια εμβαπτίζεται πρώτα σε θερμό λουτρό, όπου και παραμένει για δεδομένη χρονική διάρκεια (από μερικά λεπτά έως αρκετές ώρες) και ύστερα ολοκληρώνει τον κύκλο απόψυξης του, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [25]. Η μέθοδος αυτή καλύπτει τις ισοθερμοκρασιακές αποψύξεις και τις κλιμακωτές βαφές. Τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται δίνουν την δυνατότητα στον σχεδιαστή της θερμικής κατεργασίας, να προβλέψει ποιοτικά εάν ο μετασχηματισμός είναι επιτεύξιμος ή όχι [11]. Διαβάζονται κατά μήκος της οριζόντιας κλίμακας του χρόνου, με τις τιμές της σκληρότητας να αναγράφονται αυτή τη φορά στην δεξιά κατακόρυφη κλίμακα [26]. Σε αυτή την περίπτωση οι μικροδομές που μπορούν να παραχθούν από τον μετασχηματισμό του ωστενίτη είναι: ο χονδρόκοκκος περλίτης, ο

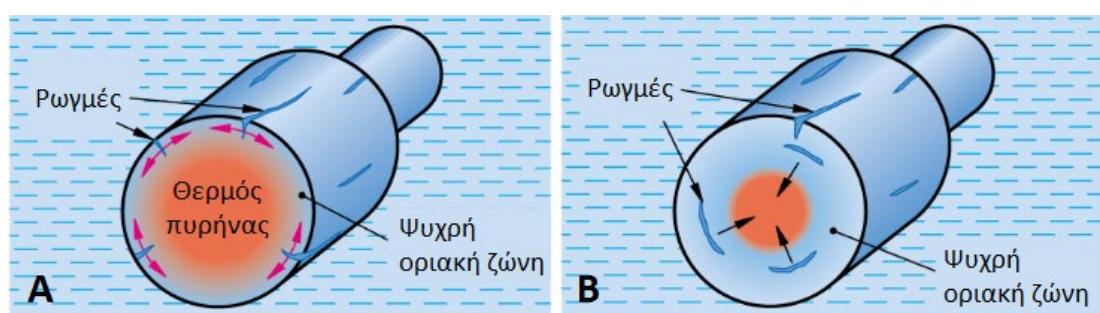
λεπτόκοκκος περλίτης, ο άνω μπαινίτης, ο κάτω μπαινίτης, ο μπαινίτης και μαρτενσίτης (σε διάφορα ποσοστά) και ο 100% μαρτενσίτης. Το ποσοστό εμφάνισης του μαρτενσίτη στη δομή του υλικού είναι αντιστρόφως ανάλογο του χρόνου παραμονής εμβάπτισης στο θερμό λουτρό [3].



Εικόνα 2.11: (Α) Διάγραμμα ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού TTT και (Β) Διάγραμμα συνεχούς βαφής CCT, του υλικού 1.8519 (31CrMoV9) [27, σελ.2].

Τα βαμμένα αντικείμενα εκτός από την αύξηση της σκληρότητας τους χαρακτηρίζονται για την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και μορφολογικών στρεβλώσεων, όπως επιμηκύνσεις, διογκώσεις, εξωτερικές και εσωτερικές ρωγμές. Οι μορφολογικές μεταβολές είναι συνηθέστερες στους μετασχηματισμούς συνεχούς ψύξης, διότι η απόψυξη γίνεται σε γρηγορότερους ρυθμούς. Μία διαστασιακή μεταβολή (επιμήκυνση ή διόγκωση) οφείλεται στο φαινόμενο της διαστολής του υλικού με την αύξηση της θερμοκρασίας και καταγράφεται σε ποσοστό επί τις % του αρχικού μεγέθους του εξαρτήματος. Οι εσωτερικές τάσεις είναι αποτέλεσμα των στρεβλώσεων που αναπτύσσονται, αλλά και του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, διότι η κρυσταλλική δομή του μαρτενσίτη (bct) παρουσιάζει περίπου 1% μεγαλύτερο όγκο από την κυψελίδα του φερρίτη (bcc). Οι ρωγμές βαφής (quench cracks) χωρίζονται σε εξωτερικές και σε εσωτερικές (Εικόνα 2.12) και οφείλονται στην έντονη διαφορά του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας της καρδιάς με την εξωτερική στιβάδα (φαινόμενο μάζας). Οι εξωτερικές ρωγμές μπορούν να εμφανιστούν κατά την εμβάπτιση στο επιλεγμένο λουτρό απόψυξης, διότι η εξωτερική στιβάδα του μεταλλικού εξαρτήματος αποψύχεται με γρηγορότερο ρυθμό σε σχέση με την καρδιά του. Με αυτόν τον τρόπο η εξωτερική επιφάνεια αρχίζει να συστέλλεται, ενώ ταυτόχρονα ο πυρήνας αντιτίθεται στη συστολή αυτή, καθώς διατηρεί ακόμα το αρχικό θερμοσμένο σχήμα του. Στη περαιτέρω απόψυξη το μέγεθος του θερμοσμένου πυρήνα αρχίζει να ψύχεται και να συστέλλεται. Η συστολή του όμως παρεμποδίζεται από την άκαμπτη ψυγμένη πλέον εξωτερική στιβάδα,

δημιουργώντας έτσι πιθανές εσωτερικές ρωγμές μεταξύ των δύο περιοχών. Περιοχές ρωγμών μπορούν να εμφανιστούν και κατά την απότομη θέρμανση του τεμαχίου, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε μία πολύ υψηλότερη (για παράδειγμα στους 960°C, περιοχή πλήρους ωστενιτοποίησης για έναν χάλυβα με 0,5 % κ.β. περιεκτικότητα σε άνθρακα) [3]. Σε αυτή τη περίπτωση η εξωτερική στιβάδα πυρακτώνεται γρηγορότερα συγκριτικά με τον πυρήνα του τεμαχίου. Αρχικά, η εξωτερική μεταλλική επιφάνεια διαστέλλεται ενώ ταυτόχρονα ο μη επηρεασμένος από τη θερμότητα πυρήνας παραμένει άκαμπτος ως προς αυτή την απότομη μεταβολή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να σχηματίζονται ρωγμές μεταξύ της εξωτερικά πυρωμένης επιφάνειας και του κρύου πυρήνα [18].



© [ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ], [2η Ελληνική Έκδοση],
[Σελίδα: 65], Verlag Europa-Lehrmittel



Εικόνα 2.12: Δημιουργία στρεβλώσεων και ρωγμών κατά την βαφή. (Α) Ο θερμός πυρήνας αντιτίθεται της συστολής της εξωτερικής στιβάδας. (Β) Η άκαμπτη εξωτερική στιβάδα εμποδίζει την συστολή του πυρήνα [18, Εικόνα 4, σελ.65].

Για την αποφυγή ανάπτυξης ρωγμών τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά του βαμμένου εξαρτήματος, εκτός από την σωστή επιλογή του μέσου απόψυξης, το τεμάχιο υποβάλλεται σχεδόν πάντα σε προθέρμανση (μία ή περισσότερες) και σε κλιμακωτή βαφή. Στο στάδιο της προθέρμανσης το αντικείμενο διατηρείται σε μία ή περισσότερες ενδιάμεσες θερμοκρασίες T , για σύντομο σχετικά χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να μεταβεί με τον δυνατόν ομαλότερο τρόπο στην τελική προσχεδιασμένη θερμοκρασία και να αποκτήσει την αναμενόμενη ποιότητα μεταλλικής δομής [25]. Στη κλιμακωτή βαφή η απόψυξη από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά, το χαλύβδινο στοιχείο αποψύχεται σε θερμό λουτρό τηγμένων αλάτων σε θερμοκρασία T , υψηλότερης της θερμοκρασίας εμφάνισης μαρτενσιτικής δομής (M_s) και ανάλογα του είδους της κλιμακωτής βαφής παραμένει σε αυτή, για ορισμένα δευτερόλεπτα - μαρτενσιτική, για λίγα λεπτά - μπαινιτομαρτενσιτική ή για αρκετές ώρες - μπαινιτική. Κατόπιν

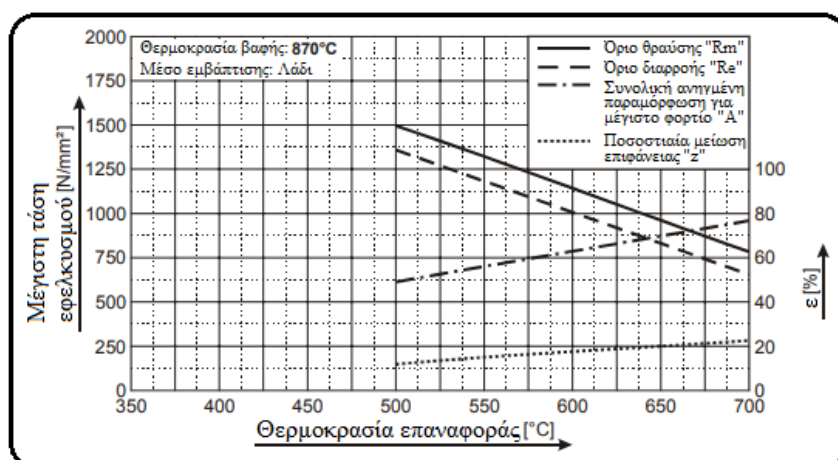
εμβαπτίζεται οριστικά σε ψυχρό λουτρό ή αφήνεται να ολοκληρώσει την απόψυξη του στον αέρα [3].

Η τεχνική της κλιμακωτής μαρτενσιτικής βαφής χρησιμοποιείται κατά κόρον στα μικρά και με λεπτομέρειες εξαρτήματα, όπως είναι τα κοπτικά εργαλεία και οι οδοντωτοί τροχοί. Από την άλλη, η κλιμακωτή μπαινιτική βαφή βρίσκει εφαρμογή σε περιορισμένα είδη χαλύβων. Μέσω αυτής της βαφής, εξαιτίας του πλήρη μετασχηματισμού του ωστενίτη σε μπαινίτη, ο χάλυβας αποκτάει υψηλό όριο διαρροής και θραύσης, καλή δυσθραυστότητα, υψηλή αντοχή σε κόπωση, αλλά χαμηλότερα επίπεδα σκληρότητας σε σχέση με τον μαρτενσίτη [3].

2.3.1.3 Επαναφορά

Η επαναφορά αποτελεί το τελευταίο στάδιο βαφής. Σε αυτή τη διεργασία τα βαμμένα τεμάχια θερμαίνονται ξανά και διατηρούνται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία για έναν ορισμένο χρόνο και στη συνέχεια υποβάλλονται σε απόψυξη στον αέρα. Το τελικό κρυσταλλικό αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας ονομάζεται επαναφερμένος μαρτενσίτης. Η πραγματοποίηση της επαναφοράς είναι επιτακτική, καθώς η δομή του μαρτενσίτη αποτελεί μία πολλή σκληρή και ταυτόχρονα ψαθυρή φάση, πρακτικά μη χρησιμοποιήσιμη. Αυτό συμβαίνει διότι η τετραγωνική δομή της φάσης του μαρτενσίτη (bct) αποτελεί ένα υπέρκορο διάλυμα σιδήρου άνθρακα μεγάλης πυκνότητας σε αταξίες. Συγκεκριμένα κατά την διεργασία της επαναφοράς τα άτομα του άνθρακα και οι δομικές κρυσταλλικές ατέλειες αποκτούν κινητικότητα. Η κινητικότητα αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την χαλάρωση των εσωτερικών τάσεων, την ανακατάταξη των δομικών αταξιών σε σχηματισμούς χαμηλότερης ενεργειακής στιβάδας και πυκνότητας, την ανάπτυξη του μεγέθους των κόκκων, την καθίζηση των μετασταθών ή σταθερών καρβιδίων στον κρυσταλλικό ιστό του μαρτενσίτη ή στις αταξίες και τον μετασχηματισμό του παραμένοντα ωστενίτη. Με αυτόν τον τρόπο προσδίδεται και πάλι στον χάλυβα ολκιμότητα και δυσθραυστότητα, ενώ παράλληλα παρατηρείται ελάχιστη μείωση στα επίπεδα της αποκτηθείσας σκληρότητας [3]. Ο συνδυασμός των θερμικών κατεργασιών της βαφής και της επαναφοράς χαρακτηρίζεται ως βελτίωση. Οι καθαροί και οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες επαναφέρονται περίπου σε θερμοκρασιακό εύρος από 200°C έως 350°C, ενώ οι υψηλά κραματωμένοι χάλυβες επαναφέρονται περίπου σε θερμοκρασίες από 500°C έως 700°C [18]. Τα διαγράμματα επαναφοράς που χρησιμοποιούνται, αποτελούν διαγράμματα της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού, συναρτήσει της

θερμοκρασίας επαναφοράς ή της περιεκτικότητας σε άνθρακα (για τους κοινούς χάλυβες). Μέσω της χρησιμοποίησής τους επιλέγεται η καταλληλότερη ανάλογα την περίπτωση περιοχή επιβελτίωσης (Εικόνα 2.13) [11].



Εικόνα 2.13: Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού 1.8519 (31CrMoV9), συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς [27, σελ.2].

2.3.2 Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες

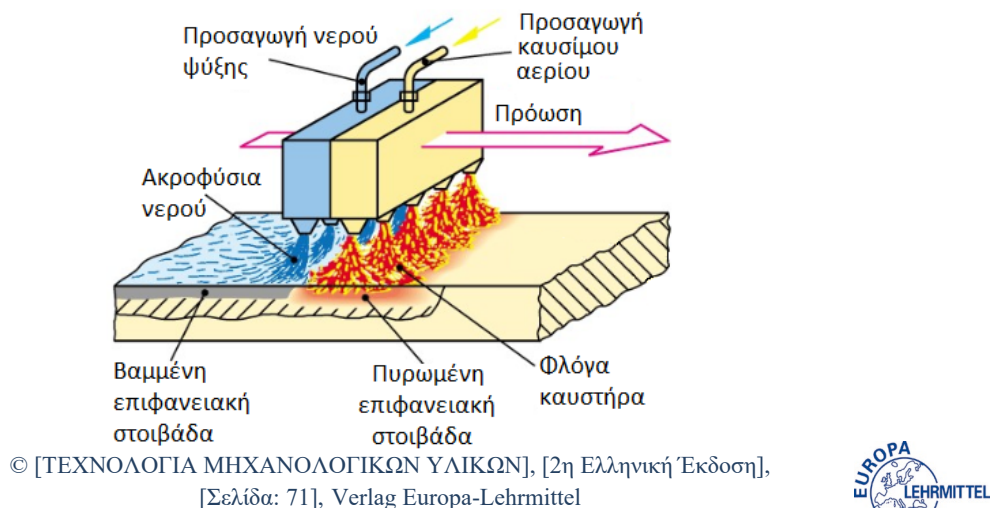
Οι επιφανειακές θερμικές κατεργασίες στοχεύουν στην τροποποίηση των ιδιοτήτων μόνο της εξωτερικής στιβάδας ενός μεταλλικού υλικού, με την καρδιά του να παραμένει ανεπηρέαστη. Είναι πολύ διαδεδομένες στα χάλυβδινα εξαρτήματα, καθώς συμβάλλουν αισθητά στην ενίσχυση της αντοχής τους έναντι της κόπωσης και της φθοράς, αλλά και στη προστασία τους ενάντια στις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στον περιβάλλοντα χώρο και έχουν σαν αποτέλεσμα την διάβρωση και την οξείδωσή τους. Η προστασία ενός μεταλλικού εξαρτήματος από τα φαινόμενα της διάβρωσης και της οξείδωσης, επιτυγχάνεται με την απομόνωση των εξωτερικών επιφανειών του από το ατμοσφαιρικό περιβάλλον ή το περιβάλλον λειτουργίας του. Στις επιφανειακές θερμικές κατεργασίες αυτό γίνεται εφικτό μέσω των τεχνικών παθητικοποίησης, που περιλαμβάνουν τις επιμεταλλώσεις με εμβάπτιση σε λουτρό τήγματος, τις ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις και τις επιμεταλλώσεις με ψεκασμό τηγμένου μετάλλου. Αντίθετα, η ενίσχυση της αντοχής ενός χάλυβδινου υλικού σχετίζεται άμεσα με την αύξηση της επιφανειακής του σκληρότητας. Η επιφανειακή σκληρότητα πραγματοποιείται μέσω των θερμικών τεχνικών και των τεχνικών θερμοχημικού εμποτισμού [11].

2.3.2.1 Θερμικές τεχνικές

Στις θερμικές τεχνικές η αύξηση της σκληρότητας ενός υλικού επιτυγχάνεται με την θέρμανση του επιφανειακού στρώματος του υλικού, σε θερμοκρασίες σχηματισμού ωστενίτη, δηλαδή, σε θερμοκρασίες υψηλότερες της κρίσιμης θερμοκρασίας A_{c3} και χαμηλότερες της θερμοκρασίας τήξης T_m . Εν συνεχεία υφίσταται βαφή και έτσι η μεταλλική δομή της επιφάνειας του τεμαχίου μετασχηματίζεται από ωστενιτική σε μαρτενσιτική, αποκτώντας υψηλά επίπεδα σκληρότητας. Κατά τη διαδικασία αυτή δεν επηρεάζεται η ολκιμότητα της καρδιάς. Για την εξάλειψη της ψαθυρής φάσης που χαρακτηρίζει τη δομή του μαρτενσίτη εφαρμόζεται η επαναφορά. Στις τεχνικές αυτές ανήκουν η φλογοβαφή, η επαγωγική βαφή και η «αυτο - βαφή» με βομβαρδισμό δεσμών υψηλής ενεργειακής βαφής [11].

2.3.2.1.1 Φλογοβαφή

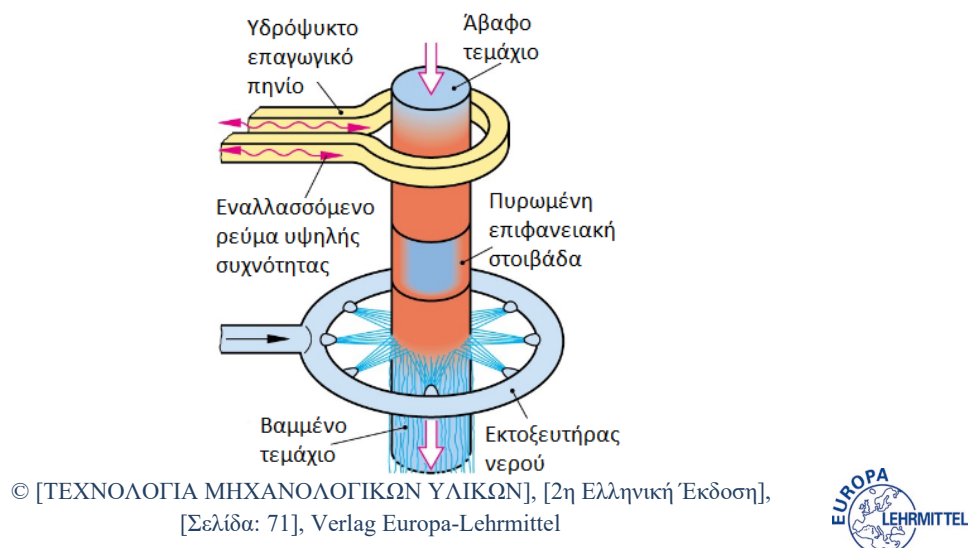
Με τη μέθοδο της φλογοβαφής, το μεταλλικό υλικό θερμαίνεται με τη φλόγα (μίγμα προσαγόμενου αερίου καύσης και οξυγόνου) ενός καυστήρα, που προωθείται ελεγχόμενα πάνω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Την κίνηση του καυστήρα ακολουθεί ένας καταιονιστήρας, όπου αποψύχει την θερμαινόμενη επιφάνεια με εκτόξευση ψυκτικού υγρού (Εικόνα 2.14). Το βάθος της βαφής εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα πρόωσης του φλόγιστρου και τη χημική σύσταση του υλικού [11, 18].



Εικόνα 2.14: Φλογοβαφή πρισματοδηγού [18, Εικόνα 1, σελ.71].

2.3.2.1.2 Επαγωγική βαφή

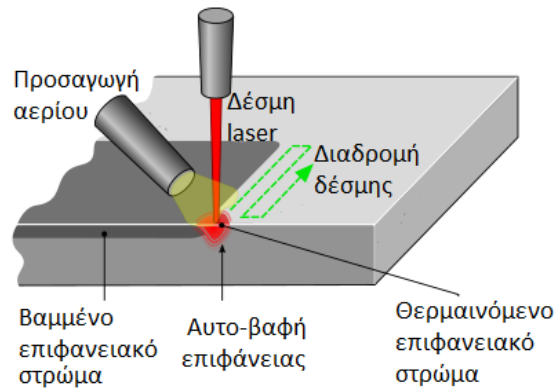
Στην τεχνική της επαγωγικής βαφής, το κατεργαζόμενο τεμάχιο οδηγείται με σταθερή ταχύτητα εντός του εσωτερικού των σπειρών ενός επαγωγικού πηνίου. Το πηνίο διεγείρεται από εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας και αρχίζει να παράγει δινορρέυματα. Τα δινορρέυματα με τη σειρά τους είναι υπεύθυνα για την παραγόμενη θερμότητα που απορροφάται από την εξωτερική στιβάδα του τεμαχίου. Με αυτόν τον τρόπο το εξάρτημα θερμαίνεται μέχρι την θερμοκρασία βαφής. Μετά το πέρας του επαγωγικού πηνίου και σε συγκεκριμένη απόσταση από αυτό, το εξάρτημα διέρχεται εντός κυλινδρικού ή δακτυλιοειδούς μορφής ψεκαστήρα, όπου και αποψύχεται με καταιονισμό νερού (Εικόνα 2.15). Το βάθος της βαμμένης επιφάνειας ρυθμίζεται από το μέγεθος της συχνότητας του ρεύματος, την χημική σύσταση του υλικού και την ταχύτητα διέλευσης του εξαρτήματος [18].



Εικόνα 2.15: Επαγωγική βαφή κυλινδρικού τεμαχίου [18, Εικόνα 1, σελ70].

2.3.2.1.3 Δέσμες υψηλής ενεργειακής πυκνότητας

Οι δέσμες υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (δέσμη ηλεκτρονίων ή ιόντων ή laser), με τη χρήση ειδικών κατόπτρων εστίασης, προσφέρουν την δυνατότητα εστίασης της δέσμης και παράλληλα της θέρμανσης πολύ μικρών και με λεπτομέρεια επιφανειών. Ο όρος της «αυτο-βαφής» που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως, ανάγεται στον τρόπο απόψυξης του τεμαχίου. Η απόψυξη οφείλεται στην αγωγή της θερμότητας μέσω του κύριου όγκου του υλικού και πραγματοποιείται με ιδιαίτερα ταχείς ρυθμούς (Εικόνα 2.16) [11].



Εικόνα 2.16: Αναπαράσταση βαφής με τη χρήση δεσμών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας [28].

2.3.2.2 Θερμοχημικές τεχνικές

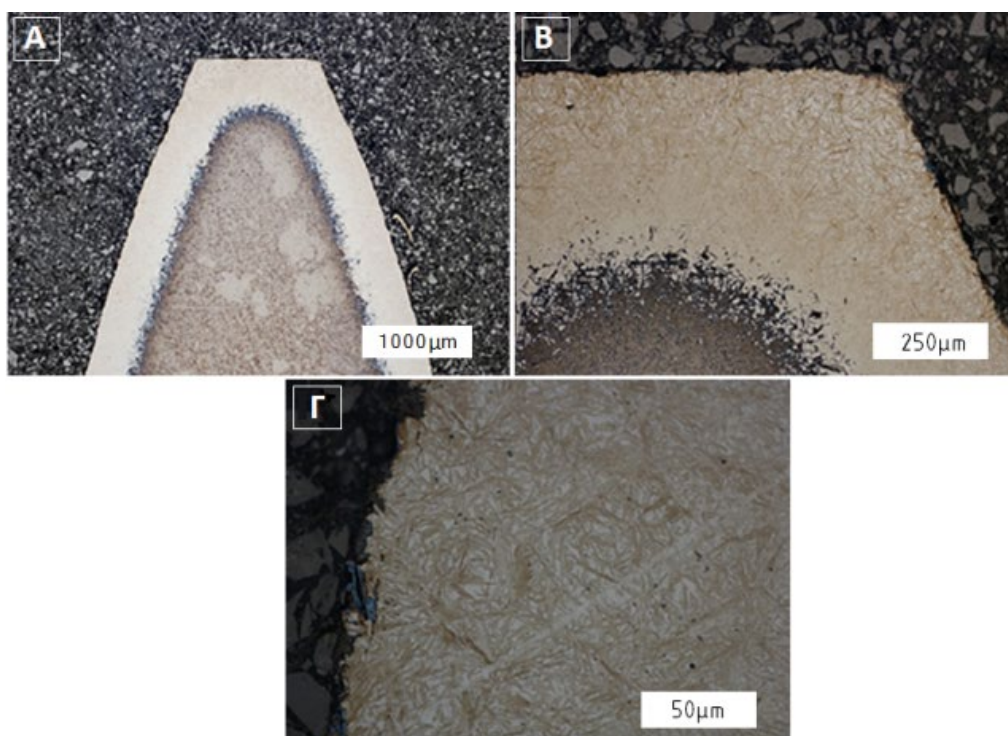
Κατά τις θερμοχημικές τεχνικές εμποτισμού μεταβάλλεται η χημική σύσταση του επιφανειακού στρώματος ενός κεκραμένου ή κοινού χάλυβα, καθώς εμπλουτίζεται η εξωτερική στιβάδα του με στοιχεία προσθήκης, όπως είναι ο άνθρακας (C), το άζωτο (N), το χρώμιο (Cr), το βόριο (B), το αλουμίνιο (Al), ο ψευδάργυρος (Zn) και το πυρίτιο (Si). Οι εμποτισμοί πραγματοποιούνται μέσω μηχανισμών διάχυσης σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Ανάλογα με το στοιχείο ή τα στοιχεία πρόσμειξης που θα χρησιμοποιηθούν ως εμποτιστικά μέσα, οι θερμοχημικές κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης που συναντώνται στα χαλύβδινα υλικά είναι: η ενανθράκωση, η εναζώτωση, η ενανθρακαζώτωση, η ενδοκυάνωση, η εναργιλίωση, η εγχρωμίωση, η ενσιλικώση, η σεραρδίωση και η βορίωση. Από αυτές τις τεχνικές, οι συχνότερα εφαρμόσιμες είναι η ενανθράκωση και η εναζώτωση [3, 11].

2.3.2.2.1 Ενανθράκωση

Η ενανθράκωση (carburizing) ανήκει στις θερμοχημικές κατεργασίες, διότι διαμέσου αυτής εμπλουτίζεται η εξωτερική στιβάδα ενός απλού ή κραματωμένου χάλυβα με άνθρακα. Γενικά οι χάλυβες με ποσοστό περιεκτικότητας σε άνθρακα από 0,10% έως 0,25%, δεν επιδέχονται σκλήρυνση μέσω των τεχνικών βαφής [11]. Σκοπός της ενανθράκωσης είναι ο επιφανειακός εμπλουτισμός του υλικού με ξένα σωματίδια άνθρακα, καθιστώντας το ικανό για βαφή [25]. Η εμβαπτότητα και κατά επέκταση η σκληρότητα του σχηματιζόμενου μαρτενσίτη που δημιουργείται κατά τη θερμική κατεργασία της βαφής είναι ανάλογη της αύξησης του ποσοστού περιεκτικότητας σε άνθρακα. Με αυτό τον τρόπο το εξωτερικό στρώμα του τεμαχίου μπορεί να βαφτεί και να αυξήσει την σκληρότητα του, διατηρώντας ανεπηρέαστη την

ολκιμότητα στον πυρήνα του [3]. Για τον λόγο αυτό οι ενανθρακωμένοι χάλυβες έχουν μεγάλη αντοχή σε τριβή και φθορά, και καλή δυσθραυστότητα [25].

Μετά την κατεργασία το εξάρτημα διαθέτει επιφανειακά, την επιθυμητή περιεκτικότητα σε άνθρακα και πλέον μπορεί να υποστεί βαφή, για την επίτευξη σκληρότερου επιφανειακού στρώματος. Η βαφή που εφαρμόζεται συνήθως είναι διπλή. Στην πρώτη, το εξάρτημα θερμαίνεται σε θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και ύστερα υποβάλλεται σε απόψυξη συνήθως στο νερό, ενώ στη δεύτερη η θερμοκρασία βαφής αγγίζει τους 760°C (ανάλογα με τη χημική σύσταση του υλικού) και εν συνεχεία ψύχεται στο λάδι. Με το τέλος της δεύτερης βαφής το εξάρτημα υποβάλλεται σε επαναφορά, στην ίδια θερμοκρασία με αυτήν της δεύτερης βαφής. Η μεταλλική δομή που λαμβάνεται στο τέλος, είναι λεπτόκοκκος μαρτενσίτης (Εικόνα 2.17) [11].



Εικόνα 2.17: Μικροδομή του ενανθρακωμένου στρώματος ενός δοντιού, μέρους γραναζιού εξωτερικής οδόντωσης. (Α) Κάτοψη δοντιού, Μεγέθυνση 25x, (Β) Γωνία δοντιού, Μεγέθυνση 100x, (Γ) Μαρτενσιτική δομή στρώματος, Μεγέθυνση 500x [29, Εικόνα 3, σελ.256].

Το ποσοστό του άνθρακα στην εξωτερική στιβάδα του υλικού εκτός από την θερμοκρασία ενανθράκωσης και τον χρόνο παραμονής σε αυτήν, εξαρτάται άμεσα από το μέσο ενανθρακώσεως. Το βάθος ενανθρακώσεως μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 2 με 3 mm. Τα ενανθρακωτικά μέσα που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι σε στερεά, σε υγρή και σε αέρια μορφή [3].

Η **ενανθράκωση σε στερεά υλικά** πραγματοποιείται συνήθως στους 900°C με 950°C [3]. Τα στερεά υλικά είναι κόκκοι άνθρακος καθορισμένου μεγέθους (σκόνη μίγματος ξυλάνθρακα και ανθρακούχων ενώσεων) [11], με τους οποίους επικαλύπτονται τα τεμάχια εντός ενός ανοξείδωτου τις περισσότερες φορές κιβωτίου, το οποίο με τη σειρά του τοποθετείται εντός του φούρνου [25]. Με την καύση της σκόνης, σε συνδυασμό με τον αέρα που βρίσκεται εγκλωβισμένος εντός του κιβωτίου, παράγεται μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Από την συνέχιση της καύσης των κόκκων άνθρακα, μέρος του παραχθέντος μονοξειδίου του άνθρακα συνδυάζεται με τον υπολειπόμενο διασπώμενο άνθρακα (C), σχηματίζοντας έτσι μόρια του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο σχηματισμός του μονοξειδίου του άνθρακα παράγεται μόνο σε θερμοκρασίες ανώτερες των 800°C. Με αυτόν τον τρόπο τα δύο αέρια που απελευθερώνονται κατά την θέρμανση αποτελούν τους φορείς του άνθρακα που διαχέεται στην εξωτερική στιβάδα του χάλυβα [25]. Τα στοιχεία του άνθρακα διεισδύουν στην επιφανειακή στιβάδα και αντιδρούν με το σίδηρο, σχηματίζοντας το καρβίδιο του σιδήρου, τον σεμεντίτη (Fe₃C) [18].

Στην **ενανθράκωση με υγρά μέσα** το στοιχείο εμβαπτίζεται σε θερμά λουτρά τηγμάτων ανθρακούχων ενώσεων, θερμοκρασίας 880°C μέχρι 910°C, όπου και παραμένει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα εντός του λουτρού [25]. Κατά την θέρμανση των υγρών μέσων, οι ανθρακούχες ενώσεις διασπώνται στην επιφάνεια του χάλυβα, διαχέοντας με άτομα του άνθρακα την εξωτερική του στιβάδα [11]. Μία τυπική αναλογία που χρησιμοποιείται είναι το χλωριούχο νάτριο (NaCl) και το ανθρακικό νάτριο (Na₂CO₃) σε 50%, το κυανιούχο νάτριο (NaCN) σε 10-20% και το χλωριούχο βάριο (BaCl₂) σε 30% κ.β. του συνολικού μείγματος. Αναλόγως της σύστασης του μίγματος των κόνεων που θα χρησιμοποιηθεί, τα παραγόμενα προϊόντα διαφέρουν. Ωστόσο, ένα από τα κύρια ενανθρακωτικά μέσα αυτών των προϊόντων είναι το χλωριούχο βάριο (Ba(CN)₂). Η τεχνική αυτή αποτελεί την καλύτερη μέθοδο ενανθράκωσης, επειδή εξασφαλίζει τον πλήρη εναγκαλισμό των θερμαινόμενων τεμαχίων και των εύκολο έλεγχο της θερμοκρασίας του λουτρού, εξαλείφοντας τον κίνδυνο απανθράκωσης του ενανθρακωτικού μέσου από λάθος [25]. Ωστόσο, έχει παραγκωνιστεί, διότι τα τήγματα αλάτων που χρησιμοποιούνται είναι ιδιαίτερα τοξικά, τόσο κατά την ζέση τους, όσο και τα υπολείμματα αυτών. Επιπλέον, μέσα από την λήψη των κατάλληλων μέτρων προστασίας, αυξάνεται σημαντικά το κόστος της κατεργασίας (σύστημα εξαερισμού, ατομικά μέσα προστασίας, σύστημα διαχείρισης αποβλήτων κ.α.) [11].

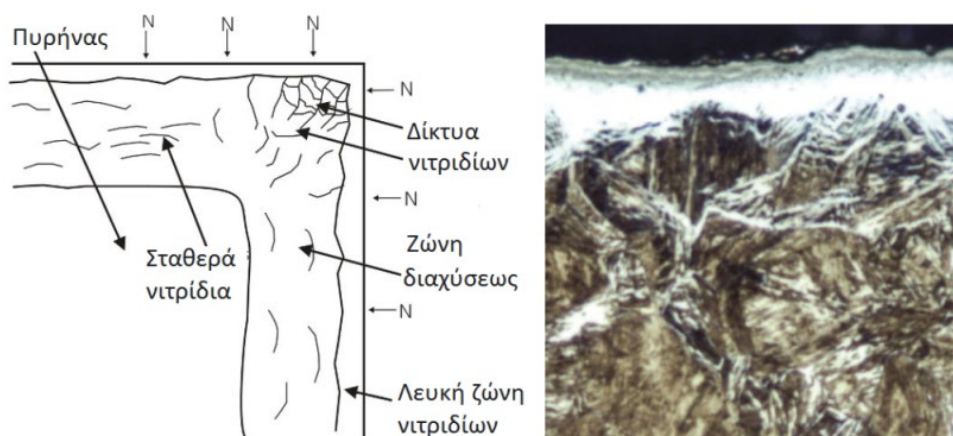
Η τεχνική της **ενανθράκωσης με αέρια μέσα** είναι γνωστή από την αρχαιότητα και εφαρμοζόταν κατά κόρον κατά την παρασκευή των πρώτων σπαθιών. Εκείνη την περίοδο μέσα από την καύση του ξυλάνθρακα, εκλυόταν διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο με τη σειρά του διασπόταν πάνω στην επιφάνεια της χαλύβδινης λεπίδας, εμπλουτίζοντάς την με άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχανόταν περλιτική δομή στην επιφανειακή στιβάδα του υλικού. Στην σύγχρονη εποχή το προς επεξεργασία τεμάχιο, τοποθετείται εντός ειδικού αεροστεγή κλιβάνου, θερμοκρασίας περίπου στους 920°C [25]. Ο κλιβανός διακατέχεται από ελεγχόμενη ατμόσφαιρα αέριων μιγμάτων υδρογόνου (H_2), μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα και υδρογονανθράκων μεθανίου (CH_4) και προπανίου (C_3H_8). Με την αύξηση της θερμοκρασίας τα συστατικά αυτά αντιδρούν μεταξύ τους απελευθερώνοντας τον απαιτούμενο άνθρακα, για την ενανθράκωση της επιφάνειας του τεμαχίου. Τα αέρια αυτά είναι δηλητηριώδη και πολλές φορές εκρηκτικά, για αυτό το λόγο λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα ως προς τα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται [11].

2.3.2.2.2 Εναζώτωση

Εναζώτωση (nitriding) ονομάζεται η θερμοχημική κατεργασία, κατά την οποία διαχέονται άτομα του αζώτου (N) στην επιφάνεια ενός μετάλλου, με σκοπό την δημιουργία ενός σκληρού στρώματος υψηλής αντοχής στην τριβή [18]. Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σε χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και σε ελαφρά κραματωμένους χάλυβες. Σε μικρότερη συχνότητα, χρησιμοποιείται και σε χάλυβες μεσαίας και υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, αλλά και σε άλλα μέταλλα όπως είναι το τιτάνιο, το αλουμίνιο και το μολυβδαίνιο [30]. Με την μέθοδο της εναζώτωσης ο αρχικός όγκος των επεξεργαζόμενων τεμαχίων παραμένει σχεδόν αμετάβλητος, διότι η θερμοχημική κατεργασία πραγματοποιείται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες [31]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποφεύγεται ο σχηματισμός στρεβλώσεων, όπως είναι οι επιμηκύνσεις, οι δημιουργία έντονων εσωτερικών τάσεων και οι ρωγμές [32]. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόζεται κυρίως σε μηχανολογικά εξαρτήματα ακριβείας, αυστηρών ανοχών, όπως είναι οι οδοντωτοί τροχοί, οι άτρακτοι μετάδοσης κίνησης (για παράδειγμα ο στρόφαλος και ο εκκεντροφόρος), τα εμβολοχιτώνια, οι κοχλίες εξώθησης - τροφοδοσίας λειωμένου πλαστικού στις μηχανές χύτευσης με έγχυση (injection molding machine) και τα διάφορα εξαρτήματα και μέρη που απαρτίζουν τα καλούπια χύτευσης [3, 30]. Η εναζώτωση αποτελεί τελικό στάδιο κατεργασίας, καθώς η επιθυμητή σκληρότητα εξασφαλίζεται

κατευθείαν διαμέσου της διάχυσης του αζώτου, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω θέρμανση και απόψυξη ή επαναφορά. Στην περίπτωση που το εξάρτημα πρέπει να βελτιωθεί (βαφή και επαναφορά), για την ανάπτυξη συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων, η θερμική κατεργασία εντός της μάζας θα πρέπει να υποβληθεί πριν την εναζώτωση [18].

Η τεχνική της εναζώτωσης πραγματοποιείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτήν της ενανθράκωσης, διότι εφαρμόζεται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της ευτηκτικής ζώνης (592°C) του συστήματος Fe-N [3]. Το άζωτο υπό κατάλληλες συνθήκες μπορεί να διαχυθεί στην επιφάνεια του σιδήρου, σε θερμοκρασίες πλησίον των 500°C [32]. Αποφεύγεται η θερμοκρασία να υπερβαίνει τους 592°C , καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας υπάρχει ο κίνδυνος επηρεασμού της σκληρότητας του πυρήνα του υλικού [31]. Ταυτόχρονα με την αύξηση της θερμοκρασίας μεγαλώνει το ρίσκο σχηματισμού δικτύων από νιτρίδια (nitride networking) στη ζώνη διαχύσεως (Εικόνα 2.18). Τα δίκτυα των νιτρίδιων έχουν την τάση να σχηματίζονται στις γωνιακές περιοχές του κατεργαζόμενου εξαρτήματος (corner effect) και αποτελούν προϊόν της υψηλής διαλυτότητας του αζώτου στο σίδηρο. Οι περιοχές αυτές είναι ιδιαίτερα σκληρές και παράλληλα ψαθυρές, καθιστώντας τις υπαίτιες για πιθανόν επιφανειακές εκλεπίσεις στην εξωτερική ζώνη της εναζώτωσης [33].



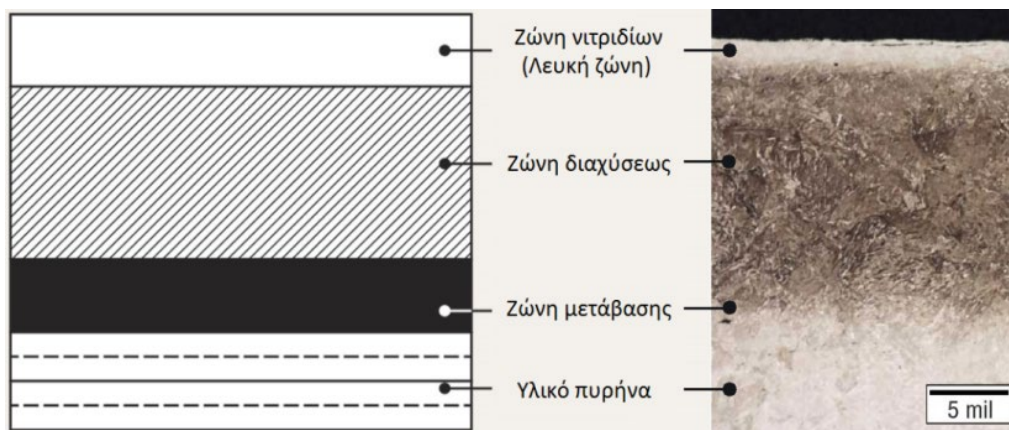
Εικόνα 2.18: Απεικόνιση του φαινομένου των δικτύων από νιτρίδια (corner effect) [34].

Στην τεχνική της εναζώτωσης η επιθυμητή επιφανειακή σκληρότητα δεν βασίζεται πλέον στη διάχυση του άνθρακα στην ωστενιτική περιοχή του υλικού και στη σκληρή δομή του μαρτενσίτη που αποκτάται μετά το πέρας της βαφής, αλλά στη διάχυση του αζώτου στη φερριτική περιοχή του χάλυβα. Μέσω της διάχυσης, τα άτομα του αζώτου αντιδρούν με τα άτομα του σιδήρου ($\alpha\text{-Fe}$), τροποποιώντας την χημική σύσταση του επιφανειακού στρώματος, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο

εξαιρετικά σκληρές ενώσεις, τα σιδηρονιτρίδια. Τα νιτρίδια του σιδήρου που σχηματίζονται σε θερμοκρασίες έως τους 590°C είναι τα Fe₄N, γ'-Fe₄N και ε-Fe₂₋₄N, ενώ σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 500°C σχηματίζεται το ζ (ή) ξ-Fe₂N [35]. Τα νιτρίδια συναντώνται στο επιφανειακό στρώμα, υπό τον σχηματισμό κατακρημνισμάτων ή συνεχών στρωμάτων νιτρίδιων ή καρβονιτρίδιων τα οποία παρατηρούνται τόσο εντός της περιοχής των κόκκων, όσο και κατά μήκος του ορίου των κόκκων [11]. Στην περίπτωση των κραματωμένων χαλύβων τα νιτρίδια δεν σχηματίζονται μόνο με τα άτομα του σιδήρου, αλλά και με τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία που συγκροτούν τη μεταλλική δομή του υλικού. Τα στοιχεία που είναι ιδιαίτερα ευεργετικά ως προς την εναζώτωση είναι, το αλουμίνιο (Al), το χρώμιο (Cr), το τιτάνιο (Ti), το βανάδιο (V), το βολφράμιο (W) και το μολυβδαίνιο (Mo). Ενώ τα κραματικά στοιχεία όπως το μαγγάνιο (Mn), το πυρίτιο (Si), το νικέλιο (Ni) και ο χαλκός (Cu) που συχνά εμπεριέχονται στα κράματα, συμβάλλουν ελάχιστα έως καθόλου στην κατεργασία της εναζώτωσης [31]. Παράλληλα με την απελευθέρωση των νιτρίδιων του σιδήρου, τα κραματικά αυτά στοιχεία αντιδρούν με τα άτομα του αζώτου που διαχέονται στην επιφάνεια του υλικού, δημιουργώντας και αυτά, τα δικά τους σκληρά νιτρίδια (π.χ. νιτρίδια του χρωμίου, του αργιλίου κλπ.). Το στρώμα των νιτρίδιων που σχηματίζεται στην επιφάνεια ενός εξαρτήματος, αποδίδει στο υλικό, αντιγηραντικές ιδιότητες, αύξηση στην επιφανειακή του σκληρότητα, αύξηση στην αντίσταση φθοράς, αύξηση στην αντοχή έναντι της κόπωσης, βελτιώνει την αντίσταση στη διάβρωση (εκτός από τους ανοξειδωτους χάλυβες) και αυξάνει την αντίστασή του έναντι του φαινομένου της θερμικής μαλάκωσης (tempering softening), διατηρώντας την σκληρότητά του για θερμοκρασίες μέχρι και την θερμοκρασία εναζώτωσης του [31].

Στην μεταλλογραφική απεικόνιση ενός εναζωτωμένου χάλυβα, παρατηρείται ότι το εναζωτωμένο στρώμα συγκροτείται από τρεις περιοχές (Εικόνα 2.19), την ζώνη νιτρίδιων ή λευκή ζώνη (compound zone), τη ζώνη διαχύσεως (diffusion zone) και την μεταβατική ζώνη (transition zone) [34]. Λόγω της λευκής απόχρωσης της, η ζώνη των νιτρίδιων ονομάζεται και λευκή, είναι διφασική περιοχή και περιέχει νιτρίδια του τύπου γ'-Fe₄N και ε-Fe₂₋₄N [3]. Η διφασική ιδιότητα της λευκής ζώνης των νιτρίδιων επηρεάζεται άμεσα από την περιεκτικότητα του αζώτου, που έχει διαλυθεί στην α-φάση του σιδήρου (φερρίτης). Όταν η περιεκτικότητα του διαλυμένου αζώτου στην επιφάνεια του υλικού, υπερβεί περίπου το 0,1%, τότε αρχίζει να σχηματίζεται το γ'-νιτρίδιο. Ενώ, όταν η περιεκτικότητα υπερβεί περίπου το 6%, τότε το γ'-νιτρίδιο

αρχίζει να μετασχηματίζεται σε ε-νιτρίδιο [35]. Η ζώνη αυτή μπορεί να εκτείνεται σε βάθος έως και 25 μm , και διαθέτει υψηλά επίπεδα σκληρότητας από 1500 έως 2000HV. Η ζώνη διαχύσεως αποτελείται από στερεό διάλυμα παρεμβολής Fe-N και από νιτρίδια του τύπου γ' -Fe₄N. Εκτείνεται σε βάθος έως και 1mm κάτω από την λευκή ζώνη και διαθέτει σκληρότητα έως 500HV [3]. Η ζώνη μετάβασης είναι το στρώμα που παρεμβάλλεται μεταξύ της ζώνης διαχύσεως και του πυρήνα του τεμαχίου, του οποίου η χημική σύσταση δεν έχει εμπλουτιστεί με άζωτο [34].



Εικόνα 2.19: Απεικόνιση των επιμέρους ζωνών ενός τυπικού εναζωτωμένου στρώματος. Εικονιζόμενο υλικό: Nitrallloy 135M, με βάθος εναζωτωμένου στρώματος: 0,40mm και με βάθος λευκής ζώνης: 0,0055mm [34, 36].

Η σκληρότητα του εναζωτωμένου στρώματος του υλικού εξαρτάται, από την θερμοκρασία εναζώτωσης και από την περιεκτικότητα των στοιχείων κραμάτωσης που εμπεριέχονται σε αυτό. Επηρεάζεται από την θερμοκρασία, διότι η ποικιλομορφία των νιτρίδιων που δημιουργείται, αλλάζει ανάλογα με την θερμοκρασία που επιλέγεται. Τα κραματικά στοιχεία με τη σειρά τους επηρεάζουν άμεσα την διαλυτότητα του αζώτου στο πλέγμα του χάλυβα και κατά επέκταση και την επιφανειακή του σκληρότητα. Για παράδειγμα τα στοιχεία του αλουμινίου και του χρωμίου επηρεάζουν θετικά στην αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας. Τα νιτρίδια του αργιλίου που δημιουργούνται από την αντίδραση του αλουμινίου με το άζωτο, αποτελούν τις σκληρότερες ενώσεις μεταξύ των υπολοίπων στοιχείων. Αυτό συμβαίνει διότι το αλουμίνιο δεν επηρεάζεται από τον άνθρακα που εμπεριέχεται στον χάλυβα, με αποτέλεσμα να μην διαμορφώνει καρβίδια μαζί του, αλλά να είναι σχεδόν εξολοκλήρου στην διάθεση σχηματισμού ενώσεων με το άζωτο. Σε αντίθεση με τα στοιχεία του μολυβδαινίου και του βαναδίου, όπου με την αύξηση της θερμοκρασίας εναζωτώσεως, αυξάνεται και ο σχηματισμός των καρβιδίων τους με το στοιχείο του άνθρακα. Αυτό οδηγεί στον περιορισμένο σχηματισμό κατακρημνίσεων

των νιτριδίων, από τη διάχυση του αζώτου στο φερριτικό πλέγμα του σιδήρου και κατά επέκταση στην απόδοση χαμηλότερων επιπέδων σκληρότητας. Ωστόσο, η διατήρησή τους σε χαμηλές περιεκτικότητες αποβλέπει στην αύξηση της αντίστασης έναντι του φαινομένου της θερμικής μαλάκωσης [37].

Το ποσοστό των ατόμων του αζώτου που μπορεί να διαλυθεί στην επιφάνεια ενός χάλυβα, εξαρτάται από την ατομική διάμετρο του αζώτου, το είδος της κρυσταλλικής δομής και το μέγεθος του εσωτερικού χώρου των οκταεδρικών κενών που διαμορφώνονται. Σύμφωνα με το δυαδικό διάγραμμα φάσης Fe-N, στην περίπτωση εναζώτωσης του καθαρού σιδήρου, σε θερμοκρασίες που δεν υπερβαίνουν τους 590°C και αναλόγως της ποσότητας του αζώτου, μπορούν να σχηματιστούν τέσσερις διαφορετικές φάσεις. Ανάλογα με το κρυσταλλικό σύστημα που διαθέτει η κάθε φάση, τροποποιείται και η διαλυτότητα του αζώτου εντός της κύριας δομής του σιδήρου [32]:

- Στην περίπτωση του χωροκεντρωμένου κρυσταλλικού συστήματος (bcc) της α-φάσης του φερρίτη, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η διαλυτότητα αγγίζει το 0,001% κ.β. N και σε θερμοκρασία εναζώτωσης έως τους 590°C φθάνει το 0,115% κ.β. N.
- Στην περίπτωση του εδροκεντρωμένου κρυσταλλικού συστήματος (fcc), του νιτριδίου γ' -Fe₄N, σε θερμοκρασία εναζώτωσης έως τους 590°C φθάνει το 5,7 έως 6,1% κ.β. N.
- Στο μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικό σύστημα (hcp), του νιτριδίου ϵ -Fe₂₋₄N, σε θερμοκρασία εναζώτωσης έως τους 590°C φθάνει το 8 έως 11% κ.β. N.
- Στην περίπτωση του ορθορομβικού κρυσταλλικού συστήματος, του νιτριδίου ζ -Fe₂N, σε θερμοκρασίες κάτω των 500°C, η διαλυτότητα υπερβαίνει το 11% κ.β. N.

Τα είδη των διαφόρων νιτριδίων που δημιουργούνται, σε συνδυασμό με τις θέσεις που καταλαμβάνουν στο βασικό κρυσταλλικό πλέγμα, βελτιώνουν τις ιδιότητες ενός υλικού. Αυτό οφείλεται στην λεπτομερή και πυκνή διασπορά των νιτριδίων μεγέθους 5-15nm, στις διάφορες ζώνες που συγκροτούν το στρώμα εναζώτωσης, στην υψηλή πυκνότητα των γραμμικών ατελειών που εμφανίζονται και στην ισχυροποίηση του στερεού διαλύματος εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης του αζώτου σε θέσεις παρεμβολής εντός του φερριτικού πλέγματος [3].

Το βάθος του εναζωτωμένου στρώματος περιγράφει την κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια έως το σημείο το οποίο η σκληρότητα είναι 50HV υψηλότερη από αυτήν του πυρήνα [37]. Το βάθος εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής. Στην μέθοδο αυτή, η θερμοκρασία ζέσης είναι σχετικά χαμηλή και ο χρόνος παραμονής πάρα πολύ μεγάλος (αρκετές δεκάδες ώρες). Η σχετικά χαμηλή, ανώτερη θερμοκρασία κατεργασίας που μπορεί να ληφθεί (590°C), περιορίζει την ταχύτητα διάχυσης σε χαμηλά επίπεδα, ορίζοντάς της αντίστοιχα μία μικρή μέγιστη τιμή. Μη μπορώντας να μεταβληθεί ο ρυθμός διαχύσεως, αυξάνεται ο χρόνος παραμονής. Γίνεται αντιληπτό ότι το βάθος εναζώτωσης είναι ανάλογο του χρόνου παραμονής. Παρατηρείται, ωστόσο, ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής τα επίπεδα σκληρότητας ελαττώνονται. Για συγκεκριμένο χρόνο παραμονής, παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται το βάθος της ζώνης διαχύσεως (μπορεί να ξεπεράσει το 1mm) [38].

Ανάλογα με το μέσο της διάχυσης που θα χρησιμοποιηθεί, ο εμποτισμός του αζώτου επιτυγχάνεται με τη χρήση τριών τεχνικών: την εναζώτωση με αζωτούχα αέρια (gaseous nitriding), την εναζώτωση με λουτρά άζωτος (salt bath nitriding) και την εναζώτωση με ακτίνες ιόντων (ion nitriding ή plasma beams). Πριν από κάθε τεχνική τα προς επεξεργασία τεμάχια υποβάλλονται σε καθαρισμό, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα και οξειδωμένες περιοχές [31].

Στην **αέρια τεχνική**, η εναζώτωση πραγματοποιείται σε φούρνους ελεγχόμενης ατμόσφαιρας, με συγκεκριμένα ποσοστά σε αμμωνία από 15 έως 30% [31]. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε θερμοκρασίες πλησίον των 500°C, διότι σε αυτές τις θερμοκρασίες διευκολύνεται η διάσπαση του μορίου της αμμωνίας [35]. Το θερμοκρασιακό εύρος που μπορεί να εφαρμοστεί κατά την κατεργασία αυτήν είναι, από 450°C έως 590°C. Ωστόσο, σύμφωνα με την Αμερικανική Κοινότητα για τα Μέταλλα (ASM International), το ενδεδειγμένο θερμοκρασιακό εύρος, για όλους τους χάλυβες, ορίζεται μεταξύ των 495 και 565°C. Ο χρόνος παραμονής είναι ιδιαίτερα μεγάλος σε αυτές τις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, φτάνοντας μέχρι και τις 80 ώρες. Η κατεργασία αυτή αποτελεί την πρώτη μέθοδο εναζώτωσης που αναπτύχθηκε και αποτελεί έως και σήμερα την βασική τεχνική εναζώτωσης στο χώρο της βιομηχανίας [31].

Η πυρακτωμένη επιφάνεια του σιδερένιου τεμαχίου λειτουργεί ως καταλύτης στη διάσπαση της άνυδρης αμμωνίας (NH₃), όταν αυτή έρχεται σε επαφή μαζί της. Τα παράγωγα της διάσπασης, είναι τα αέρια του αζώτου (N) και του υδρογόνου

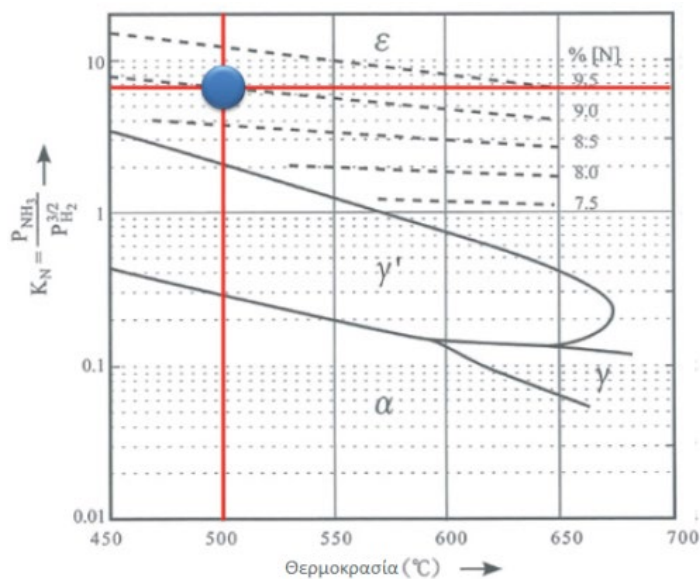
(3/2H₂). Με αυτόν τον τρόπο, για κλάσματα του δευτερολέπτου το απελευθερωμένο από το υδρογόνο άζωτο βρίσκεται σε ατομική μορφή και αντιδράει με τα άτομα του σιδήρου και των λοιπών κραματικών στοιχείων, σχηματίζοντας νιτρίδια. Με την αέρια εναζώτωση, η τυπική σύσταση της λευκής ζώνης των νιτρίδιων που διαμορφώνεται, είναι διφασική και αποτελείται από το γ' και ε νιτρίδιο [39].

Πολλές φορές το βάθος ή και η ύπαρξη ακόμα της λευκής ζώνης που σχηματίζουν τα νιτρίδια, δεν είναι επιθυμητή. Για την μείωση ή την εξάλειψη της ζώνης, εφαρμόζεται η τεχνική της διπλής εναζώτωσης με αζωτούχα αέρια (Floer process). Το πρώτο στάδιο μίας διπλής αέριας εναζώτωσης είναι πανομοιότυπο με την απλή ή αλλιώς μονή αέρια εναζώτωση, με μόνη διαφορά στον χρόνο παραμονής, ο οποίος περιορίζεται σε 5 έως 10 ώρες. Στο δεύτερο στάδιο η θερμοκρασία εναζώτωσης είτε ακολουθεί την θερμοκρασία του πρώτου σταδίου είτε αυξάνεται (550°C έως 565°C). Ο χρόνος παραμονής αυξάνεται συγκριτικά με το πρώτο στάδιο, αγγίζοντας ή ξεπερνώντας τον χρόνο παραμονής μίας απλής εναζώτωσης με αζωτούχα αέρια. Ανεξαρτήτως της επιλεγείσας θερμοκρασίας, τα ποσοστά της διαλυμένης αμμωνίας στην ατμόσφαιρα του φούρνου αυξάνονται στο δεύτερο στάδιο, σε 65 με 85% [31].

Εκτός από την διπλή αέρια εναζώτωση, η δομή του λευκού στρώματος μπορεί να ελεγχθεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, μέσα από την ρύθμιση τριών παραγόντων: του χρόνου εναζώτωσης, της θερμοκρασίας και του λόγου δυνατότητας εναζώτωσης K_n (nitriding potential). Θερμοδυναμικά ο παράγοντας K_n εκφράζει τον λόγο των μερικών πιέσεων της αμμωνίας και του υδρογόνου και προσδιορίζεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση [40]:

$$K_n(\text{ή}) r_N = \frac{p_{NH_3}}{p_{H_2}^{3/2}}$$

Το διάγραμμα του Lehrer (Εικόνα 2.20) βασίζεται στον παράγοντα K_n συναρτήσει της θερμοκρασίας και αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιαστή της θερμοχημικής κατεργασίας. Με τη χρήση αυτού του διαγράμματος, αφού επιλεγεί η επιθυμητή θερμοκρασία και ο κατάλληλος χρόνος εναζώτωσης, μπορεί να προσχεδιαστεί με ευκολία και ακρίβεια η δομή της λευκής ζώνης [40].



Εικόνα 2.20: Διάγραμμα φάσεων Lehrer [40, Εικόνα 8, σελ.4].

Στην **υγρή τεχνική**, το τεμάχιο εμβαπτίζεται σε θερμά λουτρά τηγμένων αζωτούχων αλάτων, σε θερμοκρασίες παρόμοιες της προηγούμενης μεθόδου [3]. Σύμφωνα με την Αμερικανική Κοινότητα για τα Μέταλλα (ASM International), το ενδεδειγμένο θερμοκρασιακό εύρος ορίζεται μεταξύ των 510°C και 580°C [31]. Η βάση των αζωτούχων αλάτων που χρησιμοποιούνται είναι μείγματα του νατρίου (Na) και του καλίου (K). Το μείγμα του νατρίου συναντάται σε περιεκτικότητα 60 με 70% κ.β. του συνολικού μείγματος και του καλίου σε 30 με 40% κ.β. του συνολικού μείγματος [39]. Τα στοιχεία που εμπεριέχονται σε ένα τέτοιο μείγμα νατρίου είναι κυρίως, το κυανιούχο νάτριο (NaCN), το ανθρακικό νάτριο (Na₂CO₃) και το κυανικό νάτριο (NaCNO). Αντίστοιχα το μείγμα του καλίου αποτελείται συνήθως από το κυανιούχο κάλιο (KCN), από το ανθρακικό κάλιο (K₂CO₃), από το φουλμινικό ή κυανικό κάλιο (KCNO) και από το χλωριούχο κάλιο (KCl). Γίνεται εμφανές ότι τα κυανιούχα άλατα ή αλλιώς τα κυανίδια, που εμπεριέχουν την μονοσθενή σύνθετη ομάδα CN, διαθέτουν στη δομή τους το άτομο του αζώτου, αλλά και το άτομο του άνθρακα. Η μέθοδος της υγρής εναζώτωσης διαφέρει όμως από την διεργασία της υγρής ενανθρακαζώτωσης (Salt Bath Carbo - Nitriding), διότι το λουτρό αλάτων που χρησιμοποιείται είναι εμπλουτισμένο με περισσότερο άζωτο από ότι άνθρακα και διεκπεραιώνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες [31].

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές εμβάπτισης για την απελευθέρωση του αζώτου και του ατόμου του άνθρακα. Κάθε τεχνική διαθέτει διαφορετικές περιεκτικότητες στις επιμέρους χημικές ενώσεις που αναφέρθηκαν, διαφορετικές

θερμοκρασίες και διαφορετικούς χρόνους παραμονής [31]. Παρόλα αυτά, ο βασικός κορμός μίας τέτοιας διαδικασίας αποτελείται από δύο στάδια. Προηγείται η προθέρμανση (bath ageing) του λουτρού, που μπορεί να διαρκέσει από λίγα λεπτά μέχρι μερικές ώρες, για χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες πλησίον των 500°C (συνήθως στους 400°C) και στη συνέχεια ακολουθεί η βύθιση των μεταλλικών αντικειμένων στο θερμό λουτρό, όπου και παραμένουν για λίγες ώρες. Η θερμοκρασία στο δεύτερο στάδιο υπερβαίνει τους 500°C (θερμοκρασία απελευθέρωσης του αζώτου) και συνήθως κυμαίνεται από 550°C έως 570°C [32, 39].

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εναζώτωση με λουτρά τηγμένων αλάτων, είναι η αύξηση του βάθους διάχυσης και η βελτίωση της ομοιογένειας του στρώματος της εναζώτωσης. Επιπλέον, ο κύριος τύπος νιτριδίων που συναντάται στην λευκή ζώνη είναι το ε-νιτρίδιο ($\epsilon\text{-Fe}_2\text{-4N}$) [35].

Η **εναζώτωση με ακτίνες ιόντων**, αποτελεί την πιο σύγχρονη μέθοδο εμπλουτισμού της μεταλλικής επιφάνειας με άζωτο. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται για τα ακριβή αποτελέσματα που προσφέρει, καθώς παρέχει μία ελεγχόμενη διεργασία, κατά την οποία το βάθος και η δομή του στρώματος εναζώτωσης μπορούν να προσχεδιαστούν. Συγκεκριμένα μπορεί να κατασκευαστεί με μεγάλη ακρίβεια η λευκή ζώνη των νιτριδίων. Μπορεί να είναι διφασική (γ και ϵ), μονοφασική (γ ή ϵ) ή και να μην υπάρχει καθόλου [34]. Με αυτή τη μέθοδο το εναζωτωμένο στρώμα που δημιουργείται μπορεί να σχηματιστεί σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το ενεργειακό κόστος της διεργασίας. Το θερμοκρασιακό εύρος της κατεργασίας μπορεί να κυμανθεί από τους 315°C έως τους 550°C [15]. Η διεργασία λαμβάνει χώρα εντός θαλάμου κενού, με τα αντικείμενα να στερεώνονται σε κατάλληλα διαμορφωμένες στηρίξεις. Η διαφορά με την τεχνική της αέριας εναζώτωσης, είναι ότι ο θάλαμος και το μέσο συγκρατήσεως των τεμαχίων συνδέονται σε παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Ο θάλαμος λειτουργεί ως άνοδος και η στήριξη ως κάθοδος. Αφού τοποθετηθούν τα αντικείμενα εντός του θαλάμου, ο θάλαμος υπό συγκεκριμένη πίεση εκκενώνεται και στη συνέχεια τροφοδοτείται με αζωτούχα αέρια που έχουν ως κύρια βάση τους την αμμωνία ή τροφοδοτείται με άζωτο (N_2), υδρογόνο (H_2) και σε πολύ χαμηλά ποσοστά και με μεθάνιο (CH_4). Ο ρυθμός της ροής των αερίων που εισέρχονται εξαρτάται από το μέγεθος της πίεσης που έχει εφαρμοστεί (συνήθως 1-10 torr). Υπό την επίδραση της διαφοράς δυναμικού (συνήθως 500-1000V) που εφαρμόζεται μεταξύ του εξαρτήματος - ανόδου και του τοιχώματος του φούρνου - καθόδου, τα αζωτούχα αέρια διασπώνται, ιοντίζονται και

επιταχύνονται προς την επιφάνεια του εξαρτήματος. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του αζώτου, λίγο πριν έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια του αρνητικά φορτισμένου τεμαχίου, αποσπών από αυτήν ένα ηλεκτρόνιο, ούτως ώστε να επανέλθουν στην κανονική τους ατομική κατάσταση. Ταυτόχρονα με την απόκτηση του ηλεκτρονίου και την αποφόρτιση του θετικά φορτισμένου ατόμου του αζώτου, εκπέμπεται ένα φωτόνιο, προκαλώντας μία ορατή λάμψη [31].

Η παραγόμενη λάμψη αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό όλων των εναζωτώσεων με ακτίνες ιόντων και ονομάζεται φωτεινή αποφόρτιση (glow discharge). Η ένταση της φωτεινής αποφόρτισης ρυθμίζεται από την εφαρμοζόμενη πίεση, την θερμοκρασία, τη σύνθεση των αζωτούχων αερίων που τροφοδοτούνται στον θάλαμο, την διαφορά του δυναμικού και την ένταση του ρεύματος. Η ρύθμιση της έντασης είναι κρίσιμο στάδιο της τεχνικής, καθώς μία φωτεινή αποφόρτιση μεγάλου πάχους μπορεί να προκαλέσει τοπικές επιφανειακές υπερθερμάνσεις. Η επιλογή της έντασης σχετίζεται άμεσα και με την γεωμετρία του εξαρτήματος. Ένα συνηθισμένο πάχος μίας φωτεινής αποφόρτισης κυμαίνεται στα 6mm, ωστόσο εάν το αντικείμενο διαθέτει μικρές λεπτομέρειες, οπές ή υποδοχές, τότε ενδέχεται να χρειαστεί ελάττωση της φωτεινότητας. Κατά την διάρκεια της λάμψης τα άτομα του σιδήρου και των κραματικών στοιχείων αντιδρούν με τα άτομα του αζώτου, δημιουργώντας τα σκληρά νιτρίδια [31].

Η θερμοκρασία κατεργασίας αυτής της τεχνικής βασίζεται στην μετατροπή της κινητικής ενέργειας των ιόντων του αζώτου, κατά την πρόσκρουσή τους με την επιφάνεια του τεμαχίου, σε θερμότητα. Εξαιτίας όμως της υγρασίας και των πιθανών ακαθαρσιών που μπορεί να υπάρχουν στην επιφάνεια του υλικού, γίνεται αντιληπτό ότι δεν είναι πάντοτε δυνατή η απόκτηση της επιθυμητής θερμοκρασίας, μόνον μέσω αυτής της ενεργειακής μετατροπής. Για το λόγο αυτό συνηθίζεται πλέον, πριν από το στάδιο της φωτεινής αποφόρτισης, να θερμαίνεται ο θάλαμος κενού σε θερμοκρασιακό εύρος από 375°C έως 650°C, με την χρήση εξωτερικών πηγών θερμότητας (όπως είναι οι θερμικές αντιστάσεις) [31].

Τέλος, η ψύξη του πλέον εναζωτωμένου αντικειμένου λαμβάνει χώρα εντός του φούρνου. Πρώτα η παροχή του ρεύματος και του μείγματος των αερίων τερματίζεται και στη συνέχεια το εξάρτημα ψύχεται μέσω της ανακύκλωσης του αέρα από το εσωτερικό του θαλάμου. Για την απόψυξη των θερμών αδρανών αερίων χρησιμοποιείται κατάλληλος εναλλάκτης θερμότητας [31].

2.4 Κράματα σιδήρου - άνθρακα

Οι χάλυβες αποτελούν κράματα σιδήρου - άνθρακα (Fe-C), με περιεκτικότητα από 0,008% έως 2 % κ.β. C. Οι περιεκτικότητες χαμηλότερες του 0,008% κ.β. C, αντιστοιχούν στον καθαρό σίδηρο, ενώ για περιεκτικότητες πάνω από το 2% μέχρι 6,67% κ.β. C, το κράμα σιδήρου - άνθρακα χαρακτηρίζεται ως χυτοσίδηρος. Θεωρητικά μπορεί οι χάλυβες να φθάνουν έως το 2% κ.β. C, στην πράξη όμως για την πλειονότητα των εμπορικών κατηγοριών των χαλύβων, η περιεκτικότητά τους δεν ξεπερνάει το 1% κ.β. C. Σε ειδικές εφαρμογές, ωστόσο, η περιεκτικότητά του άνθρακα μπορεί να ξεπεράσει το 1% και να αγγίξει το 2% [11].

Σύμφωνα με το EuroNorm Standard CEN EN 10020, ως χάλυβας ορίζεται «το υλικό το οποίο περιέχει κατά βάρος περισσότερο σίδηρο από οποιοδήποτε άλλο απλό χημικό στοιχείο, έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα γενικά μικρότερη του 2% και περιέχει και άλλα χημικά στοιχεία. Περιορισμένος αριθμός χρωμιούχων χαλύβων μπορεί να περιέχει περισσότερο από 2% άνθρακα, αλλά το 2% είναι η συνήθης γραμμή διαχωρισμού μεταξύ χαλύβων και χυτοσιδήρων» [20].

2.4.1 Ο Ρόλος των κραματικών στοιχείων

Μπορεί κάποτε το κράμα του σιδήρου - άνθρακα να ήταν κάτι παραπάνω από ικανοποιητικό, όμως η εξέλιξη έφερε καινούργιες προκλήσεις. Οι νέες απαιτήσεις δεν μπορούσαν πλέον να καλυφθούν από τις ιδιότητες του χάλυβα ή τις ιδιότητες των υπολοίπων μεμονωμένων μεταλλικών στοιχείων. Παρατηρήθηκε όμως, ότι ένας από τους βασικούς κανόνες της φύσης, ότι δηλαδή το πλήθος είναι ισχυρότερο της μονάδας, ισχύει και στα μέταλλα. Μέσω του εμπλουτισμού της χημικής σύστασης του χάλυβα, προκύπτουν πλήθος θετικών επιδράσεων, όπως είναι οι παρακάτω [11]:

- Η αποξείδωση του χάλυβα κατά το στάδιο της χαλυβοποίησης.
- Η δημιουργία καρβιδίων ή νιτρίδιων.
- Η ρύθμιση του μεγέθους και της ανάπτυξης των κόκκων.
- Η σταθεροποίηση του πλέγματος του οστενίτη ή του φερρίτη, σε χαμηλότερες ή υψηλότερες αντίστοιχα θερμοκρασίες.
- Η σκλήρυνση του χάλυβα μέσα από τις διάφορες θερμικές κατεργασίες.
- Η βελτίωση της ανθεκτικότητας του χάλυβα στις καιρικές συνθήκες.
- Η βελτίωση των διαφόρων μηχανικών του ιδιοτήτων.
- Η βελτίωση της κατεργασιμότητας.

Η σκόπιμη προσθήκη ξένων στοιχείων στον χάλυβα, αντιστοιχεί στις σημειακές δομικές ατέλειες των μετάλλων, όπου λειτουργούν ευεργετικά ως προς την εξέλιξη των ιδιοτήτων του. Ωστόσο, κυρίως κατά την παραγωγή του χάλυβα, σχεδόν πάντοτε, παρατηρούνται και σημειακές ατέλειες από ανεπιθύμητα στοιχεία, τα όποια σε μη επιτρεπτές ποσότητες αποδίδουν καταστροφικές συνέπειες στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Οι προσθήκες στον χάλυβα διακρίνονται σε κύριες και δευτερεύουσες. Στα βασικά στοιχεία κραμάτωσης ανήκουν, ο άνθρακας, το νικέλιο, το μαγγάνιο, το χρώμιο, το πυρίτιο και το μολυβδαίνιο. Στις δευτερεύουσες προσμίξεις ανήκουν, το βανάδιο, το βολφράμιο, το κοβάλτιο, ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο μόλυβδος, το τιτάνιο, το βόριο, το νιόβιο, το ζirkόνιο, ο φώσφορος και το θείο [25]. Είναι πολύ σημαντικό κάθε μηχανικός στο στάδιο της σχεδίασης και της μελέτης να είναι σε θέση να γνωρίζει και να αντιλαμβάνεται την συνεισφορά της κάθε προσθήκης στις ιδιότητες του υλικού που πρόκειται να επιλέξει [20].

Αναλυτικά, τα κύρια στοιχεία προσθήκης που συναντώνται στα κράματα του χάλυβα είναι:

Άνθρακας (C): Αποτελεί το κυρίαρχο συστατικό κραμάτωσης που συναντάται στον χάλυβα. Το στοιχείο αυτό έχει την τάση να καταλαμβάνει τις θέσεις των τετραεδρικών κενών, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο στα υπόλοιπα στοιχεία προσθήκης, με μεγαλύτερη ατομική διάμετρο, να καταλαμβάνουν τις υπόλοιπες μεγαλύτερες κενές θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος (π.χ. των οκταεδρικών κενών) [41]. Ο άνθρακας κατέχει σημαντική θέση στη διαμόρφωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα. Με την προσθήκη του αυξάνεται η αντοχή, η σκληρότητα και η ικανότητα του υλικού για περαιτέρω σκλήρυνση με την κατεργασία της βαφής. Ενώ, παράλληλα ελαττώνεται η συγκολλησιμότητα και η ολκιμότητα του χάλυβα [20].

Νικέλιο (Ni): Το βασικό χαρακτηριστικό που προσδίδει το στοιχείο του νικελίου σε ένα κράμα, είναι η βελτίωση της αντοχής του στη διάβρωση, καθιστώντας το έτσι ένα από τα βασικά στοιχεία κραμάτωσης των ανοξειδωτων χαλύβων. Οι κοινοί νικελιούχοι χάλυβες διαθέτουν συνήθως περιεκτικότητα σε άνθρακα χαμηλότερη του 0,6% και περιεκτικότητα σε νικέλιο περίπου 3 με 4% [25]. Δεν χρησιμοποιείται σε χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, διότι διευκολύνει την διάσπαση του σεμεντίτη. Το νικέλιο συμβάλει στην αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής του χάλυβα, χωρίς όμως να ελαττώνει την

πλαστικότητα και την δυσθραυστότητα του υλικού [25]. Διευρύνει την περιοχή σταθεροποίησης του ωστενίτη, αυξάνει την εμβαιπτότητα, αυξάνει την αντοχή σε επαναφορά, παρεμποδίζει την ανακρυστάλλωση και μειώνει σοβαρά την διαστολή. Σε υψηλά ποσοστά νικελίου, μεγαλύτερα του 20% ο ωστενίτης σταθεροποιείται σε θερμοκρασία δωματίου [11]. Ενώ για ποσοστά περίπου στο 35% ο συντελεστής διαστολής μηδενίζεται, χρίζοντας τους χάλυβες αυτούς ως ιδανικούς για την κατασκευή ηλεκτρονικών μερών (π.χ. αντιστάσεις) και την κατασκευή οργάνων μέτρησης. Το γεγονός ότι δεν αποτελεί καρβιδιογόνο στοιχείο και ότι συντελεί στην σταθεροποίηση της γ -φάσης του ωστενίτη, καθιστά την κατηγορία των νικελιούχων χαλύβων στους κατάλληλους χάλυβες για ενανθράκωση. Αυτό συμβαίνει διότι συνεισφέρει στην δημιουργία μίας σκληρής μικροκρυσταλλικής επιφάνειας και αποδίδει ικανοποιητικό βάθος βαφής [25]. Η τάση του στοιχείου να μην δημιουργεί καρβίδια του νικελίου συμβάλει στην χρησιμοποίηση του στοιχείου σε χάλυβες που υπόκεινται σκλήρυνση μέσω της εναζώτωσης. Αυτό οφείλεται στο ότι σε υψηλές θερμοκρασίες και υπό την επίδραση του αζώτου, σχηματίζονται νιτρίδια του νικελίου.

Μαγγάνιο (Mn): Η προσθήκη του μαγγανίου αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό (όριο θραύσεως) και την συνεκτικότητα του υλικού. Διευρύνει την περιοχή σταθεροποίησης του ωστενίτη και σε ποσοστά μεγαλύτερα του 10% η περιοχή του ωστενίτη σταθεροποιείται σε θερμοκρασία δωματίου. Ανήκει στα καρβιδιογόνα στοιχεία [11]. Χρησιμοποιείται σε όλους τους χάλυβες, σε ποσοστά υψηλότερα του 0.2%, με σκοπό την αποθείωση μέσω του σχηματισμού των σουφλιδίων MnS. Τα σουφλίδια λειτουργούν ευεργετικά ως προς την κατεργασιμότητα και την συγκολλησιμότητα του χάλυβα [3]. Συγκριτικά με το νικέλιο προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας, μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά, μεγάλη μείωση των σημείων M_f και M_s και σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον με υγρασία μειώνεται η αντοχή του στη διάβρωση [11].

Χρώμιο (Cr): Το χρώμιο ανήκει στα ισχυρά καρβιδιογόνα στοιχεία και μετά τον άνθρακα αποτελεί το πιο διαδεδομένο στοιχείο κραμάτωσης [20]. Το στοιχείο αυτό χαρακτηρίζεται, για τα υψηλά επίπεδα αντοχής του σε εφελκυσμό, για την ιδιαίτερη σκληρότητά του, για την αύξηση της εμβαιπτότητας, για την υψηλή αντοχή του σε φθορά λόγω τριβής, για την μεγάλη αντοχή σε κρούση και για την υψηλή αντοχή του στη διάβρωση. Μαζί με το νικέλιο αποτελεί ένα από τα κύρια κραματικά στοιχεία των ανοξειδωτων χαλύβων [3]. Το χρώμιο είναι από τα στοιχεία που

αυξάνουν τις θερμοκρασίες μετασχηματισμού και διευρύνουν την περιοχή σταθερότητας της α-φάσης του φερρίτη [11]. Σε ποσοστά χαμηλότερα του 7% προκύπτουν χάλυβες φερριτικής - περλιτικής δομής [25]. Το χρώμιο σε υψηλές περιεκτικότητες δρα ανασταλτικά στον επιφανειακό εμπλουτισμό με άζωτο ενός υλικού με την μέθοδο της εναζώτωσης. Αυτό οφείλεται στο παθητικό στρώμα των οξειδίων του χρωμίου που σχηματίζονται στην επιφάνεια του υλικού. Για το λόγο αυτό όταν πρόκειται να εναζωτωθεί ένας ισχυρά χρωμιούχος χάλυβας υποβάλλεται σε διάφορες προ-κατεργασίες απενεργοποίησης του παθητικού αυτού στρώματος [42].

Πυρίτιο (Si): Το πυρίτιο δεν δίνει καρβίδια, διευκολύνει την διάσπαση του σεμεντίτη, αυξάνει τις θερμοκρασίες μετασχηματισμού, διευρύνοντας την περιοχή σταθερότητας του φερρίτη, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες, την εμβαπτότητα, τη σκληρότητα και την αντοχή του υλικού στη διάβρωση [11, 25]. Έχει παρατηρηθεί ότι, η προσθήκη του πυριτίου στους χαμηλά ανθρακούχους χάλυβες δρα καταστροφικά στις ιδιότητες επιφάνειας [20]. Από εκεί και πέρα η προσθήκη του δίνει φερριτικούς χάλυβες, μεγάλου μεγέθους κόκκων, οι οποίοι είναι ιδανικοί για ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές [11]. Οι χάλυβες με πυρίτιο παρουσιάζουν μικρή συνεκτικότητα σε φαινόμενα κρούσης, χαμηλή συγκολλησιμότητα και μειωμένη κατεργασιμότητα [18].

Μολυβδαίνιο (Mo): Το μολυβδαίνιο συναντάται, σε περιεκτικότητες από 0,15 έως 0,3% στους κραματωμένους χάλυβες, σε ποσοστά από 0,1 έως 1% στους κατασκευαστικούς χάλυβες και σε ποσοστά μεγαλύτερα του 1% στους ανοξειδωτους χάλυβες και χάλυβες κατασκευής εργαλείων [20, 25]. Αποτελεί πολύτιμη προσθήκη για τα σκληρά εργαλεία, εξαιτίας της μεγάλης αντοχής του στην κοπή. Το στοιχείο του μολυβδαινίου δεν χρησιμοποιείται ποτέ μόνο του, συνηθίζεται δε να προστίθεται μαζί τα κραματικά στοιχεία του νικελίου και του χρωμίου [25]. Προκαλεί αύξηση των θερμοκρασιακών μετασχηματισμών, διευρύνει την περιοχή σταθερότητας του φερρίτη και αυξάνει την σκληρότητα μέσω του σχηματισμού καρβιδίων με τον άνθρακα. Βελτιώνει την εμβαπτότητα, αυξάνει την αντοχή σε επαναφορά και επιβραδύνει την γήρανση [11]. Ενισχύει την αντοχή σε διάβρωση και σε φθορά, επιμηκύνει το όριο θραύσης χωρίς να μειώνει την δυσθραυστότητα και αυξάνει την αντοχή του χάλυβα στην κόπωση [11, 25].

Αντιστοίχως, τα δευτερεύοντα στοιχεία προσθήκης που χρησιμοποιούνται ευρέως στα κράματα του χάλυβα είναι:

Βανάδιο (V): Προστίθεται σε χαμηλές ποσότητες από 0,15 έως 0,25% και συνηθίζεται να χρησιμοποιείται στους ταχυχάλυβες ως εκλεπτυντικό των κόκκων [25]. Αποτελεί ιδιαίτερα ισχυρό καρβιδιογόνο στοιχείο υψηλής σκληρότητας, διαλύεται εύκολα στον ωστενίτη και περιορίζει σημαντικά την διαστολή του υλικού. Προκαλεί αύξηση των θερμοκρασιακών μετασχηματισμών των φάσεων, διευρύνοντας την περιοχή σταθερότητας του φερρίτη. Υποβοηθά στο μέγιστο την διατήρηση της σκληρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και μετά από δευτερογενή σκλήρυνση. Βελτιώνει σοβαρά την εμβαιπτότητα, την αντοχή σε επαναφορά και την αντοχή στην μηχανική φθορά [11].

Βολφράμιο (W): Ανήκει στα ισχυρά καρβιδιογόνα στοιχεία (λιγότερο από το βανάδιο) και αυξάνει τον θερμοκρασιακό μετασχηματισμό των φάσεων, διευρύνοντας έτσι την περιοχή σταθερότητας του φερρίτη. Μέσα από τον σχηματισμό καρβιδίων με το στοιχείο του άνθρακα αυξάνεται η σκληρότητα, η μηχανική φθορά και η δυσθραυστότητα του χάλυβα. Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας, της αντοχής σε επαναφορά, της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες και διατηρεί την σκληρότητα του από δευτερογενή σκλήρυνση [11, 18]. Το βολφράμιο δεν χρησιμοποιείται μόνο του, αλλά πάντα σε συνδυασμό με κάποιο από τα κραματικά στοιχεία του νικελίου, του χρωμίου και μολυβδαινίου [25]. Εξαιτίας των ιδιοτήτων του και της μεγάλης αντοχής του στην κοπή, εφαρμόζεται κυρίως στους ταχυχάλυβες [11].

Κοβάλτιο (Co): Ανήκει στην οικογένεια των στοιχείων που διευρύνουν την περιοχή σταθεροποίησης του ωστενίτη [11]. Δεν σχηματίζει καρβίδια, μειώνει την εμβαιπτότητα και έχει μικρή επίδραση στην αύξηση της σκληρότητας. Ο βασικός σκοπός της προσθήκης του, είναι η παρεμπόδιση της αποκατάστασης των αταξιών και της ανάπτυξης των κόκκων κατά το στάδιο της ανόπτησης ή της επαναφοράς του χάλυβα [3]. Συμβάλει έτσι στην διατήρηση της μηχανικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα της αντοχής σε κοπή. Επιπλέον, αυξάνει αισθητά την θερμική και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του χάλυβα [25]. Για τους λόγους αυτούς εφαρμόζεται στους ταχυχάλυβες, στην κατασκευή διαμορφωτικών εργαλείων και στους πυρίμαχους χάλυβες [3].

Χαλκός (Cu): Ο χαλκός σε περιεκτικότητες από 0,3 έως 1,4% χρησιμοποιείται για την αύξηση της εμβαιπτότητας και την σκλήρυνση του φερρίτη [25]. Σε ποσοστά

μεγαλύτερα του 0,2% βελτιώνει την αντοχή του χάλυβα στην ατμοσφαιρική διάβρωση [20]. Για περιεκτικότητες όμως μεγαλύτερες από 0,3% επηρεάζεται η διαμόρφωση εν θερμώ, δημιουργώντας ρωγματώσεις στην επιφάνεια του υλικού. Για την αποφυγή αυτού του καταστροφικού φαινομένου προστίθεται νικέλιο, περίπου κατά το 1/3 της ποσότητας του χαλκού [25].

Αλουμίνιο (Al): Το αλουμίνιο ανήκει στα στοιχεία που ρυθμίζουν το μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη, μέσα από την αύξηση των θερμοκρασιακών μετασχηματισμών των φάσεων, διευρύνοντας την περιοχή σταθερότητας του φερρίτη [11]. Δεν σχηματίζει καρβίδια με το στοιχείο του άνθρακα, αλλά σχηματίζει την προφυλακτική στρώση των οξειδίων Al_2O_3 , προσφέροντας έτσι αντοχή έναντι της οξείδωσης [25]. Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαπτότητας, εμποδίζει την μεγέθυνση των κόκκων και συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ως αποξειδωτικό μέσο κατά την ώρα του τετηγμένου χάλυβα [25]. Κατά την θερμοχημική κατεργασία της εναζώτωσης, η αλληλεπίδραση του αλουμινίου με το στοιχείο του αζώτου, σε θερμοκρασίες πλησίον των $500^\circ C$, οδηγεί στην δημιουργία νιτριδίων του αργιλίου. Το στοιχείο του αλουμινίου είναι το μόνο που τίθεται εξολοκλήρου στον σχηματισμό νιτριδίων. Τα νιτρίδια που δημιουργούνται αποτελούν τα πιο σκληρά μεταξύ των υπολοίπων σχηματιζόμενων νιτριδίων.

Μόλυβδος (Pb): Ο μόλυβδος προστίθεται στους χάλυβες σε περιεκτικότητα από 0,15 έως 0,35%. Ο σκοπός της χρησιμοποίησης του είναι η βελτίωση της μηχανουργικής συμπεριφοράς του χάλυβα [20].

Τιτάνιο (Ti): Ανήκει στα πολύ ισχυρά καρβιδιογόνα στοιχεία (περισσότερο από το βανάδιο), διαθέτει υψηλές αποξειδωτικές ιδιότητες, αυξάνει τον θερμοκρασιακό μετασχηματισμό των φάσεων και διευρύνει την περιοχή σταθερότητας του φερρίτη [11, 20]. Προκαλεί αύξηση της εμβαπτότητας και μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά [11]. Το τιτάνιο έχει την τάση να σταθεροποιεί το διαλυμένο άζωτο υπό την μορφή νιτριδίων και τον άνθρακα υπό την μορφή καρβιδίων, αποφεύγοντας έτσι το φαινόμενο της σκλήρυνσης εκ της κατακρημνίσεως δια γηράνσεως [25].

Βόριο (B): Το βόριο χρησιμοποιείται μόνο για την βελτίωση της εμβαπτότητας. Δεν βελτιώνει ούτε μειώνει κάποια χρήσιμη ιδιότητα του χάλυβα [25]. Αποτελεί βασική προσθήκη στους πλήρως αφησυχασμένους χάλυβες (χάλυβες killed) [20].

Νιόβιο (Nb): Ανήκει στα ισχυρά καρβιδιογόνα στοιχεία. Ο σχηματισμός των καρβιδίων του νιοβίου με τον άνθρακα συντελεί στην αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής του υλικού. Μέσω της προσθήκης του επιτυγχάνεται ο έλεγχος του μεγέθους των κόκκων κατά το στάδιο της ελεγχόμενης διέλασης και κατά την αύξηση της θερμοκρασίας [3, 20]. Αποτελεί βασικό συστατικό στην παραγωγή των χαλύβων μικροκραματοποίησης (HSLA) και τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται στους εργαλειοχάλυβες [3].

Ζιρκόνιο (Zr): Το ζιρκόνιο αποτελεί βασικό στοιχείο προσθήκης, κυρίως για τους αφησυχασμένους χάλυβες HSLA, καθώς συμβάλει στην βελτίωση των χαρακτηριστικών των εγκλεισμάτων σουλφιδίων [20].

Φώσφορος (P): Το στοιχείο του φωσφόρου συμβάλει στην αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό, της αντίστασης στη διάβρωση και της σκληρότητας. Με την αύξηση όμως της περιεκτικότητας του, μειώνεται η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα, η συνεκτικότητα σε φαινόμενα κρούσης και η συγκολλησιμότητα του χάλυβα. Χρησιμοποιείται σε υψηλές ποσότητες, στην κατηγορία των χαμηλά κραματομένων χαλύβων υψηλής κατεργασιμότητας [3].

Θείο (S): Η προσθήκη του θείου οδηγεί στην υποβάθμιση της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας και της αντοχής σε κρούση. Με την αύξηση της περιεκτικότητας του, ελαττώνεται η συγκολλησιμότητα και η διαμορφωσιμότητα εν θερμό του χάλυβα. Η παρουσία του πάνω από τα επιτρεπτά όρια (πάνω από 0,05%) αυξάνει την τάση ρωγμάτωσης κατά την βαφή των χαλύβων. Συνήθως χρησιμοποιείται για την βελτίωση της κατεργασιμότητας [3].

Τα περισσότερα από τα παραπάνω στοιχεία προσθήκης μπορούν να διακριθούν σε πέντε κατηγορίες, με βάση την επίδραση τους στην επιμήκυνση των διαφόρων φάσεων σταθεροποίησης. Οι ομάδες αυτές είναι: τα γαμμαφερογόνα στοιχεία, τα αλφαφερογόνα στοιχεία, τα καρβιδιογόνα στοιχεία, τα γραφιτιζόντα στοιχεία και τα στοιχεία μεταβολής του ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού [11].

Στα γαμμαφερογόνα στοιχεία, ανήκουν τα στοιχεία του νικελίου, του μαγγανίου και του κοβαλτίου. Τα στοιχεία αυτά διευρύνουν την περιοχή σταθεροποίησης της γ -φάσης του οστενίτη, μειώνοντας τις θερμοκρασίες μετασχηματισμού [11].

Στα αλφαφερογόνα στοιχεία, ανήκουν τα στοιχεία του χρωμίου, του μολυβδαινίου, του πυριτίου, του βαναδίου, του βολφραμίου, του αλουμινίου, του τιτανίου και του νιοβίου. Τα στοιχεία αυτά αυξάνουν τις θερμοκρασίες

μετασχηματισμού, συρρικνώνουν την περιοχή ωστενιτοποίησης και διευρύνουν την περιοχή σταθεροποίησης της α-φάσης του φερρίτη [11].

Στα καρβιδιογόνα στοιχεία, ανήκουν τα στοιχεία του χρωμίου, του μαγγανίου, του μολυβδαινίου, του βαναδίου, του βολφραμίου, του νιοβίου και του τιτανίου. Τα στοιχεία αυτά έχουν την τάση σχηματισμού καρβιδίων με το στοιχείο του άνθρακα [11].

Στα γραφιτίζοντα στοιχεία, ανήκουν τα στοιχεία του νικελίου, του πυριτίου και του αλουμινίου. Τα στοιχεία αυτά υποβοηθούν την διάσπαση του σεμεντίτη και παρεμποδίζουν τον σχηματισμό των καρβιδίων [11].

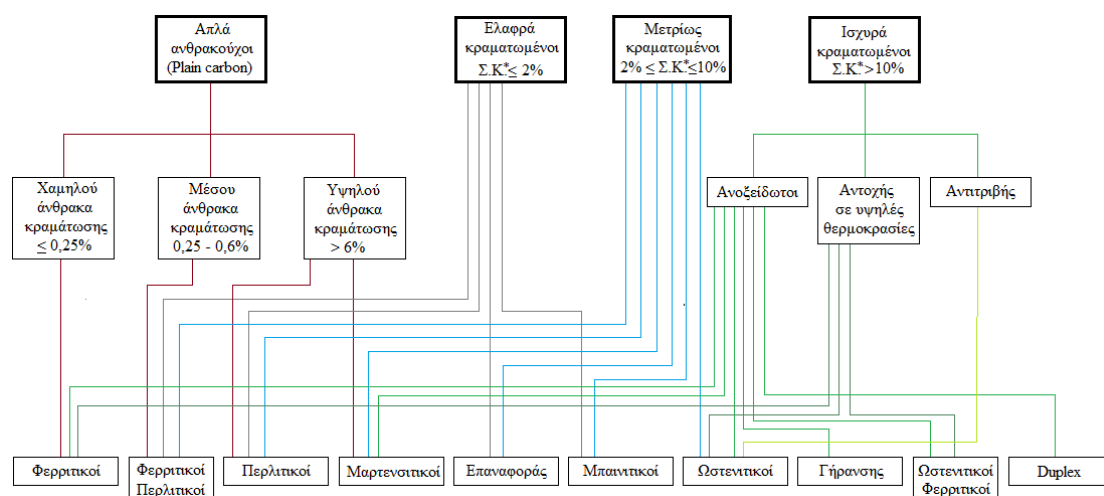
Στα στοιχεία μεταβολής του ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού, ανήκουν τα στοιχεία του νικελίου, του χρωμίου, του μαγγανίου, του πυριτίου, του μολύβδου, του βολφραμίου, του τιτανίου κ.α. Η προσθήκη και η συγκέντρωση αυτών των στοιχείων επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στην θερμοκρασία και στη σύσταση του ευτηκτοειδούς σημείου του χάλυβα [11].

2.4.2 Κατηγοριοποίηση χαλύβων

Περίπου το 90% της παραγωγής του χάλυβα αντιστοιχεί στους απλούς ανθρακούχους χάλυβες, με το υπόλοιπο ποσοστό να καταλαμβάνεται από τις διάφορες κατηγορίες των κραματωμένων χαλύβων [11]. Η οικογένεια των χαλύβων είναι ιδιαίτερα εκτενής, πολυσύνθετη και αποτελεί βασικό συστατικό για τις περισσότερες μεταλλικές κατασκευές. Η ανάγκη για γρήγορη, εύκολη και πάνω από όλα με ακρίβεια επικοινωνία μεταξύ του κλάδου της παραγωγής (παραγωγός - προμηθευτής) και της εφαρμογής (πελάτης) κρίνεται κρίσιμη. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν δύο βασικά συστήματα κατάταξης των εμπορικών οικογενειών των χαλύβων [20].

Το πρώτο σύστημα κατάταξης χαλύβων είναι οι θεμελιώδεις περιγραφές ποιότητας (fundamental quality descriptors). Αυτοί οι όροι ποιότητας αναφέρονται σε συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά και αποτελούν ένα εύκολο κριτήριο καταλληλότητας των υλικών, ανάλογα με τον τύπο της επεξεργασίας ή της εφαρμογής στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Ορισμένα παραδείγματα ποιοτικών περιγραφών που συναντώνται είναι η ποιότητα κοίλανσης, η ποιότητα κατασκευών, η ποιότητα ψυχρής ή θερμής κατεργασιμότητας, η ποιότητα ειδικής εμβαιπτότητας και η εμπορική ποιότητα [20].

Ο δεύτερος τρόπος κατηγοριοποίησης βασίζεται στην χημική σύσταση και στην μικροδομή του χάλυβα. Η αναφορά στη χημική σύσταση σχετίζεται με την περιεκτικότητα σε άνθρακα (απλή ανθρακούχοι, χαμηλού, μεσαίου και υψηλού άνθρακα) και με την περιεκτικότητα των στοιχείων κραματοποίησης (ελαφρά, μέτρια και ισχυρά κραματομένοι). Η αναφορά στη μικροδομή προσδιορίζει το είδος της κρυσταλλικής δομής που διαθέτει ο χάλυβας (φερριτικοί, ωστενιτικοί, μπαινιτικοί κλπ.). Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται με μεγάλη λεπτομέρεια η κατηγοριοποίηση της οικογένειας των χαλύβων, υπό την αντιστοιχία της χημικής σύστασης με την μικροδομή (Εικόνα 2.21) [20].



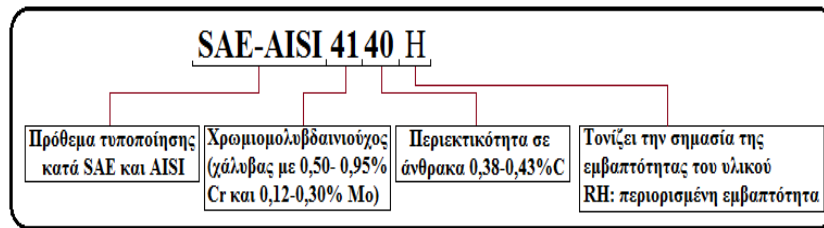
Εικόνα 2.21: Κατηγοριοποίηση των χαλύβων με βάση την χημική σύσταση και την μικροδομή τους [20, εμπνευσμένο από Πίνακας 6.5, σελ.276].

Οι δύο κατηγορίες κατάταξης των χαλύβων που αναφέρθηκαν, συνδυάζονται κατάλληλα μεταξύ τους και τυποποιούνται σε ομάδες. Οι ομάδες αυτές αποτελούν ενοποιημένα συστήματα προσδιορισμού των χαλύβων. Κάθε χώρα διαθέτει τους δικούς της οργανισμούς τυποποίησης (Standards Organizations - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.1). Οι περισσότεροι από τους εγχώριους οργανισμούς αποτελούν μέλη ευρύτερων διεθνών κοινοτήτων τυποποίησης, όπως είναι η ευρωπαϊκή επιτροπή (CEN) και η διεθνής κοινότητα (ISO). Με αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η επικοινωνία, η εξέλιξη και η ανταλλαγή των γνώσεων μεταξύ των βιομηχανιών της κάθε χώρας. Μάλιστα, πολλοί εγχώριοι οργανισμοί δεν συντάσσουν δικά τους πρότυπα, αλλά αξιοποιούν τα πρότυπα των διεθνών οργανισμών στους οποίους είναι μέλη, μεταφράζοντάς τα στην μητρική τους γλώσσα. Μερικά από τα ευρέως πιο διαδεδομένα πρότυπα ονοματολογίας για τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται, προέρχονται από το αμερικάνικο σύστημα SAE, το αγγλικό σύστημα BSI, το γαλλικό σύστημα AFNOR, το γερμανικό σύστημα DIN και της ευρωπαϊκής επιτροπής τυποποίησης CEN. Οι

κωδικές ονομασίες που χρησιμοποιούν τα συστήματα είναι ένας συνδυασμός αριθμών και λατινικών γραμμάτων. Με τους αριθμούς συχνά προσδιορίζεται οι οικογένεια του χάλυβα (π.χ. χρωμιούχος), η περιεκτικότητα του σε άνθρακα (π.χ. 30% κ.β C), η περιεκτικότητα των κύριων συστατικών πρόσμιξης (π.χ. 1,82%Ni, 0,80%Cr και 0,25%Mo) και διάφορες άλλες ιδιότητες του υλικού (π.χ. 37kg/mm² αντοχή σε εφελκυσμό). Οι λατινικοί χαρακτήρες συνήθως χρησιμοποιούνται ως δηλωτικά προθέματα του είδους του χάλυβα (π.χ. λεπτόκοκκος χάλυβας κατασκευών κατάλληλος για συγκολλήσεις), της μεταλλουργικής κατεργασίας με την οποία έχει παραχθεί ο χάλυβας (π.χ. χάλυβας παραχθείς σε ηλεκτρική κάμινο), της κατεργασίας στην οποία προσφέρεται να επεξεργαστεί (π.χ. προσφέρεται για σκλήρυνση μέσω βαφής) και πλήθος άλλων χαρακτηριστικών (π.χ. είδος επίστρωσης κ.α.).

2.4.2.1 Ονοματολογία χαλύβων κατά SAE - AISI

Το αμερικανικό σύστημα τυποποίησης έχει υιοθετήσει έναν τετραψήφιο αριθμό κωδικοποίησης (x₁x₂x₃x₄) για την ονοματολογία των χαλύβων (Εικόνα 2.22). Το πρώτο ψηφίο του αριθμού (x₁) υποδηλώνει την κύρια οικογένεια του κράματος στην οποία ανήκει, με βάση την περιεκτικότητα του βασικού στοιχείου προσθήκης (Πίνακας 2.2). Ο συνδυασμός του πρώτου με το δεύτερο ψηφίο (x₁x₂) αντιπροσωπεύει την οικογένεια του κράματος συνυπολογίζοντας την περιεκτικότητα και των υπολοίπων κραματικών στοιχείων, όταν αυτή φθάσει ή ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο ποσοστό (Πίνακας 2.3). Τα δύο τελευταία ψηφία αναφέρονται στην περιεκτικότητα επί τοις εκατό% του άνθρακα. Πολλές φορές, μπροστά από τον τετραψήφιο κωδικό εισάγεται ένας λατινικός χαρακτήρας, ως δηλωτικό πρόθεμα της μεταλλουργικής κατεργασίας στην οποία είχε υποβληθεί ο χάλυβας κατά το στάδιο της παραγωγής του (Πίνακας 2.4) [11]. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται ως πρόθεμα το γράμμα M, δεν εκφράζεται η μέθοδος παραγωγής του χάλυβα, αλλά η εμπορική ποιότητα για τους χάλυβες θερμής έλασης. Εκατέρωθεν των δύο πρώτων και των δύο τελευταίων ψηφίων, συχνά προστίθενται ο λατινικός χαρακτήρας B, για να εκφράσει την πρόσθετη προσθήκη βορίου και ο χαρακτήρας L, για να δηλώσει την πρόσθετη προσθήκη μολύβδου (Πίνακας 2.5). Στους κραματωμένους χάλυβες συχνά χρησιμοποιείται ως κατάληξη ο χαρακτήρας H (Hardenability) ή RH (Restricted Hardenability) για να δηλώσει την ικανότητα της εμβαπτότητας του υλικού. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι από το 1995 η ονομασία SAE-AISI έχει αντικατασταθεί από σκέτο SAE. Παρόλα αυτά η παλαιά ονομασία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα [43].



Εικόνα 2.22: Παράδειγμα τυποποίησης ενός χαμηλά κραματομένου χάλυβα, κατά SAE - AISI.

Πίνακας 2.2: Ονοματολογία των κύριων οικογενειών των χάλυβων, με βάση το πρώτο ψηφίο (x_1), κατά SAE - AISI [11, Πίνακας 15.1, σελ.513].

Κύρια Σειρά	Οικογένεια Κράματος (με βάση το κύριο συστατικό πρόσμιξης)
1000	Κοινός ανθρακούχος (C)
2000	Νικελιούχος (Ni)
3000	Νικελιοχρωμιούχος (Ni και Cr)
4000	Μολυβδαινιούχος (Mo και V)
5000	Χρωμιούχος (Cr)
6000	Χρωμοβαναδιούχος (Cr και V)
7000	Βολφραμίου-Χρωμίου (W και Cr)
8000	Νικελίου-Χρωμίου-Μολυβδαινίου (Ni, Cr και Mo)
9000	Μαγγανιοπυριτιούχος (Mn και Si)

Πίνακας 2.3: Παραδείγματα ονοματολογίας των κύριων οικογενειών των χάλυβων, με βάση τα δύο πρώτα ψηφία (x_1x_2), κατά SAE - AISI [11, Πίνακας 15.1, σελ.513].

Κύρια Σειρά	Ψηφία x_1x_2	Οικογένεια Κράματος (συνυπολογίζοντας και τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία) - Παραδείγματα
1000	13 x_3x_4	Μαγγανιούχος (κοινός χάλυβας με 1,75%Mn)
4000	41 x_3x_4	Χρωμιομολυβδαινιούχος (χάλυβας με 0,50-0,95% Cr και 0,12-0,30% Mo)
	43 x_3x_4	Νικελίου-Χρωμίου-Μολυβδαινίου (χάλυβας με 1,85% Ni, 0,50-0,80% Cr και 0,25% Mo)
	46 x_3x_4	Νικελιομολυβδαινιούχος (χάλυβας με 0,85-1,82% Ni και 0,20-0,25% Mo)
9000	93 x_3x_4	Νικελίου-Χρωμίου-Μολυβδαινίου (χάλυβας με 3,25% Ni, 1,20% Cr και 0,12% Mo)

Πίνακας 2.4: Δηλωτικά προθέματα κατεργασίας, κατά SAE - AISI [11, Πίνακας 15.2, σελ.514].

Πρόθεμα	Μεταλλουργική Μέθοδος Παραγωγής
A	Κραματομένος χάλυβας παραχθείς σε κάμινο όξινης επένδυσης
B	Κοινός χάλυβας παραχθείς σε κάμινο Bessemer
C	Κοινός χάλυβας παραχθείς σε κάμινο ανοιχτής εστίας με βασική επένδυση
D	Κοινός χάλυβας παραχθείς σε κάμινο ανοιχτής εστίας με όξινη επένδυση
E	Χάλυβας παραχθείς σε ηλεκτρική κάμινο
X	Χάλυβας με ειδική σύσταση εκτός προδιαγραφών

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης & Δημήτρης Ι. Παντελής), ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ, Δεκέμβριος 2008

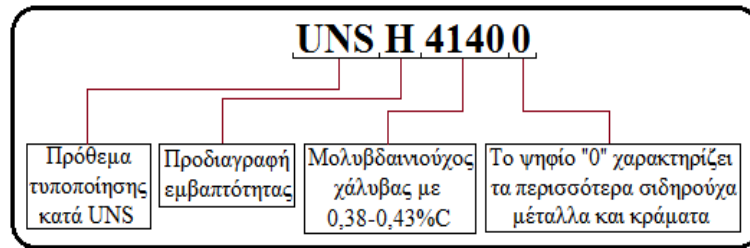
Πίνακας 2.5: Ερμηνεία ενδιάμεσων λατινικών χαρακτήρων, κατά SAE-AISI [43].

Ενδιάμεσος Λατινικός Χαρακτήρας	Ερμηνεία προσθήκης
B	Προσθήκη βορίου σε ποσοστό από 0,0005 έως 0,003%, για την ενίσχυση της εμβαιότητας.(π.χ. 94Bxx)
L	Προσθήκη μολύβδου σε ποσοστό από 0,15 έως 0,35%, για την ενίσχυση της κατεργασιμότητας.

2.4.2.2 Ονοματολογία χαλύβων κατά UNS

Το αμερικάνικο σύστημα τυποποίησης UNS αντιπροσωπεύει μόνο την χημική σύνθεση ενός μεμονωμένου μετάλλου ή κράματος, δεν αποτελεί πρότυπο προδιαγραφών. Πολλά αμερικάνικα συστήματα τυποποίησης και προδιαγραφών, όπως είναι το SAE, έχουν προσαρμοστεί στο ενοποιημένο σύστημα αρίθμησης UNS, σε μία προσπάθεια ομογενοποίησης της ονοματολογίας. Οι μεγάλες ομοιότητες που παρουσιάζουν μεταξύ τους τα διάφορα συστήματα οφείλονται ακριβώς στην κοινή βάση δεδομένων που μοιράζονται [43].

Το σύστημα UNS είναι ένα αλφαριθμητικό σύστημα κωδικοποίησης, το οποίο αποτελείται από ένα γράμμα για πρόθεμα και από πέντε ψηφία (Εικόνα 2.23). Ως πρόθεμα χρησιμοποιείται ένας λατινικός χαρακτήρας, που δηλώνει το είδος του χάλυβα. Το πρόθεμα ακολουθεί ο ίδιος τετραψήφιος κωδικός (x1x2x3x4) που χρησιμοποιείται και κατά SAE - AISI. Το πέμπτο ψηφίο στο τέλος του κωδικού αντιστοιχεί σε ένα αριθμητικό ψηφίο, το οποίο είτε αντικαθιστά την χρήση των ενδιάμεσων γραμμάτων B και L (Πίνακας 2.5) είτε αντικαθιστά την χρήση των προθεμάτων που εκφράζουν την μεταλλουργική μέθοδο παραγωγής του χάλυβα (Πίνακας 2.4). Το πέμπτο ψηφίο λαμβάνει, είτε τις τιμές 1 ή 4 για να δηλώσει την πρόσθετη προσθήκη σε βόριο ή σε μολύβδο αντίστοιχα, είτε παίρνει αριθμητικές τιμές για να προσδιορίσει την μέθοδο παραγωγής του χάλυβα, για παράδειγμα το πρόθεμα E κατά SAE - AISI μεταφέρεται στο πέρας του κωδικού και εκφράζεται πλέον από τον αριθμό 6. Η ονοματολογία, λοιπόν, κατά UNS για τα σιδηρούχα μέταλλα και κράματα παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2.6) [43].



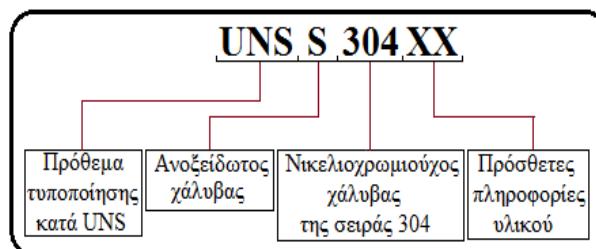
Εικόνα 2.23: Παράδειγμα τυποποίησης ενός χαμηλά κραματομένου χάλυβα, κατά UNS.

Πίνακας 2.6: Τυποποίηση ονοματολογίας για σιδηρούχα μέταλλα και κράματα κατά UNS [43, Πίνακας 1.7, σελ.16].

Κύρια Σειρά	Σιδηρούχα Μέταλλα
DX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Χάλυβες ειδικών προδιαγραφών
FX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Χυτοσίδηρα
GX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Ανθρακούχοι και κραματομένοι χάλυβες κατά SAE και AISI (εξαιρούνται οι εργαλειοχάλυβες)
HX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Προδιαγραφή εμβαιπτότητας κατά AISI (AISI H-steels)
JX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Χυτοχάλυβες
KX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Διάφοροι χάλυβες και σιδηρούχα κράματα
SX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Ανοξειδωτοι χάλυβες
TX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Εργαλειοχάλυβες
Κύρια Σειρά	Πληρωτικά Μέταλλα Συγκόλλησης
WX ₁ X ₂ X ₃ X ₄ X ₅	Επικαλυμμένα και σωληνοειδή ηλεκτρόδια (ταξινομούνται με βάση την χημική σύσταση της εναπόθεσης του τήγματος της συγκόλλησης)

Translated/Reprinted from the Handbook of Comparative World Steel Standards (3rd Edition), copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA.

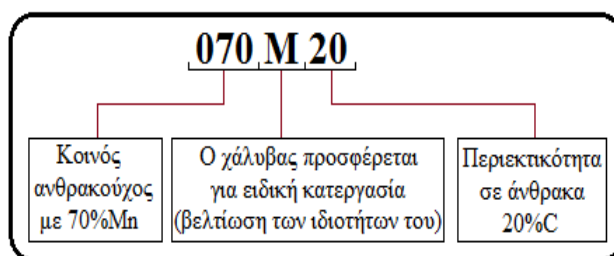
Παρατηρείται μία μικρή τροποποίηση στην ονοματολογία των ανοξειδωτων χαλύβων (Εικόνα 2.24). Αρχικά, το πρόθεμα αλλάζει σε S και τα τρία πρώτα ψηφία (x₁x₂x₃) αναφέρονται στην οικογένεια του χάλυβα. Η ονοματολογία των τριών πρώτων ψηφίων ακολουθεί την ίδια δομή ταξινόμησης με αυτήν που αναπτύχθηκε στο σύστημα SAE-AISI (Πίνακας 2.2). Τα δύο τελευταία ψηφία σε αυτή την περίπτωση αποτελούν αριθμούς, οι οποίοι δηλώνουν διάφορα ειδικά χαρακτηριστικά ή πληροφορίες για το υλικό [43].



Εικόνα 2.24: Παράδειγμα τυποποίησης ενός ισχυρά κραματομένου χάλυβα, κατά UNS.

2.4.2.3 Ονοματολογία χαλύβων κατά BS

Το αγγλικό σύστημα τυποποίησης χρησιμοποιεί έναν εξαψήφιο κώδικα ονοματολογίας ($x_a x_b x_c x_d x_e x_f$) (Εικόνα 2.25). Τα τρία πρώτα ψηφία του κωδικού ($x_a x_b x_c$) απαρτίζονται από αριθμούς, οι οποίοι προσδιορίζουν τον τύπο του χάλυβα (Πίνακας 2.7). Το τέταρτο στη σειρά ψηφίο (x_d) στελεχώνεται από έναν λατινικό χαρακτήρα, που αναφέρεται σε ιδιαίτερες πληροφορίες για τον χάλυβα (Πίνακας 2.8). Τα δύο τελευταία ψηφία του κωδικού ($x_e x_f$) προσδιορίζουν το ποσοστό επι τοις εκατό% του άνθρακα [11].



Εικόνα 2.25: Παράδειγμα τυποποίησης ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα, κατά BS.

Πίνακας 2.7: Οι κύριες σειρές του πρώτου τριψηφίου μέρους ($x_a x_b x_c$), του εξαψήφιου κωδικού, κατά BS [11, Πίνακας 15.3, σελ.514].

Τριψήφιο Μέρος Κωδικού ($x_a x_b x_c$)	Μεταλλουργική Μέθοδος Παραγωγής
000 έως 199	Κοινός χάλυβας ή ανθρακούχος με ποσοστά μαγγανίου (τα τρία ψηφία αντιστοιχούν στην επί τοις εκατό% περιεκτικότητα του Mn)
200 έως 240	Αυτόματος χάλυβας ή χάλυβας αποκοπής θείου (το δεύτερο και τρίτο ψηφίο αντιστοιχούν στην επί τοις εκατό% περιεκτικότητα του S)
250	Μαγγανιοπυριτιούχος χάλυβας
300 έως 499	Ανοξειδωτος χάλυβας υψηλής αντοχής εν θερμώ
500 έως 900	Κραματομένος χάλυβας

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης & Δημήτρης Ι. Παντελής), ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ, Δεκέμβριος 2008

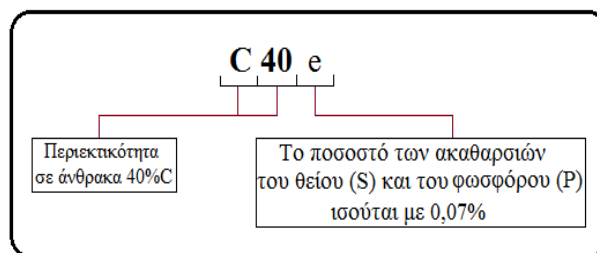
Πίνακας 2.8: Η ερμηνεία του ενδιάμεσου λατινικού χαρακτήρα (x_d), του εξαψήφιου κωδικού, κατά BS [11, Πίνακας 15.4, σελ.515].

Λατινικός Χαρακτήρας (x_d)	Ερμηνεία Χαρακτήρα
A	Η ακριβής χημική σύσταση του κράματος του χάλυβα καθορίζεται μέσω χημικής ανάλυσης
H	Ο χάλυβας προσφέρεται για σκλήρυνση μέσω της θερμική κατεργασίας της βαφής
M	Ο χάλυβας ενδείκνυται για ειδική μηχανική κατεργασία
S	Ο χάλυβας ανήκει στην οικογένεια των ανοξειδωτων.

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης & Δημήτρης Ι. Παντελής), ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ, Δεκέμβριος 2008

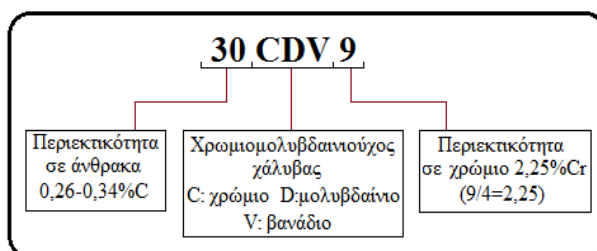
2.4.2.4 Ονοματολογία χαλύβων κατά AFNOR

Το γαλλικό σύστημα τυποποίησης χρησιμοποιεί τρεις βασικές κατηγορίες ομαδοποίησης των χαλύβων, τους κοινούς χάλυβες, τους ελαφρά κραματωμένους και τους ισχυρά κραματωμένους. Η κωδικοποίηση των κοινών χαλύβων ορίζεται συνήθως από έναν τριψήφιο κωδικό της μορφής Cz1z2 (Εικόνα 2.26). Το πρώτο ψηφίο είναι ο λατινικός χαρακτήρας C που αντιστοιχεί στο στοιχείο του άνθρακα. Τα δύο επόμενα στοιχεία (z1z2) αποδίδουν την περιεκτικότητα επι τοις εκατό% του άνθρακα. Πολλές φορές, τον τριψήφιο κωδικό ακολουθεί ένα τέταρτο ψηφίο, το οποίο αντιστοιχεί σε έναν λατινικό χαρακτήρα (a, b, m, e κλπ.) και αναφέρεται στις προδιαγραφές των περιεκτικότητων των ακαθαρσιών εντός της δομής του κράματος. Επιπλέον, όταν μεταξύ του λατινικού χαρακτήρα του άνθρακα και του διψήφιου αριθμού εισάγεται το γράμμα X, τότε αυτό υποδηλώνει την υψηλή ποιότητα του χάλυβα και την καταλληλότητά του ως προς τις θερμικές κατεργασίες [11].



Εικόνα 2.26: Παράδειγμα τυποποίησης ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα, κατά AFNOR.

Η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται για τους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες αποτελείται από τρία μέρη (zzK₁K₂...K_nx₁x₂...x_n) (Εικόνα 2.27). Το διψήφιο μέρος (zz) αποτελεί την επι τοις εκατό% περιεκτικότητα σε άνθρακα. Το δεύτερο μέρος (K₁K₂...K_n) απαρτίζεται από λατινικούς κεφαλαίους χαρακτήρες που εκφράζουν τα κύρια κραματικά στοιχεία προσθήκης (Πίνακας 2.9). Το τρίτο μέρος (x₁x₂...x_n) αποτελείται από αριθμητικά ψηφία, τα οποία εκφράζουν τα ποσοστά αυτών των κραματικών στοιχείων, πολλαπλασιασμένα επί το 4 για περιεκτικότητες 1-3% και πολλαπλασιασμένα επί το 10 για περιεκτικότητες μικρότερες του 1% [11].

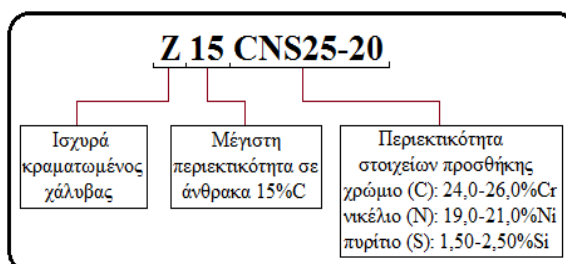


Εικόνα 2.27: Παράδειγμα τυποποίησης ενός χαμηλά κραματωμένου χάλυβα, κατά AFNOR.

Πίνακας 2.9: Συμβολισμοί των κραματικών στοιχείων προσθήκης, κατά AFNOR [11].

Συμβολισμοί	Κραματικό Στοιχείο Προσθήκης	Συμβολισμοί	Κραματικό Στοιχείο Προσθήκης
A	Αλουμίνιο (Al)	Nb	Νιόβιο (Nb)
C	Χρόμιο (Cr)	Pb	Μόλυβδος (Pb)
D	Μολυβδαίνιο (Mo)	S	Πυρίτιο (Si)
F	Θείο (S)	T	Τιτάνιο (Ti)
K	Κοβάλτιο (Co)	U	Χαλκός (Cu)
M	Μαγγάνιο (Mn)	V	Βανάδιο (V)
N	Νικέλιο (Ni)	W	Βολφράμιο (W)

Η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται για τους ισχυρά κραματωμένους χάλυβες, διαθέτει παρόμοια δομή με αυτήν των ελαφρά κραματωμένων χάλυβων. Η πρώτη διαφορά είναι ότι στην αρχή του κωδικού τοποθετείται ο λατινικός χαρακτήρας Z, για να δηλώσει την υψηλή κραμάτωση (Εικόνα 2.28). Η δεύτερη και τελευταία διαφορά, αφορά το τρίτο μέρος του κώδικα, όπου οι ποσότητες $x_1x_2...x_n$ είναι διψήφιος και αντιστοιχούν στις περιεκτικότητες των στοιχείων προσθήκης [11].



Εικόνα 2.28: Παράδειγμα τυποποιήσεως ενός ισχυρά κραματωμένου χάλυβα, κατά AFNOR.

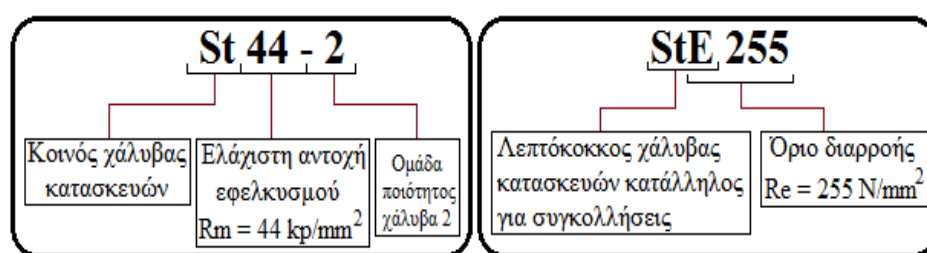
2.4.2.5 Ονοματολογία χάλυβων κατά DIN

Το γερμανικό σύστημα τυποποιήσεως διακρίνεται πλέον από το παλαιό και από το καινούργιο σύστημα κωδικοποιήσεως. Οι παλαιές συντομογραφίες για τα σιδηρούχα μέταλλα και κράματα μορφώνονται σύμφωνα με τα πρότυπα DIN 17006 T1-T3 και EURONORM 27-74. Τα πρότυπα αυτά βαθμιαία αντικαθιστώνται από το συνεργατικό σύστημα DIN EN 10027. Αξίζει να αναφερθεί ότι κάθε χώρα μέλος της ευρωπαϊκής επιτροπής πιστοποίησης (CEN) έχει ήδη προσαρμοστεί στα ενοποιημένα συστήματα EN. Παρόλα αυτά τα παλαιά συστήματα ακόμα αναφέρονται και ακόμα χρησιμοποιούνται [44].

Το παλαιό τυποποιημένο σύστημα κωδικοποίησης κατά DIN για τα σιδηρούχα μέταλλα και τα κράματα τους, διακρίνεται σε τρεις βασικές κατηγορίες

ομαδοποίησης, στα κοινά σιδηρούχα μέταλλα (κοινοί χάλυβες, χυτοσίδηρα κλπ.), στους ελαφρά κραματωμένους και στους ισχυρά κραματωμένους χάλυβες.

Η κωδικοποίηση των κοινών χαλύβων αποτελείται από ένα αλφαριθμητικό σύνολο χαρακτήρων δύο μερών (Εικόνα 2.29). Το πρώτο μέρος αποτελεί το πρόθεμα του κωδικού και απαρτίζεται από λατινικούς χαρακτήρες, οι οποίοι καθορίζουν την χαρακτηριστική ομάδα του χάλυβα (Πίνακας 2.10). Το δεύτερο μέρος αποτελείται από αριθμητικά ψηφία, τα οποία δηλώνουν συγκεκριμένες μηχανικές αντοχές και την ομάδα ποιότητας του χάλυβα [44].



Εικόνα 2.29: Παράδειγμα τυποποίησης ενός κοινού χάλυβα.

Πίνακας 2.10: Συμβολισμοί των κοινών σιδηρούχων μετάλλων και κραμάτων, κατά DIN [44, Πίνακας: Ομάδα υλικών, σελ.120].

Χαρακτηριστική Ομάδα	Ερμηνεία Ομάδας	Παράδειγμα
St	Κοινός χάλυβας κατασκευών	St 44-2
StE	Χάλυβας κατασκευών με αναγραφή του ορίου διαρροής (χάλυβες συγκολλήσεων)	StE 255
GG	Χυτοσίδηρος με φύλλα γραφίτη	GG-20
GGG	Χυτοσίδηρος με σφαιροειδή γραφίτη	GGG-60
GTS	Μαύρος μαλακτός χυτοσίδηρος	GTS-55
GTW	Λευκός μαλακτός χυτοσίδηρος	GTW-35
GS	Χυτοχάλυβας	GS-52
GK	Χυτό έκχυσης πλινθωμάτων	GK-ALMg 3
GZ	Χυτό με φυγοκεντρισμό	GZ-X12Cr 14

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε.,
Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 120, Πίνακας:
Ομάδα υλικών



Οι κοινοί χάλυβες που προορίζονται για επιβελτίωση ή για κάποια άλλη επιφανειακή θερμική κατεργασία συμβολίζονται με το λατινικό πρόθεμα C ή Cx (όπου x μικρός λατινικός χαρακτήρας). Τον χαρακτήρα αυτόν ακολουθεί ένα διψήφιο ή τριψήφιο αριθμητικό σύνολο, το οποίο δίνει την περιεκτικότητα επί τοις εκατό% του άνθρακα [11]. Ορισμένες φορές, στο τέλος του κωδικού μπορεί να υπάρχει ένα αλφαριθμητικό διψήφιο μέρος, ποιοτικού χαρακτήρα (Πίνακας 2.11).

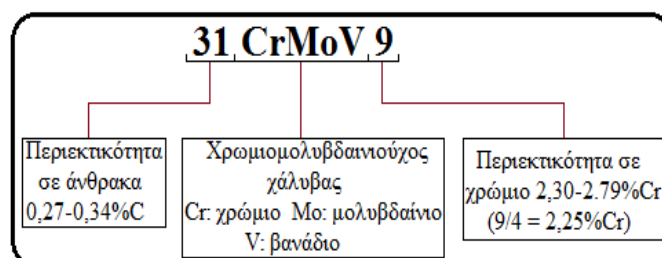
Πίνακας 2.11: Συμβολισμοί των κοινών σιδηρούχων μετάλλων και κραμάτων, που είναι κατάλληλοι επιβελτίωση, κατά DIN[43, Πίνακας: Καθαροί χάλυβες, σελ.120].

Χαρακτηριστική Ομάδα	Ερμηνεία Ομάδας	Παράδειγμα
C	Χάλυβας βελτιώσεως	C 15
Cf	Χάλυβας κατάλληλος για επιφανειακή βαφή με φλόγα ή επαγωγικά	Cf 53
Ck	Μη κραματομένος ειδικός χάλυβας με χαμηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο (P) και θείο (S)	Ck 45
Cm	Μη κραματομένος ειδικός χάλυβας με εγγυημένη ποσοστιαία διακύμανση θείου (S)	Cm 35
Cq	Χάλυβας κατάλληλος για ψυχρή έλαση	Cq 15
W1	Χάλυβας εργαλείων α' ποιότητας	C 105 W1
W2	Χάλυβας εργαλείων β' ποιότητας	C 105 W2
W3	Χάλυβας εργαλείων γ' ποιότητας	C 60 W3
WS	Χάλυβας εργαλείων ειδικού σκοπού	C 80 WS
D	Χάλυβας για ελατό σύρμα	D 8

© ΙΟΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 120, Πίνακας: Καθαροί χάλυβες



Οι κωδικές ονομασίες των ελαφρά κραματομένων χαλύβων συγκροτούνται από ένα σύνολο αλφαριθμητικών ψηφίων τριών μερών (Εικόνα 2.30). Το πρώτο μέρος αποτελείται από αριθμητικά ψηφία, τα οποία δίνουν την περιεκτικότητα επι τοις εκατό% του άνθρακα. Το δεύτερο μέρος αποτελείται από τα σύμβολα των βασικών συστατικών προσθήκης. Το τρίτο μέρος αποτελείται από αριθμητικά ψηφία, τα οποία υποδηλώνουν τις περιεκτικότητες των αναγραφόμενων κραματικών στοιχείων προσθήκης (με τη σειρά). Αναλόγως το κραματικό στοιχείο, ο αριθμός που αντιστοιχεί σε αυτό πρέπει να διαιρεθεί με έναν συγκεκριμένο συντελεστή, ώστε να προκύψει η περιεκτικότητά του κατά βάρος στο κράμα (Πίνακας 2.12) [44].



Εικόνα 2.30: Παράδειγμα χαμηλά κραματομένου χάλυβα, κατά DIN και EN.

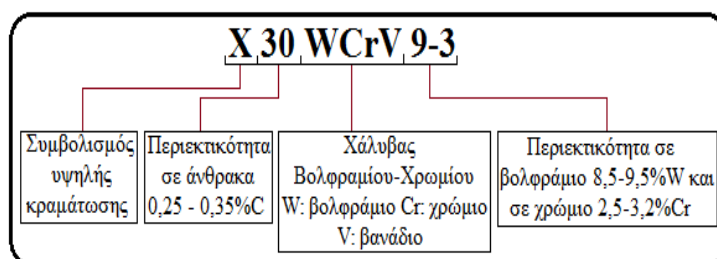
Πίνακας 2.12: Συντελεστές πολλαπλασιασμού ανά στοιχείο[43, Πίνακας: Συντελεστής πολλαπλασιασμού, σελ.120].

Συντελεστής Πολλαπλασιασμού					
4		10		100	1000
Cr (Χρώμιο)	Ni (Νικέλιο)	Al (Αλουμίνιο)	Pb (Μόλυβδος)	C (Άνθρακας)	B (Βόριο)
Co (Κοβάλτιο)	Si (Πυρίτιο)	Be (Βηρύλλιο)	Ta (Ταντάλιο)	S (Θείο)	
Mn (Μαγγάνιο)	W (Βολφράμιο)	Cu (Χαλκός)	Ti (Τιτάνιο)	N (Άζωτο)	
		Mo (Μολυβδαίνιο)	V (Βανάδιο)	Ce (Δημήτριο)	
		Nb (Νιόβιο)	Zr (Ζιρκόνιο)		

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 120, Πίνακας: Συντελεστής πολλαπλασιασμού

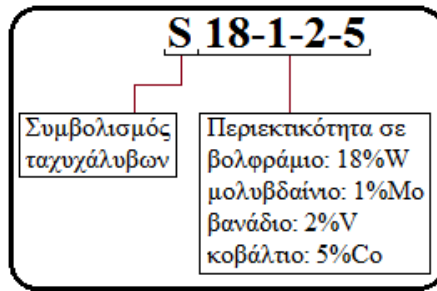


Η ίδια τυποποιημένη ονοματολογία ισχύει και στους ισχυρά κραματωμένους χάλυβες, με την διαφορά ότι μπροστά από το ποσοστό του άνθρακα τοποθετείται ως πρόθεμα, ο λατινικός χαρακτήρας X (Εικόνα 2.31). Ως ισχυρά κραματωμένοι θεωρούνται οι χάλυβες όπου κάποιο κραματικό τους συστατικό ξεπερνάει σε ποσοστό το 5%. Σε αυτήν την περίπτωση δεν ισχύει ο παραπάνω κανόνας των συντελεστών πολλαπλασιασμού [44].



Εικόνα 2.31: Παράδειγμα ισχυρά κραματωμένου χάλυβα, κατά DIN και EN.

Οι ταχυχάλυβες μπορεί να ανήκουν στους ισχυρά κραματωμένους χάλυβες, ωστόσο, δεν ακολουθούν την ίδια κωδικοποίηση (Εικόνα 2.32). Χαρακτηρίζονται με το γράμμα S και από τέσσερα αριθμητικά ψηφία τα οποία αντιστοιχούν στην επί τοις εκατό περιεκτικότητα συγκεκριμένων στοιχείων προσθήκης, τα οποία το ακολουθούν πάντα με την ίδια σειρά. Τα κραματικά αυτά στοιχεία είναι το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο, το βανάδιο και το κοβάλτιο [44].



Εικόνα 2.32: Παράδειγμα κωδικοποίησης ενός ταχυάλυβα, κατά DIN.

Πολλές φορές, μπροστά από τα προθέματα (Πίνακας 2.13) ή το πέρας των κωδικών (Πίνακας 2.14), τόσο στους κοινούς χάλυβες όσο και στους κραματομένους, τοποθετούνται πρόσθετα σύμβολα. Οι πρόσθετοι αυτοί χαρακτήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για να δηλώσουν ειδικές πληροφορίες κατεργασίας [44].

Πίνακας 2.13: Πρόσθετα προθέματα [44, Πίνακας: Χαρακτηρισμός πρόσθετων γνωρισμάτων με γράμματα, σελ.120].

Πρόσθετοι Χαρακτήρες (Πρόθεμα)	Ερμηνεία Χαρακτήρων	Παράδειγμα
A	Χάλυβας ανθεκτικός στην γήρανση	A 25 CrMo 4
G	Χυτό υλικό	G-X 12Cr 14
P	Χάλυβας κατάλληλος για σφυρηλασία σε μήτρες	PSt 50-2
R	Χάλυβας εφησυχασμένος και ημιεφησυχασμένος	RSt 37-2
RR	Χάλυβας ιδιαίτερα εφησυχασμένος	RRSt 34-7
Ro	Χάλυβας κατάλληλος για συγκολλητούς σωλήνες	RoSt 37-3
S	Χάλυβας ιδιαίτερα κατάλληλος για συγκόλληση	GTW-S 38-12
TT	Χάλυβας κατάλληλος για χρήση σε χαμηλές θερμοκρασίες	TTStE 32
U	Χάλυβας μη εφησυχασμένος	USt 37-2
WT	Χάλυβας ανθεκτικός στις καιρικές συνθήκες	WTSt 37-3
Z	Χάλυβας κατάλληλος για εφελκυσμό	ZSt 44-2

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 120, Πίνακας: Χαρακτηρισμός πρόσθετων γνωρισμάτων με γράμματα



Πίνακας 2.14: Πρόσθετες καταλήξεις [45, Πίνακες 3.6-3.10, σελ 27-32] & [43, Πίνακας: Χαρακτηρισμός πρόσθετων γνωρισμάτων με γράμματα, σελ.120].

Πρόσθετοι Χαρακτήρες (Κατάληξη)	Ερμηνεία Χαρακτήρων	Παράδειγμα
B	Χάλυβας θερμικά επεξεργασμένος για βελτιωμένη κατεργασιμότητα	42 CrMo 4 B
BF	Χάλυβας θερμικά επεξεργασμένος για καθορισμένη αντοχή εφελκυσμού	16 MnCr 5 BF
BG	Χάλυβας θερμικά επεξεργασμένος για φερριτική-περλιτική δομή	20 MoCr 4 BG
G	Ανοπτημένος χάλυβας (ανόπτηση ολκιμότητας)	16 MnCr 5 G
K	Χάλυβας ψυχρής έλασης	9 SMn 28 K
N	Ανοπτημένος χάλυβας (κανονική ανόπτηση)	Ck 45 N
NT	Εναζωτωμένος χάλυβας	31 CrMoV 9 NT
S	Ανοπτημένος χάλυβας (αποαττική ανόπτηση)	Ck 45 SH
U	Χάλυβας μη κατεργασμένος	St 37.2 U
V	Χάλυβας επιβελτιωμένος	42 CrMo4V90

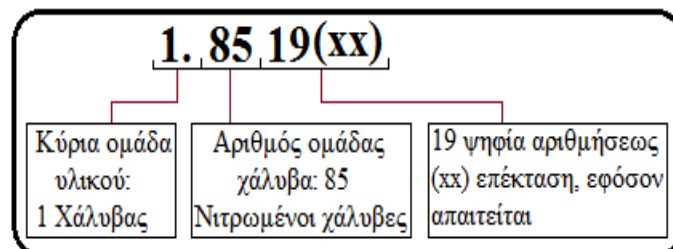
© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 120, Πίνακας: Χαρακτηρισμός πρόσθετων γνωρισμάτων με γράμματα



2.4.2.6 Ονοματολογία χαλύβων κατά EN

Το σύστημα χαρακτηρισμού για χάλυβες κατά EN έχει ορίσει μία αριθμητική συντομογραφία και μία κωδικοποίηση με βάση τον σκοπό χρησιμοποίησης και την χημική σύνθεση του υλικού. Το σύστημα αυτό έχει αφομοιωθεί από σχεδόν όλα τα κράτη μέλη (π.χ. DIN EN 10027) [44].

Το **σύστημα των αριθμών** ορίζεται από την ομάδα υλικών 1 των χαλύβων, από έναν διψήφιο αριθμό χαρακτηρισμού της οικογένειας του χάλυβα (Πίνακας 2.15) και έναν διψήφιο αριθμητικό συντελεστή. Σε περίπτωση ανάγκης ο αριθμητικός συντελεστής μπορεί να επεκταθεί (Εικόνα 2.33) [44].



Εικόνα 2.33: Σύστημα αρίθμησης χαλύβων, κατά EN.

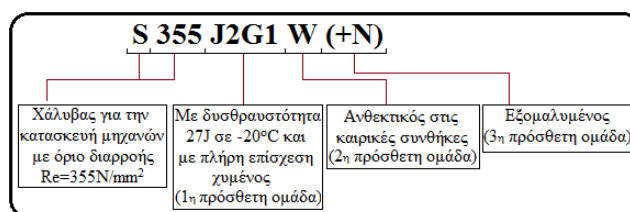
Πίνακας 2.15: Ερμηνεία των αριθμών ομάδας χάλυβα (2^ο και 3^ο ψηφίο)
[44, Πίνακας: Σημασία των αριθμών ομάδας χάλυβα, θέσεις 2 και 3, σελ. 114].

Αριθμός Ομάδας	Ομάδες Χάλυβα	Αριθμός Ομάδας	Ομάδες Χάλυβα
Κοινοί χάλυβες		Υπόλοιποι κραματομένοι χάλυβες	
0, 90	Βασικοί χάλυβες	32, 33	Ταχυχάλυβες με Co
Χάλυβες ποιότητας		35	Χάλυβες εδράνων ολίσθησης
01	Γενικοί χάλυβες κατασκευών $R_m < 500 \text{MPa}$	36-39	Υλικά κατασκευής με ιδιαίτερες μαγνητικές ή φυσικές ιδιότητες
02	Λοιποί χάλυβες κατασκευών $R_m < 500 \text{MPa}$	40-45	Ανοξειδωτοι χάλυβες
03	Χάλυβες με οριακές τιμές $C < 0,12\%$ ή $R_m < 400 \text{MPa}$	46	Χημικά σταθεροί και ανθεκτικά σε υψηλή θερμοκρασία κράματα Ni
04	Χάλυβες με $0,12\% \leq C < 0,25\%$ ή $400 \text{MPa} \leq R_m < 500 \text{MPa}$	47, 48	Χάλυβες ανθεκτικοί σε θερμότητα
05	Χάλυβες με $0,25\% \leq C < 0,55\%$ ή $500 \text{MPa} \leq R_m < 700 \text{MPa}$	49	Υλικά κατασκευής ανθεκτικά σε υψηλή θερμοότητα
06	Χάλυβες με $C \geq 0,55\%$ ή $R_m \geq 700 \text{MPa}$	Χάλυβες δομικοί, κατασκευής μηχανών και δοχείων	
07	Χάλυβες με υψηλό ποσοστό P ή S	51	Mn, Si, Cu
Κράματα χαλύβων ποιότητας		52	Mn-Cu, Mn-V, Si-V, Mn-Si-V
		53	Mn-Ti, Si-Ti
08	Χάλυβες με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες	54	Mo, Nb, Ti, V, W
09	Χάλυβες εφαρμογής διαφόρων περιοχών	55	Mn < 1,64%, B, Mn-B
Μη κραματομένοι ευγενείς χάλυβες		56	Ni
		57-60	Cr-Ni ($\leq 3\%$ Cr)
10	Χάλυβες με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες	62, 63	Ni-Mo, Ni-Mn-V
11	Χάλυβες δομικοί, μηχανών και δοχείων με $C < 0,5\%$	65-67	Cr-Ni-Mo
12	Χάλυβες μηχανών με $C \geq 0,5\%$	68	Cr-Ni-V, Cr-Ni-W, Cr-Ni-V-W
13	Χάλυβες δομικοί, μηχανών, δοχείων με ειδικές απαιτήσεις	69	Cr-Ni (εκτός οι κατηγορίες 57-68)
15-18	Χάλυβες εργαλείων	70	Cr, Cr-B
Κράματα χαλύβων εργαλείων		71	Cr-Si, Cr-Mn, Cr-Mn-B, Cr-Si-Mn
		72, 73	Cr-Mo
20	Cr	75, 76	Cr-V
21	Cr-Si, Cr-Mn, Cr-Mn-Si	77	Cr-Mo-V
22	Cr-V, Cr-V-Si, Cr-V-Mn	79	Cr-Mn-Mo, Cr-Mn-Mo-V
23	Cr-Mo, Cr-Mo-V, Mo-V	80	Cr-Si-Mo, Cr-Si-Mn-Mo, Cr-Si-Mo-V
24	W, Cr-W	81	Cr-Si-V, Cr-Mn-V, Cr-Si-Mn-V
25	W-V, Cr-W-V	82	Cr-Mo-W, Cr-Mo-W-V
26	W, εκτός σταδίων 24, 25, 27	84	Cr-Si-Ti, Cr-Mn-Ti, Cr-Si-Mn-Ti
27	Ni	85	Νιτρομένοι χάλυβες
28	Υπόλοιπα	88, 89	Χάλυβες υψηλής ανθεκτικότητας, κατάλληλοι για συγκολλήσεις

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική
Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 114, Πίνακας: Σημασία των
αριθμών ομάδας χάλυβα, θέσεις 2 και 3



Το σύστημα χαρακτηρισμού με βάση τον σκοπό χρησιμοποίησης του χάλυβα ορίζεται από έναν κεφαλαίο λατινικό χαρακτήρα στην αρχή του κωδικού (Πίνακας 2.16), ακολουθεί ένας αριθμητικός χαρακτηρισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα και τέλος ακολουθούν πρόσθετα σύμβολα τριών ομάδων, τα οποία τονίζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κατεργασίας και διάφορες άλλες ειδικές πληροφορίες (Εικόνα 2.34). Συγκεκριμένα η πρώτη ομάδα πρόσθετων συμβόλων αποτελείται από γράμματα ή ψηφία για τον χαρακτηρισμό του έργου κρούσης, της θερμικής κατεργασίας, της χρήσης και της οξειδωσης. Η δεύτερη ομάδα επίσης αποτελείται από χαρακτήρες και ψηφία και λειτουργεί μόνο σε συνδυασμό με την πρώτη ομάδα. Τέλος, η τρίτη ομάδα προσθήκης αποτελεί πρόσθετα σύμβολα για τα προϊόντα του χάλυβα, τα οποία είναι γράμματα ή αριθμοί και διαχωρίζονται από τον υπόλοιπο κορμό του κωδικού με ένα πρόσθετο συν (+). Η αντιστοίχιση των πρόσθετων συμβόλων με τα κύρια προθέματα ομαδοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.17 [44].



Εικόνα 2.34: Τυποποίηση με βάση τον σκοπό χρησιμοποίησης, κατά EN.

Πίνακας 2.16: Ερμηνεία κύριου εισαγωγικού συμβόλου (πρόθεμα) [44, Πίνακας: Χαρακτηρισμός σύμφωνα με τον σκοπό χρησιμοποίησης, σελ.116].

Κύρια Σύμβολα Ομαδοποίησης	Σκοπός Χρησιμοποίησης
E	Χάλυβας για την κατασκευή μηχανών
S	Χάλυβας για χαλύβδινες κατασκευές
P	Χάλυβας για κατασκευή δοχείων πίεσης
H	Προϊόντα επίπεδα για χάλυβες υψηλής αντοχής
D	Προϊόντα επίπεδα για εν ψυχρώ μόρφωση
T	Έλασμα και ταινίες από λευκοσίδηρο συσκευασίας
L	Χάλυβες για σωλήνες
B	Χάλυβες για μπετόν
Y	Χάλυβες τάνυσης
M	Ηλεκτρο-σίδηρος και ταινία
R	Χάλυβες σιδηροτροχιών

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 116, Πίνακας: Χαρακτηρισμός σύμφωνα με τον σκοπό χρησιμοποίησης



Πίνακας 2.17: Επεξήγηση των πρόσθετων συμβόλων ανά κύριο σύμβολο [44, Πίνακας: Σύστημα χαρακτηρισμού για χάλυβες και χυτοχάλυβες, σελ.116-118].

Κύρια Σύμβολα		Πρόσθετα Σύμβολα για Χάλυβες				Πρόσθετα Σύμβολα για Προϊόντα Χάλυβα	
Λατινικός Χαρακτήρας Χρήσης	Αριθμητικό Ψηφίο Μηχανικών Ιδιοτήτων	Ομάδα 1			Ομάδα 2	Ομάδα 3	
E	Κατώτερο όριο διαρροής Re (N/mm ²) για το ελάχιστο πάχος του προϊόντος	G1: χωρίς επίσχεση χυμένος G2: με επίσχεση χυμένος G3: με πλήρη επίσχεση χυμένος G4: με πλήρη επίσχεση χυμένος και προκαθορισμένη κατάσταση προμήθειας			C: ιδιαίτερη ικανότητα μορφοποίησης εν ψυχρώ	Σύμφωνα με τον πίνακα Π2.Β (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.2)	
S	Κατώτερο όριο διαρροής Re (N/mm ²) για το ελάχιστο πάχος του προϊόντος	Δυσθραυστότητα σε Joule		Θερμοκ. Δοκιμής	C: ιδιαίτερη ικανότητα μορφοποίησης εν ψυχρώ D: για επιμεταλώσεις με εμβάπτιση E: για σμάλτωση F: για σφυρηλάτηση L: για χαμηλές θερμοκρασίες M: μορφοποιείται θερμομηχανικά N: υπόκειται σε ανόπτηση εξομάλυνσης O: για παράκτιες κατασκευές Q: βελτιώνεται με θερμική κατεργασία S: για κατασκευή πλοίων T: για σωλήνες W: ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες	Σύμφωνα με τους πίνακες Π2.Α, Π2.Β, Π2.Γ (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.2)	
		27 J	40 J				60 J
		JR	KR	LR			+20
		JO	KO	LO			0
		J2	K2	L2			-20
		J3	K3	L3			-30
		J4	K4	L4			-40
		J5	K5	L5			-50
		J6	K6	L6			-60
G1-G4 χάλυβες για την κατασκευή μηχανών							
P	Κατώτερο όριο διαρροής Re (N/mm ²) για το ελάχιστο πάχος του προϊόντος	M: θερμομηχανική διαμόρφωση B: φιάλη αερίου S: απλό δοχείο πίεσης N: υπόκειται σε ανόπτηση εξομάλυνσης Q: βελτιώνεται με θερμική κατεργασία			H: Περιοχή επιφανειακής σκλήρυνσης υψηλής θερμοκρασίας L: Περιοχή επιφανειακής σκλήρυνσης χαμηλής θερμοκρασίας R: Περιοχή επιφανειακής σκλήρυνσης θερμοκρασίας δωματίου X: Περιοχή επιφανειακής σκλήρυνσης υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας	Σύμφωνα με τους πίνακες Π2.Β, Π2.Γ (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.2)	
H	Κατώτερο όριο διαρροής Re (N/mm ²)	M: θερμομηχανική κυλίνδριση και ψυχρή κυλίνδριση B: σκλήρυνση εγκρουστήρα P: κράμα φωσφόρου X: διφασικό Y: Παρεμβαλλόμενος ελεύθερος χάλυβας (χάλυβας IF)			D: για επιμεταλώσεις με εμβάπτιση	Σύμφωνα με τους πίνακες Π2.Β, Π2.Γ (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.2)	
HT	Κατώτερο όριο θραύσης Rm (N/mm ²)						

D	Διψήφιος χαρακτηριστικός αριθμός	D: για επιμεταλλώσεις με εμβάπτιση EK: για συμβατική επισμάλτωση ED: για άμεση επισμάλτωση T: για σωλήνες H: για κοίλα προφίλ	Δεν προβλέπονται σύμβολα	Σύμφωνα με τους πίνακες Π2.Β, Π2.Γ (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.2)
DC	Διψήφιος χαρακτηριστικός αριθμός για κυλίνδριση εν ψυχρώ			
DD	Διψήφιος χαρακτηριστικός αριθμός για κυλίνδριση εν θερμό			
DX	Διψήφιος χαρακτηριστικός αριθμός για κατάσταση κυλίνδρισης μη προγεγραμμένη			
T	Ονομαστικό όριο επιμήκυνσης $R_{p0,2}$ (N/mm ²) για προϊόντα διπλής μείωσης	Δεν προβλέπονται σύμβολα	Δεν προβλέπονται σύμβολα	Σύμφωνα με τους πίνακες Π2.Β, Π2.Γ (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.2)
TH	Προγεγραμμένη μέση τιμή σκληρότητας για προϊόντα απλής μείωσης			
L	Κατώτερο όριο διαρροής Re (N/mm ²) για το ελάχιστο πάχος του προϊόντος	M: μορφοποιείται θερμομηχανικά N: υπόκειται σε ανόπτηση εξομάλυνσης Q: βελτιώνεται με θερμική κατεργασία	Τάξη απαιτήσεων, περιπτώσεις απαραίτητο με ένα ψηφίο	Σύμφωνα με τους πίνακες Π2.Α, Π2.Β, Π2.Γ (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.2)
B	Κατώτερο όριο διαρροής Re (N/mm ²) για το ελάχιστο πάχος του προϊόντος	N: κανονική ομοιόμορφη διαστολή H: υψηλή ομοιόμορφη διαστολή	Δεν προβλέπονται σύμβολα	Σύμφωνα με τον πίνακα Π2.Γ (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π.2)

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 116-118, Πίνακας: Σύστημα χαρακτηρισμού για χάλυβες και χυτοχάλυβες



Το σύστημα χαρακτηρισμού σύμφωνα με την **χημική σύσταση**, ταξινομεί τους χάλυβες σε κοινούς και μη κραματωμένους, στους ελαφρά και ισχυρά κραματωμένους και στους ταχυχάλυβες. Η κωδικοποιημένη ονομασία ορίζεται από έναν ή δύο λατινικούς χαρακτήρες ή από ένα αριθμητικό σύνολο, στην αρχή του κωδικού, ακολουθεί ένα αλφαριθμητικό ή αριθμητικό σύνολο, που αναφέρεται στις περιεκτικότητες των κύριων στοιχείων του υλικού και τέλος ακολουθούν πρόσθετα σύμβολα. Τα πρόσθετα σύμβολα αποτελούνται από χαρακτήρες και αριθμούς, και

διακρίνονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα πρόσθετων συμβόλων τονίζει το πεδίο εφαρμογής του χάλυβα, ενώ η δεύτερη αναφέρεται σε πρόσθετα ειδικά χαρακτηριστικά και διαχωρίζεται από τον υπόλοιπο κωδικό με ένα πρόσθετο συν (+). Τα σύμβολα της δεύτερης ομάδας είναι τα ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν στο σύστημα χαρακτηρισμού με βάση τον σκοπό χρησιμοποίησης του χάλυβα [44].

Οι κοινοί και μη κραματωμένοι χάλυβες συμβολίζονται με τον λατινικό χαρακτήρα C και σε συνδυασμό με το αριθμητικό σύνολο που ακολουθεί, εκφράζεται η επι τοις εκατό% περιεκτικότητα σε άνθρακα. Τα πρόσθετα σύμβολα στο πέρας του κωδικού, της πρώτης ομάδας καταγράφονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2.18) και αυτά της δεύτερης ομάδας αναφέρονται στον Πίνακα Π2.2 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π2) [44].

Πίνακας 2.18: Επεξήγηση των πρόσθετων συμβόλων της πρώτης ομάδας των κοινών χαλύβων, κατά EN [44, Πίνακας: C μη κεκραμένος χάλυβας με μία περιεκτικότητα σε $Mn < 0,1\%$, εκτός των χαλύβων αυτόματων μηχανών, σελ.119].

Πρόσθετα Σύμβολα Ομάδας 1	Ερμηνεία Συμβόλων
E	Χάλυβας μέγιστης καθορισμένης περιεκτικότητας σε θείο
R	Χάλυβας με καθορισμένους τομείς της περιεκτικότητας σε θείο
D	Σε έλξη σύρματος
C	Χάλυβας με ιδιαίτερη ικανότητα ψυχρής μορφοποίησης
S	Χάλυβας για ελατήρια
T	Χάλυβας για εργαλεία
W	Χάλυβας για σύρμα συγκόλλησης
G1-G4	(δες Πίνακα 2.17)

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 119, Πίνακας: C μη κεκραμένος χάλυβας με μία περιεκτικότητα σε $Mn < 0,1\%$, εκτός των χαλύβων αυτόματων μηχανών



Οι κανονισμοί που διέπουν τον συμβολισμό των ελαφρά και ισχυρά κραματωμένων χαλύβων, αλλά και των ταχυχαλύβων, ακολουθούν την τυποποίηση του γερμανικού συστήματος DIN, που μελετήθηκε προηγουμένως. Το σύστημα χαρακτηρισμού με βάση την χημική σύνθεση, κατά EN, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η βελτιωμένη έκδοση του γερμανικού συστήματος. Οι διαφορές τους εντοπίζονται στους διαφορετικούς πίνακες πρόσθετων στοιχείων συμβολισμού που χρησιμοποιούν, στο διαφορετικό πρόθεμα συμβολισμού των ταχυχαλύβων και στην αφαίρεση των κενών μεταξύ των αλφαριθμητικών ψηφίων στους κραματωμένους χάλυβες (Πίνακας 2.19) [18]. Τα πρόσθετα σύμβολα στο πέρας του

κωδικού, για τους κραματωμένους χάλυβες και τους ταχυχάλυβες, ορίζονται σύμφωνα με τους Πίνακα Π2.1, Π2.2, Π2.3 (Παράρτημα Π2).

Πίνακας 2.19: Διαφορές ονοματολογίας μεταξύ των συστημάτων EN και DIN [18, Πίνακας 3.6.4, σελ.41].

Διαφορές	
Κωδικός Υλικού (EN)	Κωδικός Υλικού (DIN)
C15E	Ck 15
C35+QT	C 35 V
31CrMoV9	31 CrMoV 9
X30WCrV9-3	X 30 WCrV 9 3
HS18-1-2-5	S 18-1-2-5

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, 2η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 41, Πίνακας: 3.6.4 Σύγκριση των νέων και παλιών ονομασιών



2.4.3 Κραματωμένοι χάλυβες

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: στους ελαφρά, στους μέτρια και στους ισχυρά κραματωμένους (Εικόνα 2.21). Η ταξινόμηση τους βασίζεται στο ποσοστό των κραματικών στοιχείων που έχουν προστεθεί στην δομή του χάλυβα.

2.4.3.1 Ελαφρώς κραματωμένοι χάλυβες

Στους ελαφρά κραματωμένους ή μικροκραματωμένους, ανήκουν οι χάλυβες όπου το συνολικό ποσοστό των στοιχείων προσθήκης τους δεν υπερβαίνει το 2% [11]. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι χάλυβες μικροκραματοποίησης ή αλλιώς χάλυβες HSLA (High - Strength Low-Alloy Steels), αλλά και η οικογένεια των ανθρακούχων χάλυβων [46].

Οι **ανθρακούχοι χάλυβες** αποτελούν κράματα σιδήρου - άνθρακα από 0,10 έως 2,0% κ.β. C, με κύριο συστατικό προσθήκης το μαγγάνιο από 0,4 έως 1,65% κ.β. Mn. Διακρίνονται στους χάλυβες χαμηλής, ενδιάμεσης, υψηλής και ιδιαίτερα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα [46].

Οι **χαμηλά ανθρακούχοι χάλυβες** (Low - carbon steels) εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας τους σε άνθρακα (έως και 0,30% κ.β. C), σε συνδυασμό με την προσθήκη σε μαγγάνιο, παρουσιάζουν ισχυρή εν ψυχρώ διαμορφωσιμότητα. Η κατηγορία αυτή συναντάτε κυρίως υπό την μορφή ανοπτημένων λαμαρινών και ταινιών ψυχρής έλασης, με περιεκτικότητα σε άνθρακα χαμηλότερη του 0,10% και

μαγγάνιο το πολύ έως 0,40%. Τυπικά παραδείγματα αυτών των χαλύβων αποτελούν, οι λαμαρίνες κατασκευής του κελύφους των διαφόρων οχημάτων, τα επικασσιτερωμένα φύλλα και τα διάφορα μεταλλικά σύρματα. Συναντάται ακόμα, υπό την μορφή διελασμένων επίπεδων φύλλων και διαφόρων κατασκευαστικών διατομών. Σε αυτή την περίπτωση η περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να αγγίξει το 0,30% και το μαγγάνιο το 1,5%. Αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή προϊόντων βαθείας κοίλανσης, σφυρήλατων προϊόντων, σωλήνων χωρίς ραφή και δοχείων πίεσεως [46].

Οι **χάλυβες μέσου άνθρακα κραμάτωσης** (Medium - carbon steels) περιέχουν άνθρακα από 0,3 έως 0,6% και μαγγάνιο από 0,6 έως 1,65%. Αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε άνθρακα, περίπου στο 0,5% και αντίστοιχα στο ποσοστό του διαλυμένου μαγγανίου, επιτρέπεται σε αυτούς τους χάλυβες να χρησιμοποιούνται σε επιβελτιωμένη κατάσταση (βαφή και επαναφορά). Υπό αυτές τις συνθήκες οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ατράκτων, αξονικών συνδέσμων (couplings), γραναζιών και σφυρήλατων προϊόντων. Οι περιεκτικότητες σε άνθρακα από 0,40 έως 0,60% χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σιδηροτροχιών, των τροχών του τραίνου και των αξόνων σύνδεσης τους [46].

Οι **χάλυβες υψηλού άνθρακα κραμάτωσης** (High - carbon steels) περιέχουν άνθρακα από 0,6 έως 1,0% και μαγγάνιο από 0,3 έως 0,9%. Οι χάλυβες αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ελατηρίων και υψηλής αντοχής συρματόσχοινων [46].

Οι **χάλυβες ιδιαίτερα υψηλών περιεκτικότητας σε άνθρακα** (Ultrahigh - carbon steels) περιέχουν τουλάχιστον 1,25 έως 2,0% κ.β.Ο. Οι χάλυβες αυτοί επεξεργάζονται θερμομηχανικά, με αποτέλεσμα να αποδίδουν μικροδομές εξαιρετικά λεπτών, ισοαξονικών κόκκων φερρίτη και να σχηματίζουν μία ομοιόμορφη κατανομή λεπτών, σφαιρικών και ασυνεχών προευτηκτοειδών τεμαχιδίων από καρβίδια [46].

Οι **μικροκραματωμένοι χάλυβες** (HSLA) αποτελούν την βελτιωμένη εκδοχή των ανθρακούχων χαλύβων που μόλις αναφέρθηκαν, διότι παρέχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση. Περιέχουν άνθρακα από 0,05 έως 0,25%, μαγγάνιο μέχρι 2,0% και επιπρόσθετα κραματικά στοιχεία με πολύ μικρές όμως ποσότητες. Οι συνηθέστερες προσμίξεις που χρησιμοποιούνται σε διάφορους συνδυασμούς είναι το χρώμιο, το νικέλιο, το μολυβδαίνιο, ο χαλκός, το τιτάνιο, το βανάδιο, το νιόβιο, το ζirkόνιο και το άζωτο. Η κατηγορία αυτή δεν λογίζεται στους κραματωμένους χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης,

κατά την ευρεία έννοια του όρου, διότι έχει σχεδιαστεί με σκοπό την προσέγγιση συγκεκριμένων ιδιοτήτων και όχι με προσέγγιση τη χημική σύσταση. Η εμπορική τους διάθεση γίνεται σε κοινή ελασμένη, σε ελεγχόμενα ελασμένη, σε ανοπτημένη και σε σκληρυμένη εκ γηράνσεως κατάσταση. Μερικές από τις κύριες εφαρμογές τους είναι η κατασκευή σωληνώσεων μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου, οι λαμαρίνες κατασκευής του κελύφους των πλοίων αλλά και των οχημάτων, η κατασκευή υπεράκτιων κατασκευών και η κατασκευή διαφόρων δοχείων πίεσεως [46].

2.4.3.2 Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες

Στους μετρίως κραματωμένους χάλυβες ή χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, το συνολικό ποσοστό των στοιχείων προσθήκης κυμαίνεται μεταξύ του 2 και 10% [11]. Τα κύρια κραματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι το χρώμιο, το νικέλιο και το μολυβδαίνιο. Οι προσθήκες αυτές αποδίδουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, αναβαθμίζοντας κατά πολύ τις ιδιότητες του χάλυβα, έναντι των ανθρακούχων και μικροκραματωμένων χαλύβων. Παρουσιάζουν αυξημένη εμβαπτότητα, αυξημένη δυσθραυστότητα μετά από βαφή και επαναφορά και αυξημένη αντοχή έναντι της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του υλικού, εξαιτίας των περιβαντολλογικών συνθηκών. Οι χάλυβες αυτοί κατηγοριοποιούνται με βάση την χημική τους σύσταση, το είδος της θερμικής κατεργασίας στην οποία έχουν υποβληθεί και στην ικανότητα συγκόλλησης τους. Το πλήθος των ομάδων που καλύπτει η κατηγορία είναι ιδιαίτερα εκτενές. Οι τέσσερις ομάδες που ακολουθούν αποτελούν μερικές από τις βασικές κατηγορίες των χαλύβων ενδιάμεσης κραμάτωσης [46].

Οι **επιβελτιωμένοι χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα** (Low - carbon quenched and tempered steels) συνδυάζουν υψηλά όρια διαρροής από 350 έως 1035 MPa με υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Παρουσιάζουν καλή αντοχή σε κρούση, ολκιμότητα, συγκολλησιμότητα και αντοχή στη διάβρωση. Στο εμπόριο διανέμονται υπό την μορφή φύλλων λαμαρίνας. Οι χάλυβες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σφυρήλατων και χυτών προϊόντων [46].

Οι **χάλυβες μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα ιδιαίτερα υψηλής αντοχής** (Medium - carbon ultra high - strength steels) αποτελούν χάλυβες κατασκευών με όριο διαρροής υψηλότερο του 1380 MPa. Στο εμπόριο διατίθεται υπό την μορφή ράβδων, λαμαρίνων, σωλήνων, διάφορων διατομών, συρμάτων και ηλεκτροδίων συγκολλήσεως [46].

Οι **χάλυβες κατασκευής τριβών κύλισης** (Bearing steels) εφαρμόζονται για την κατασκευή σφαιροειδών και βελονοειδών ρουλεμάν. Αποτελούνται είτε από χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα από 0,10 έως 0,20%, επιφανειακά σκληρυμένους χάλυβες, είτε από υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα περίπου 1%, εντός της μάζας σκληρυμένους χάλυβες [46].

Οι **χρωμιομολυβδαινιούχοι χάλυβες αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες** (Chromium - molybdenum heat - resistant steels) περιέχουν άνθρακα λιγότερο του 0,2%, χρώμιο από 0,5 έως 9% και μολυβδαίνιο από 0,5 έως 1,0%. Τα στοιχεία προσθήκης βελτιώνουν την αντοχή σε οξείδωση, σε διάβρωση και σε υψηλές θερμοκρασίες. Στο εμπόριο διατίθενται σε εξομαλυμένη και επαναφερμένη, σε επιβελτιωμένη και σε ανοπτημένη κατάσταση. Εξαιτίας των ιδιοτήτων τους χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε ειδικές κατασκευές στο χώρο των βιομηχανιών του πετρελαίου, του φυσικού αερίου, των ορυκτών καυσίμων και της πυρηνικής ενέργειας [46].

2.4.3.3 Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες

Στους ισχυρά κραματωμένους χάλυβες το συνολικό ποσοστό κραμάτωσης ξεπερνάει το 10% [11]. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή κωδικοποίηση που επικρατεί, ως ισχυρά κραματωμένος ορίζεται κάθε χάλυβας όπου κάποιο από τα κραματικά του συστατικά ξεπερνάει σε ποσοστό το 5%. Οι βασικές εμπορικές κατηγορίες των υψηλά κραματωμένων χαλύβων είναι, οι εργαλειοχάλυβες, οι χάλυβες μαρτεγήρασης, οι ωστενιτικοί μαγγανιούχοι χάλυβες και οι ανοξειδωτοί χάλυβες [44].

Οι **εργαλειοχάλυβες** αντιπροσωπεύουν την κατηγορία των χαλύβων που χρησιμοποιείται στην κατασκευή κοπτικών εργαλείων μορφοποίησης και απομάκρυνσης υλικού. Αντιστοιχούν στους χάλυβες αντιτριβής και αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι χάλυβες αυτοί έρχονται να λειτουργήσουν σε ένα ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον, όπου σε σύντομο χρονικό διάστημα καταπονούνται σε ισχυρά φορτία και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Τα υλικά αυτά διαθέτουν υψηλή αντοχή στη κρούση, στην τριβή, και στην πλαστική παραμόρφωση λόγω υψηλών θερμοκρασιών συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου. Στο εμπόριο διατίθενται σε δύο μορφές, σε ράβδους και σε σκόνη κονιομεταλλουργίας. Στην περίπτωση των ράβδων, το επιθυμητό σχήμα του κοπτικού εργαλείου διαμορφώνεται μηχανουργικά και εν συνεχεία μέσω κατάλληλων θερμικών κατεργασιών, αποκτούνται οι τελικές

επιθυμητές ιδιότητες (Wrought tools steels). Στην δεύτερη περίπτωση, το κοπτικό εργαλείο διαμορφώνεται μέσω της συσσωμάτωσης της μεταλλικής σκόνης (P/M Tool Steels). Να σημειωθεί ότι η τεχνική της κονιομεταλλουργίας έχει αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό την συμβατική μέθοδο παραγωγής των κοπτικών εργαλείων. Αυτό συνέβη, διότι μέσω της τεχνικής της κονιομεταλλουργίας, εξασφαλίζεται ομοιόμορφη λεπτόκοκκη μικροδομή, με ισόμορφη εγκάρσια διανομή των πολύ λεπτών καρβιδίων που δημιουργούνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση μίας εγκάρσιας ισοκατανεμημένης σκληρότητας κατά μήκος του πλέον διαμορφωμένου κοπτικού [20].

Οι **χάλυβες μαρτενγήρανσης** (Maraging Steels) είναι χάλυβες υψηλής αντοχής, με έξοχη συγκολλησιμότητα και υψηλή δυσθραυστότητα εγκοπής. Ξεχωρίζουν από τις υπόλοιπες κατηγορίες των χαλύβων, διότι είναι οι μόνοι που ισχυροποιούνται χωρίς την εμπλοκή του άνθρακα. Οι ιδιότητες αυτών των χαλύβων βελτιώνονται μέσω της διεργασίας της γήρανσης (precipitation hardening), σε θερμοκρασίες πλησίον των 480°C [20].

Οι **ωστενιτικοί μαγγανιούχοι χάλυβες**, περιέχουν άνθρακα από 0,7 έως 1,45%, μαγγάνιο από 6,0 έως 15%, θείο σε 1,00% και φώσφορο σε 0,07%. Ορισμένες κατηγορίες ωστενιτικών μαγγανιούχων χαλύβων διαθέτουν επιπλέον προσθήκες, όπως το χρώμιο από 1,5 έως 2,5%, το μολυβδαίνιο από 0,9 έως 2,1% και το νικέλιο από 3,0 έως 4,0%. Αποτελούν την σημαντικότερη κατηγορία χαλύβων αντιτριβής και αντοχής σε συνθήκες εκτριβής. Οι χάλυβες αυτοί, χάρις την όλκιμη ωστενιτική δομή τους, σε συνδυασμό με την υψηλή ικανότητα εργοσκλήρυνσης που αποκτάται, όταν το υλικό καταπονείται σε κρούση και σε αποτριβή, παρουσιάζουν υψηλή δυσθραυστότητα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξαρτήματα μεταλλευτικού εξοπλισμού που δέχονται βαρέως τύπου καταπονήσεις. Οι χάλυβες αυτοί ανήκουν στους χυτοχάλυβες, δεν κατεργάζονται μηχανουργικά και για το λόγο αυτό δεν μπορούν να αποκτήσουν τις τελικές αυστηρές ανοχές τους μέσω της μηχανουργικής κατεργασίας. Ανήκουν στην οικογένεια των συγκολλησιμων χαλύβων, όμως κατά την συγκόλληση τους χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, διότι σε περίπτωση επαναθέρμανσης κάποιας περιοχής, η περιοχή αυτή παρουσιάζει στοιχεία ψαθυρότητας [20].

Οι **ανοξειδωτοι χάλυβες** διαθέτουν για κύριο κραματικό στοιχείο τους το χρώμιο, σε περιεκτικότητες από 10,5% έως και 30%, ενώ το ποσοστό του διαλυμένου άνθρακα παραμένει σε χαμηλά επίπεδα από 0,03 έως 1,2%. Το αμέσως επόμενο πιο

σημαντικό στοιχείο κραμάτωσης είναι το νικέλιο, το οποίο ανάλογα με τον τύπο του ανοξείδωτου μπορεί να εμπεριέχεται σε ποσοστά από 0,40 έως 22% (standard κατά AISI) ή 40% (non - standard κατά AISI). Το τρίτο στοιχείο που συνοδεύει δυναμικά το στοιχείο του χρωμίου είναι το μαγγάνιο σε περιεκτικότητα από 0,2 έως 19%, με συνηθέστερο ποσοστό από 1 έως 2%. Τις περισσότερες φορές περιέχονται σε πολύ μικρά ποσοστά ως ακαθαρσίες τα στοιχεία του θείου από 0,03 έως 0,15% και του φωσφόρου από 0,01 έως 0,20%. Τα λοιπά στοιχεία που συνήθως εμπεριέχονται σε μικρές ποσότητες (έως 2%) είναι το άζωτο, το μολυβδαίνιο, ο χαλκός, το σελήνιο, το τιτάνιο, το νιόβιο, το ταλάντιο, το βολφράμιο, το βανάδιο και το αλουμίνιο [20].

Το βασικό χαρακτηριστικό που αποδίδει στον χάλυβα το στοιχείο του χρωμίου είναι η πολύ υψηλή αντοχή στην διάβρωση και στην οξείδωση, τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του προστατευτικού στρώματος των οξειδίων του χρωμίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του υλικού, μόνον όταν η περιεκτικότητα του είναι μεγαλύτερη του 11%. Ο άνθρακας παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, εξαιτίας της τάσης του να ενώνεται με το χρώμιο και να σχηματίζει ανεπιθύμητα καρβίδια πέριξ των κόκκων, με αποτέλεσμα, να μειώνεται η περιεκτικότητα σε χρώμιο και αντίστοιχα να ελαττώνονται οι αντιδιαβρωτικές του ικανότητες [20].

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες διακρίνονται σε πλήθος ομάδων και υποκατηγοριών. Η επιλογή μίας κλάσης επικεντρώνεται κυρίως γύρω από τα αντιδιαβρωτικά χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τις μηχανικές του ιδιότητες, την κατεργασιμότητα και φυσικά την διαθεσιμότητα και το κόστος. Η πρώτη προσέγγιση του υλικού γίνεται με βάση την κατεργασιμότητα, εάν δηλαδή, το τελικό προϊόν θα είναι αποτέλεσμα διαμόρφωσης ή χύτευσης. Στους ανοξείδωτους χάλυβες διαμόρφωσης ανήκουν οι ωστενιτικοί, οι φερριτικοί, οι μαρτενσιτικοί, οι ωστενιτοφερριτικοί ή duplex και οι χάλυβες γήρανσης. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες χύτευσης διακρίνονται στους ανθεκτικούς στη διάβρωση και στους ανθεκτικούς σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα εύρη των χημικών συστάσεων που παρουσιάζονται ανά κατηγορία στη συνέχεια αναφέρονται στην standard τυποποίηση των ανοξείδωτων χάλυβων κατά AISI και όχι στην non - standard, η οποία απαρτίζεται από ανοξείδωτους χάλυβες εξειδικευμένων χρήσεων [20].

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες αποτελούνται από χρώμιο από 15 έως 28% και από ένα γ-φερρογόνο στοιχείο. Διακρίνονται στις κλάσεις 200 και 300 και μεταξύ των υπολοίπων κατηγοριών διαθέτουν την καλύτερη αντιδιαβρωτική

προστασία. Στη σειρά 300 το κύριο γ-φερρογόνο στοιχείο είναι το νικέλιο το οποίο διατηρείται σε ποσοστά από 6 έως 22%. Στη σειρά 200 το κύριο γ-φερρογόνο στοιχείο είναι το μαγγάνιο σε ποσοστά από 5,5 έως 15,5%. Η σειρά 200 είναι η πετυχημένη προσπάθεια περιορισμού της περιεκτικότητας του νικελίου σε 1,0 έως 6,0%, εξαιτίας της προβληματικής ασιατικής αγοράς (1950, ασταθής πολιτική περίοδος στα Ασιατικά και Αφρικανικά κράτη, βασικοί παραγωγοί νικελίου) [20]. Εξαιτίας της γ-φάσης του ωστενίτη, τα κράματα αυτά είναι μη μαγνητικά. Ωστόσο, η ωστενιτική δομή μπορεί να μετασχηματιστεί μερικώς σε μαρτενσιτική υπό την εν ψυχρώ διαμόρφωση του υλικού και κατ'επέκταση να παρουσιάσει μαγνητικές ιδιότητες [47].

Οι φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες αποτελούν τμήμα της κλάσης 400 των ανοξείδωτων χαλύβων. Περιέχουν χρώμιο από 10,5 έως 30%, με τα στοιχεία του νικελίου και του μαγγανίου να διατηρούνται σε πολύ χαμηλά ποσοστά, περίπου στο 1 με 2% [20]. Η φερριτική περιοχή σταθεροποίησης διατηρείται μέχρι και το σημείο τήξεως, επομένως κατά την θερμική κατεργασία δεν υφίσταται αλλοτροπικός μετασχηματισμός, αλλά μεγέθυνση του μεγέθους των κόκκων [11, 20]. Για το λόγο αυτό η παρατεταμένη θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες, κάτω του σημείου τήξεως, μπορεί να οδηγήσει στην ευθραστοποίηση του υλικού. Συγκριτικά με την προηγούμενη κατηγορία η α-φάση του φερρίτη είναι μαγνητική, διαθέτει υψηλότερη μηχανική αντοχή και χαμηλότερη αντιδιαβρωτική προστασία [11].

Οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες αποτελούν το υπόλοιπο τμήμα της κλάσης 400 των ανοξείδωτων χαλύβων. Περιέχουν χρώμιο από 10,5 έως 18%, νικέλιο από 0,5 έως 2,50% και μαγγάνιο από 1 έως 1,25%. Η διεύρυνση της περιοχής σταθερότητας του ωστενίτη, εξασφαλίζεται με την μέγιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα που μπορεί να συναντηθεί στην κατηγορία των ανοξείδωτων χαλύβων, από 0,15 έως 1,2%. Εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας τους σε χρώμιο διαθέτουν υψηλές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες, αλλά κατώτερες των ωστενιτικών και φερριτικών χαλύβων. Παράλληλα, χάρις την αυξημένη περιεκτικότητα σε άνθρακα, επιτρέπεται ο αλλοτροπικός μετασχηματισμός κατά την θερμική κατεργασία. Με την θερμική κατεργασία αποδίδεται επαναφερμένος μαρτενσίτης. Οι χάλυβες αυτοί είναι μαγνητικοί χάρις την μαρτενσιτική δομή τους και παρουσιάζουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και σκληρότητα συγκριτικά με τις προηγούμενες δύο κατηγορίες [20].

Οι duplex ανοξείδωτοι χάλυβες διαθέτουν μικτή οστενιτοφερριτική δομή. Συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες κατηγοριοποιήσεις των ανοξείδωτων, περιέχουν τα μεγαλύτερα ποσοστά σε χρώμιο από 18 έως 28%. Με την αύξηση του χρωμίου (α-φερρογόνο) και την μείωση του νικελίου (γ-φερρογόνο) περίπου σε 6 έως 9%, επιτυγχάνεται ο ισοσκελισμός των δύο φάσεων. Παρουσιάζουν μικρή μαγνητική απόκριση, αντίστοιχα καλή αντιδιαβρωτική προστασία με τους οστενιτικούς χάλυβες, σε συνδυασμό όμως με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι η αντοχή σε εφελκυσμό και το υψηλό όριο διαρροής (τριπλάσιο της οστενιτικής). Βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των χάλυβων duplex είναι η υψηλή αντοχή σε διάβρωση λόγω καταπόνησης και κόπωσης [11].

Οι χάλυβες γήρανσης είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες που ισχυροποιούνται μέσα από την τεχνική της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση και χαρακτηρίζονται από υψηλή μηχανική αντοχή. Αποτελούνται από το κύριο συστατικό τους το χρώμιο με 12,25 έως 18%, το νικέλιο από 3,0 έως 8,5% και από διάφορα άλλα στοιχεία, τα οποία σχηματίζουν τις λεγόμενες φάσεις κατακρήμνισης. Τα στοιχεία κατακρήμνισης που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το αλουμίνιο από 0,75 έως 1,5%, ο χαλκός από 2,5 έως 4,5% και το τιτάνιο από 3,0 έως 5,0%. Η δομή αυτών των ανοξείδωτων χάλυβων μπορεί να είναι μαρτενσιτική, ημι-οστενιτική και οστενιτική, οπότε αντιστοίχως τα υλικά αυτά μπορούν να είναι μαγνητικά, ημι-μαγνητικά και μη μαγνητικά [20].

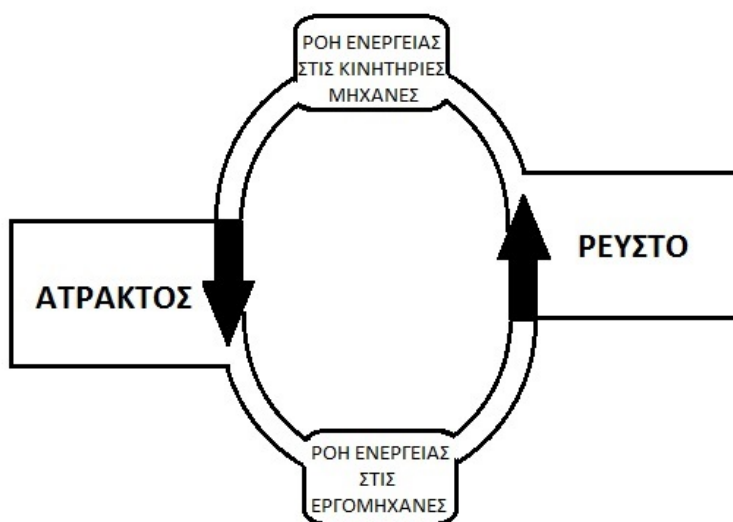
Οι ανοξείδωτοι χάλυβες χύτευσης διακρίνονται στους ανθεκτικούς έναντι της διάβρωσης και στους ανθεκτικούς έναντι των υψηλών θερμοκρασιών. Οι προδιαγραφές της δομής (οστενιτικοί, φερριτικοί, μαρτενσιτικοί και οστενιτοφερριτικοί) ισχύουν και εδώ. Οι ανθεκτικοί στην διάβρωση είτε περιέχουν χρώμιο από 10,5 έως 30% και νικέλιο από 1 έως 22% (χρωμιούχοι και χρωμονικελιούχοι) είτε χρώμιο από 18 έως 22% και νικέλιο από 22 έως 34% (νικελιοχρωμιούχοι). Διατηρούν την αντιδιαβρωτική τους προστασία για θερμοκρασίες έως τους 650°C. Οι ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες είτε περιέχουν χρώμιο από 8 έως 30% και νικέλιο από 4 έως 22% (χρωμιούχοι και χρωμονικελιούχοι) είτε χρώμιο από 19 έως 28% και νικέλιο από 23 έως και 68% (νικελιοχρωμιούχοι). Διατηρούν την αντοχή τους στην διάβρωση για θερμοκρασίες υψηλότερες των 650°C. Συγκριτικά με τους ανοξείδωτους χάλυβες διαμόρφωσης, διαθέτουν παρεμφερή χαρακτηριστικά ως προς την αντιδιαβρωτική τους προστασία, αλλά εξαιτίας της δομής τους (π.χ. παρουσία δενδριτών κ.α.) παρουσιάζουν υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες [20].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

3.1 Κατηγοριοποίηση ρευστοδυναμικών κινητήρων

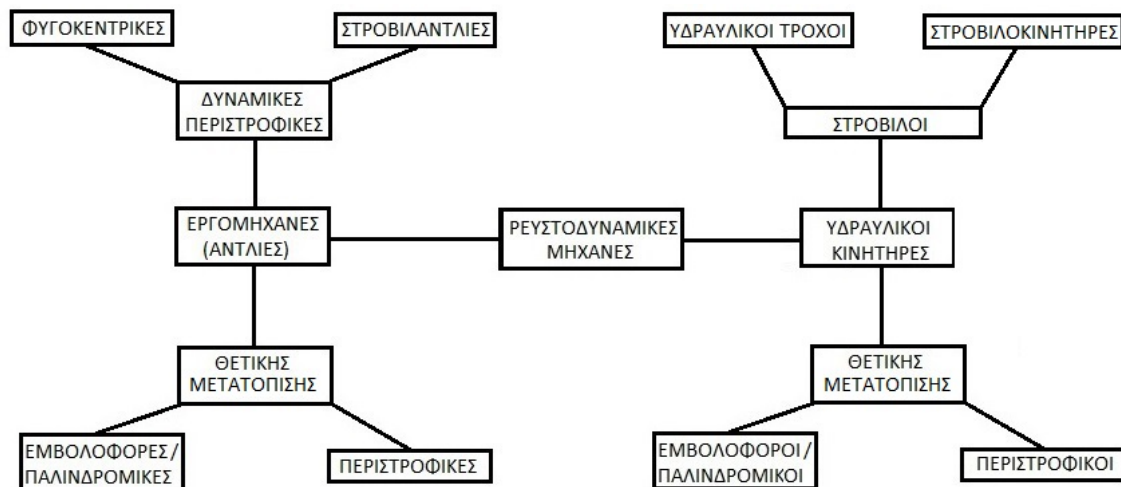
Όλα τα υδραυλικά ενεργειακά συγκροτήματα που δέχονται ή αποδίδουν κατά τη λειτουργία τους ισχύ από ή προς κάποιο ρευστό, ονομάζονται ρευστοδυναμικές μηχανές [48]. Οι μηχανές αυτές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και για αυτό το λόγο χωρίζονται σε ποικίλες κατηγορίες και υποκατηγορίες. Η κατηγοριοποίηση τους βασίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια ρευστομηχανικής, θερμικού και κατασκευαστικού χαρακτήρα και στη σκοπιμότητα της εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα η κύρια ταξινόμηση τους στηρίζεται στο συνδυασμό έξι βασικών κριτηρίων διαφοροποίησης [49]:

- Τη **συμπιεστότητα του ρευστού**, εάν δηλαδή το ρευστό μέσο είναι αέριο (συμπιεστό) ή υγρό (ασυμπίεστο). Με αυτό τον τρόπο καθορίζεται εάν η ρευστοδυναμική μηχανή είναι θερμική ή υδραυλική αντίστοιχα.
- Τη **φορά της ροής ενέργειας**, το οποίο καθορίζεται από τη σχέση ατράκτου (δρομέα) - ρευστού. Στη μία περίπτωση ο δρομέας δίνει ενέργεια στο ρευστό και στην άλλη το ρευστό στο δρομέα. Με αυτό το τρόπο οι ρευστοδυναμικές μηχανές κατηγοριοποιούνται σε εργομηχανές και σε κινητήριες μηχανές αντίστοιχα. (Εικόνα 3.1)



Εικόνα 3.1: Καθορισμός είδους ρευστοδυναμικών μηχανών ανάλογα με τη κατεύθυνση της ροής ενέργειας [49, εμπνευσμένο από Εικόνα 1.1/1, σελ.1.2].

- Τη **σκοπιμότητα εφαρμογής**, που προκύπτει από τον τρόπο λειτουργίας και τη χρήση της μηχανής, όπως παριστάνεται στο κάτωθεν διάγραμμα (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Ταξινόμηση των υδροδυναμικών μηχανών, με βάση την σκοπιμότητα εφαρμογής τους [48, εμπνευσμένο από Εικόνα 6.1, σελ.387].

- Τον **τύπο του περιβλήματος**, εάν δηλαδή, η πτερωτή βρίσκεται εσωτερικά του κατάλληλα διαμορφωμένου κελύφους (φυγοκεντρική αντλία, περιστροφική με οδοντωτούς τροχούς αντλία ή κινητήρας κλπ.) ή χωρίς κάποια προστασία, εκτεθειμένη στο εκάστοτε περιβάλλον (ανεμογεννήτρια, προπέλα σκάφους κλπ.)
- Τη **διεύθυνση της ροής**, η οποία εξαρτάται από τον σχεδιασμό του στροφείου (πτερωτή), καθορίζοντας έτσι εάν η διεύθυνση της ροής θα είναι αξονικής, ακτινικής ή μικτής (διαγώνια ή ακτινική και αξονική) μορφής.
- Τη **βαθμίδα της μηχανής**, εάν δηλαδή, είναι μονοβάθμια ή πολυβάθμια, κάτι που καθορίζεται εύκολα από τον αριθμό των στροφείων.

Ο βασικός προσδιορισμός μίας ρευστοδυναμικής μηχανής επιτυγχάνεται με τα έξι παραπάνω κριτήρια. Ωστόσο, οι ανάγκες της αγοράς για βελτιστοποίηση και υψηλή αποδοτικότητα στον κάθε τομέα έχει οδηγήσει στη συνεχή βελτίωση όλων των ρευστοδυναμικών συστημάτων. Για το λόγο αυτό η κατηγοριοποίηση των μηχανών αυτών δεν σταματάει εδώ αλλά συνεχώς εμπλουτίζεται. Οι υποκατηγορίες που προκύπτουν βασίζονται στον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς και σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες (εμβολοφόρες - παλινδρομικές μηχανές, αξονικές ή ακτινικές, στρόβιλοι δράσης ή αντίδρασης, περιστροφικές μηχανές με γρανάζια, λοβούς κ.α.).

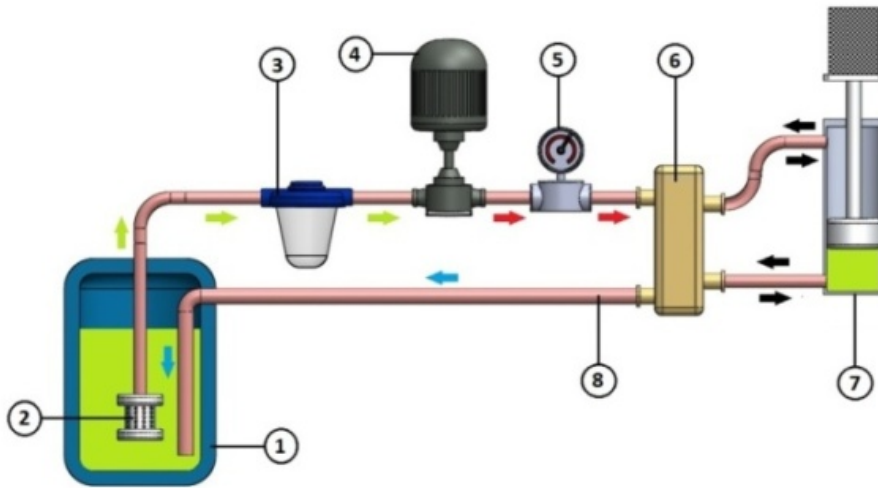
Οι ρευστοδυναμικές μηχανές αναλόγως τον κλάδο στον οποίο συναντώνται (γεωργία, ναυτιλία κ.α) ταξινομούνται σε διάφορες νέες δευτερεύουσες υποκατηγορίες και καμιά φορά συναντώνται με διαφορετική ορολογία από την ορθή. Τα κριτήρια των δευτερευουσών αυτών υποκατηγοριών είναι ποικίλα και καμιά φορά επαναλαμβανόμενα από κλάδο σε κλάδο. Μία συνοπτική παρουσίαση των κριτηρίων αυτών θα μπορούσε να θεωρηθεί η εξής:

- Οι **κατασκευαστικές λεπτομέρειες**, οι οποίες αυτή τη φορά έχουν να κάνουν κυρίως με τα διάφορα μηχανικά στοιχεία (έδρανα κύλισης, ελατήρια, μέγεθος αυλών κατάθλιψης και αναρρόφησης, η μορφή της περωτής κλπ.) που απαρτίζουν τη κάθε μηχανή και την κάνει να διαφοροποιείται έναντι κάποιας άλλης.
- Με τον **τρόπο λειτουργίας και χρήσης τους**, σε πιο πρακτικό επίπεδο όμως, εάν δηλαδή είναι εμβαπτιζόμενες (αντλίες μέσα σε δεξαμενές ή ντεπόζιτα καυσίμου κλπ.) ή όχι, εάν είναι εξαρτημένες (αποτελούν, δηλαδή, μέρος συνόλου και λειτουργούν με τη χρήση ιμάντων ή τροχαλιών, όπως είναι το σύνθητες στις μηχανές εσωτερικής καύσεως) ή ανεξάρτητες (εάν οι κίνηση τους οφείλεται σε εξωτερική πηγή ενέργειας), εάν είναι μηχανικές (παίρνουν κίνηση μηχανικά, από κάποιο περιστρεφόμενο μέρος) ή ηλεκτρικές (λαμβάνουν την εντολή με ηλεκτρικό τρόπο) κλπ.
- Με **το υλικό** ορισμένων στοιχείων, όπως είναι το υλικό της περωτής (εάν είναι από λάστιχο, από πλαστικό ή από μέταλλο), το υλικό του σώματος της ρευστοδυναμικής μηχανής κ.α., κάτι που εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας.

Όπως γίνεται αντιληπτό η κατηγοριοποίηση των ρευστοδυναμικών μηχανών είναι ιδιαίτερα ποικιλόμορφη και εκτενής. Το σύνολο των διαφόρων κατηγοριών και υποκατηγοριών που προκύπτουν θα μπορούσε εύκολα να παρομοιαστεί με γενεαλογικό δέντρο. Παρόλα αυτά η βασική κατηγοριοποίηση μπορεί να επιτευχθεί με τα βασικά έξι κριτήρια και τις άμεσες υποκατηγορίες που έχουν προκύψει μέσα από τη βελτιστοποίηση των συστημάτων αυτών.

3.2 Εισαγωγή στους ρευστοδυναμικούς κινητήρες

Οι αντλίες όπως και οι κινητήρες αποτελούν μέρος ενός ευρύτερου συνόλου το οποίο ονομάζεται ρευστοδυναμικό κύκλωμα (Εικόνα 3.3). Το κύκλωμα αυτό μπορεί να είναι υδραυλικό ή πνευματικό ανάλογα με το είδος του ρευστού που χρησιμοποιείται. Οι υδραυλικοί κινητήρες χρησιμοποιούν συνήθως βιομηχανικά λάδια και νερό και οι πνευματικοί κινητήρες χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα ή αέρια για την κίνησή τους [48]. Σε κάθε περίπτωση ο βαθμός απόδοσής τους εξαρτάται άμεσα από την απορρόφηση της μέγιστης δυνατής ενέργειας του κινητήριου ρευστού.



Εικόνα 3.3: Αναπαράσταση βασικού υδραυλικού συστήματος. (1) Δεξαμενή, (2) Φίλτρο συγκράτησης στερεών σωματιδίων, (3) Φίλτρο υδατοπαγίδας, (4) Θετικής μετατόπισης αντλία, συνδεδεμένη με ηλεκτροκινητήρα, (5) Ρυθμιστής πίεσης, (6) Βαλβίδα ελέγχου ροής, (7) Υδραυλικός κύλινδρος διπλής ενέργειας, για ανύψωση φορτίου και (8) Δίκτυο σωληνώσεων. (Πράσινο βέλος): Ροή παροχής υγρού, (Κόκκινο βέλος): Δίκτυο πεπιεσμένου υγρού, (Μαύρο βέλος): Δίκτυο λειτουργίας, εξαρτώμενο από τη βαλβίδα, (Μπλε βέλος): Δίκτυο επιστροφής.

Η οικογένεια των ρευστοδυναμικών μηχανών διακρίνεται σε δύο μεγάλες οικογένειες, στις εργομηχανές (γνωστές και ως αντλίες) και στους υδραυλικούς κινητήρες. Γνωστότερη εκ των δύο είναι η ομάδα των αντλιών, διότι χρησιμοποιείται ευρέως σε πλήθος καθημερινών εφαρμογών, όπως είναι ο τομέας της υδροδότησης και της καλλιέργειας. Οι εργομηχανές δεν είναι μόνο γνωστές για τη χρήση τους ως υδραντλίες αλλά και ως αεραντλίες, τους γνωστούς σε όλους ανεμιστήρες και συμπιεστές. Μάλιστα, οι αντλίες υγρών αποτελούν τον αρχαιότερο τύπο ρευστομηχανής που δημιουργήθηκε από τον άνθρωπο. Με την πάροδο του χρόνου οι αντλίες εξελίχθηκαν και κατατάχθηκαν σε πλήθος υποκατηγοριών, από τις οποίες η γνωστότερη με διαφορά είναι οι φυγοκεντρικές [49].

Η δεύτερη οικογένεια απαρτίζεται από τους υδραυλικούς κινητήρες ή αλλιώς τις δυναμομηχανές [49]. Η κατηγορία αυτή μπορεί να μην είναι ιδιαίτερα γνωστή στο ευρύ κοινό, όμως χρησιμοποιείται ευρέως σε πληθώρα μηχανολογικών εφαρμογών. Εκ πρώτης όψεως οι υδραυλικοί κινητήρες δεν παρουσιάζουν διακριτές διαφορές ως προς τις αντίστοιχες κατηγορίες αντλιών. Ωστόσο, διαθέτουν μία βασική διαφορά, η οποία βασίζεται στη φορά της κινητήριας ενέργειας.

Σε ένα υδραυλικό σύστημα η αντλία αποτελεί το στοιχείο εκείνο που προσδίδει στο εκάστοτε ρευστό την απαιτούμενη ροή και πίεση που αυτό χρειάζεται για να διακινηθεί από μία περιοχή σε μία άλλη. Στην περίπτωση αυτή η περιστροφή της ατράκτου και κατ'επέκταση των κινούμενων μερών (π.χ. πτερωτή, γρανάζια) είναι αποτέλεσμα της σύνδεσης της ατράκτου με μία εξωτερική πηγή ενέργειας (συνήθως ενός ηλεκτροκινητήρα). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη κατανάλωση έργου. Ενώ ο ρευστοδυναμικός κινητήρας αποτελεί το στοιχείο εκείνο που παραλαμβάνει το διακινούμενο ρευστό στις κατάλληλες συνθήκες που έχουν διαμορφωθεί από την αντλία και το σύνολο των υπολοίπων στοιχείων που απαρτίζουν το εκάστοτε δίκτυο (π.χ. ρυθμιστές πίεσης, βαλβίδες), με σκοπό την απόδοση επιθυμητής ταχύτητας περιστροφής και ροπής στην άτρακτο εξόδου. Συνήθως στην άκρη της ατράκτου είναι άμεσα ή έμμεσα συνδεδεμένο κάποιο φορτίο. Σε αυτή τη περίπτωση παράγεται έργο[50].

Ως ρευστοδυναμικοί κινητήρες ονομάζονται οι ρευστοδυναμικές μηχανές όπου η κινητήρια ενέργεια τους πηγάζει από το ίδιο το ρευστό, προσδίδουν συνεχόμενη περιστροφική κίνηση στην άτρακτο εξόδου τους και δεν καταναλώνουν αλλά αποδίδουν μηχανικό έργο σε ένα άλλο υποσύστημα ή σύστημα, μέσω της μετατροπής της υδραυλικής ισχύος σε μηχανική. Το είδος αλλά και η μορφή των δυνάμεων που ευθύνονται για την περιστροφή της ατράκτου, εξαρτώνται σε κάθε περίπτωση από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου ρευστοδυναμικού κινητήρα [51].

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων είναι η ακριβώς αντίθετη αυτής των εργομηχανών. Η αρχή λειτουργίας ενός ρευστοδυναμικού κινητήρα ορίζεται ως εξής: το ρευστό υπό πίεση δρα επί των κατάλληλων στοιχείων δημιουργώντας μία περιφερειακή δύναμη, η οποία προσδίδει κινητήρια στρεπτική ροπή στην άτρακτο του κινητήρα [51].

Το περιβάλλον στο οποίο έρχεται να λειτουργήσει ένας ρευστοδυναμικός κινητήρας είναι ιδιαίτερα απαιτητικό συγκριτικά με αυτό μίας αντλίας. Οι υψηλές αντιστάσεις που πρέπει να ξεπεραστούν κατά την εκκίνηση του, είναι ένα από τα

βασικότερα εμπόδια. Κατά την εκκίνηση του οι αντιστάσεις που πρέπει να υπερνικηθούν είναι αρκετές και σχετίζονται άμεσα με την τριβή των διάφορων μηχανικών στοιχείων, την αντίσταση λόγω του ιξώδους του υγρού, την αδράνεια των περιστρεφόμενων ή παλινδρομικών εξαρτημάτων του, καθώς και την αντίσταση που προκύπτει λόγω των εξωτερικών φορτίων που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με την άτρακτο εξόδου του. Είναι πολύ σημαντικό ο κινητήρας να μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη ροπή για την εκκίνηση του φορτίου, η οποία να σημειωθεί είναι μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται για τη διατήρηση της κίνησης του φορτίου. Όταν όμως αποκτηθεί η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας οι δυνάμεις αντίστασης που προϋπήρχαν μειώνονται σε μια χαμηλότερη ομοιόμορφη τιμή. Η ανάπτυξη της επιθυμητής ροπής είναι κρίσιμος παράγοντας, όχι μόνον κατά την εκκίνηση και για την διατήρηση της κίνησης του φορτίου, αλλά και για την αποφυγή του φαινομένου της πλάγιας φόρτισης στην άτρακτο ή στο έμβολο. Συνοψίζοντας, από τη στιγμή που ένας ρευστοδυναμικός κινητήρας παρέχει μηχανική ενέργεια σε ένα φορτίο, θα πρέπει να απορροφά τη μέγιστη ενέργεια από το ρευστό και αντίστοιχα να καταναλώνει την ελάχιστη δυνατή, ώστε να υπερνικά τις όποιες μηχανικές απώλειες. Στους κινητήρες δίδεται έμφαση στη μηχανική απόδοση, έναντι της ογκομετρικής απόδοσης που απασχολεί στην περίπτωση των αντλιών [52].

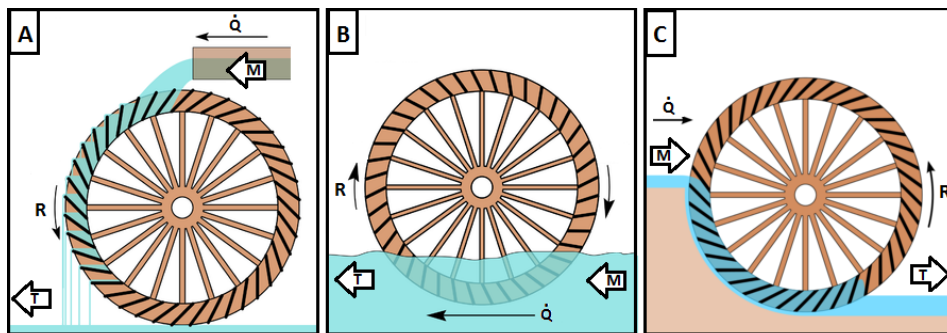
Είναι λογικό, λοιπόν, το υλικό κατασκευής των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν έναν κινητήρα, παρόλη την ομοιότητα που διαθέτουν με τα αντίστοιχα μίας αντλίας, να διαφέρουν. Η φύση των εφαρμογών που έρχονται να αντιμετωπίσουν είναι τελείως διαφορετική και για αυτό το λόγο οι συνθήκες και το περιβάλλον λειτουργίας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή των υλικών. Μερικά από τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής που χρησιμοποιούνται είναι ο χυτοσίδηρος, ο ελατός χυτοσίδηρος, ο ορείχαλκος, ο χάλυβας και ο ανοξείδωτος χάλυβας [50].

Οι υδροδυναμικές μηχανές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, στους στροβίλους (υδραυλικοί τροχοί και στροβιλομηχανές) και στους κινητήρες θετικής μετατοπίσεως (εμβολοφόροι - παλινδρομικοί και περιστροφικοί κινητήρες).

3.3 Παρουσίαση ρευστοδυναμικών κινητήρων

3.3.1 Υδραυλικοί τροχοί

Οι υδραυλικοί τροχοί εκπροσωπούν τον αρχαιότερο τύπο υδραυλικού κινητήρα που επινόησε ο άνθρωπος για να μετατρέψει τη δύναμη του νερού σε ωφέλιμο έργο. Αποτελούν κυρίως βαρέως τύπου κατασκευές, μικρής ισχύος με βραδύστροφους τροχούς, εύρους 4 έως 8 RPM. Οι υδραυλικοί αυτοί κινητήρες προσαρμόζονται σε μικρού ύψους υδατοπτώσεις ή σε νερά ποταμών. Οι κατασκευές αυτές συναντώνται κυρίως σε μη ανεπτυγμένες χώρες, συνήθως ως μέσο τροφοδοσίας νερού. Παρόλο που στο σύγχρονο κόσμο η μεταφορά του νερού γίνεται με άλλα μέσα, οι κατασκευές αυτές δεν έχουν τελείως εξαλείψει. Οι πρώτοι υδραυλικοί τροχοί μπορεί να θεωρηθούν ως τεχνολογικά επιτεύγματα μίας άλλης εποχής, ωστόσο, με την πάροδο της εξέλιξης άλλαξαν μορφή και πλέον αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [48].



Εικόνα 3.4: Αναπαράσταση των τριών τύπων υδραυλικών τροχών, με τη σειρά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επεξήγηση συμβόλων: \dot{Q} Παροχή νερού, R Φορά περιστροφής τροχού, M (Millrace) Κανάλι εισαγωγής νερού, T (Tailrace) Κανάλι εξαγωγής νερού [53].

Ανάλογα τον τρόπο πρόσληψης του νερού επί του τροχού τους οι υδραυλικοί τροχοί διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία το νερό δρα πάνω στο υψηλότερο σημείο του περιστρεφόμενου τροχού (Εικόνα 3.4: Α). Σε αυτή τη περίπτωση το σύστημα αποδίδει τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, ο οποίος κυμαίνεται στο 70 με 80 τις εκατό(%). Στην δεύτερη κατηγορία, το νερό δρα στο κατώτερο σημείο του περιστρεφόμενου τροχού (Εικόνα 3.4: Β). Σε αυτή τη περίπτωση το σύστημα αποδίδει τον μικρότερο βαθμό απόδοσης, ο οποίος κυμαίνεται στο 30 με 40 τις εκατό(%). Στην τρίτη κατηγορία, το νερό δρα πλευρικά στον υδραυλικό τροχό (Εικόνα 3.4: Γ). Σε αυτή τη περίπτωση ο βαθμό απόδοσης του συστήματος κυμαίνεται στο 40 με 60 τις εκατό(%) [48].

Ανεξάρτητα από το σημείο πρόσληψης του νερού πάνω στον υδραυλικό τροχό, οι διακυμάνσεις στα ποσοστά επί τις εκατό του εκάστοτε βαθμού απόδοσης, που συναντώνται σε κάθε περίπτωση οφείλονται κυρίως στη γεωμετρία των πτερυγίων του τροχού. Ανάλογα, δηλαδή, με το αν τα πτερύγια είναι ευθύγραμμα και την κλίση αυτών επί του τροχού και με το αν είναι καμπύλα [48].

3.3.2 Στροβιλοκινητήρες

Οι στροβιλοκινητήρες ανάλογα με το κινητήριο μέσο που χρησιμοποιούν διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, στους υδροστροβίλους (νερό), στους ατμοστροβίλους (ατμός), στους αεριοστροβίλους (αέριο) και στους ανεμοκινητήρες (αέρας).

Οι **υδροστροβίλοι** είναι κινητήριες ρευστοδυναμικές μηχανές εκμετάλλευσης της ροϊκής ενέργειας του νερού και αποτελούν την εξέλιξη των υδραυλικών τροχών. Πλέον δεν χρησιμοποιούνται μόνο για τη διανομή πόσιμου νερού (στροβιλοαντλίες), αλλά ταυτόχρονα και για τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Αποτελούν βασικό στέλεχος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε όλες τις υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Όλοι οι υδροστροβίλοι περιστρέφονται χρησιμοποιώντας την κινητική ενέργεια του νερού, είτε άμεσα χρησιμοποιώντας τη φυσική ροή κάποιου ποταμιού είτε έμμεσα από κάποια τεχνητή λίμνη μέσω αγωγού προσαγωγής (σε αυτή τη περίπτωση τα πτερύγια του υδροστροβίλου βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο από τη στάθμη της λίμνης) [49].

Οι υδροστροβίλοι, ανάλογα με τον τρόπο απομάστευσης της ενέργειας του νερού, διακρίνονται σε δράσης και σε αντίδρασης. Οι στροβίλοι δράσης απαρτίζονται από τους Pelton, Turgo και Crossflow (ή Banki - Mitchell), με επικρατέστερο τον πρώτο τύπο. Οι στροβίλοι αντίδρασης απαρτίζονται από τους Francis, Kaplan και Buble [48, 49].

Οι **ατμοστροβίλοι** είναι κινητήριες ρευστοδυναμικές μηχανές, που λειτουργούν με υδρατμό σε υψηλές πιέσεις και υψηλές θερμοκρασίες. Ο υδρατμός αυτός παράγεται σε ατμοπαραγωγούς με υπερθέρμανση του νερού σε εστίες και λέβητες με τη χρήση κατά κανόνα ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, λιγνίτη κ.α.). Μεταξύ των ρευστοδυναμικών κινητήρων διαθέτουν με διαφορά τη μεγαλύτερη δυνατότητα παραγωγής ισχύος. Για τον λόγο αυτό το περισσότερο από τα τρία τέταρτα των παγκόσμιων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται με

ηλεκτροπαραγωγή από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, όπου στην πλειονότητά τους οι ηλεκτρογεννήτριες σε αυτούς τους σταθμούς κινούνται με τη χρήση ατμοστροβίλων. Παλαιότερα οι ατμοστρόβιλοι συνέβαλαν στη κίνηση των πλοίων, πλέον όμως έχουν παραχωρήσει τη θέση τους στους αεριοστρόβιλους και η χρήση τους επεκτείνεται σε μόνιμες και σταθερές εγκαταστάσεις [49].

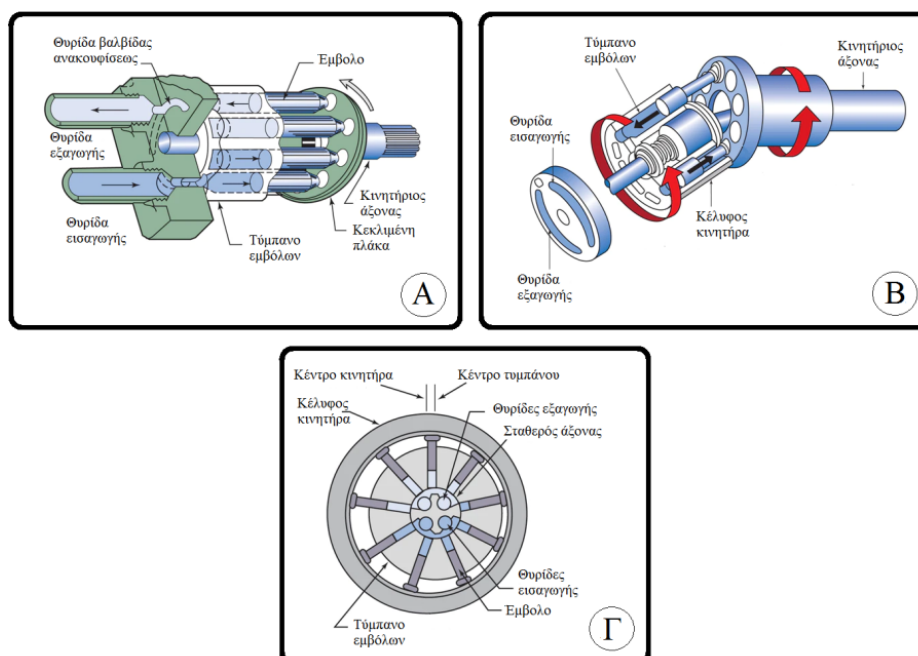
Οι **αεριοστρόβιλοι** λειτουργούν υπό παρόμοιες συνθήκες ροής με τους ατμοστροβίλους. Μάλιστα τα καυσαέρια των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή του υδρατμού στους ατμοστροβίλους αποτελούν το κινητήριο μέσο τους. Τα καυσαέρια αυτά καίγονται με αέρα υψηλής πίεσης παραγόμενης από συμπιεστές [49].

Οι **ανεμοκινητήρες** αποτελούν κινητήρες αέρα, οι οποίοι είναι γνωστοί ως ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, μία πιο ορθολογική ονομασία είναι οι ανεμοστρόβιλοι ή αεροστρόβιλοι [49]. Οι ανεμοκινητήρες όπως και οι υδροστρόβιλοι αποτελούν έναν από τους βασικούς πυλώνες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αναλόγως του τρόπου λειτουργίας και του σχεδιασμού τους διακρίνονται σε δύο κύριους τύπους, σε εκείνους με οριζόντιο και σε αυτούς με κατακόρυφο άξονα. Στην περίπτωση του οριζοντίου άξονα, ο άξονας του δρομέα ή έλικα περιστρέφεται παράλληλα στη διεύθυνση του ανέμου. Ενώ στη περίπτωση του κάθετου άξονα, ο άξονας του δρομέα περιστρέφεται κάθετα στη πορεία του ανέμου. Παρόλες τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές διαφορές τους, ο κύριος τρόπος λειτουργίας τους δεν διαφέρει. Η ενέργεια που διαθέτει το φυσικό ρεύμα αέρα, όταν έρχεται σε επαφή με τα πτερύγια και τα αναγκάζει να περιστραφούν, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, η οποία με τη σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρική, εξαιτίας της κατάλληλα προσαρμοσμένης ηλεκτρογεννήτριας στην άκρη του δρομέα. Στην Ελλάδα ο συνηθέστερος τύπος ανεμοκινητήρα που συναντάται είναι αυτός του οριζοντίου άξονα [54].

3.3.3 Εμβολοφόροι – Παλινδρομικοί κινητήρες

Οι εμβολοφόροι κινητήρες ανήκουν στην ομάδα των ρευστοδυναμικών κινητήριων μηχανών θετικής μετατοπίσεως. Τα βασικά μέρη που συγκροτούν αυτούς τους κινητήρες είναι το κέλυφος με τις θυρίδες εισόδου και εξόδου του ρευστού, η κινητήρια άτρακτος εξόδου, τα έμβολα και το τύμπανο που φέρει τις εσοχές των εμβόλων [51]. Ανάλογα με το είδος του εμβολοφόρου κινητήρα η άτρακτος εξόδου και το τύμπανο με τις εσοχές διαφοροποιούνται.

Οι κινητήρες αυτοί αποτελούνται από αξονικά ή από ακτινικά έμβολα και εξασφαλίζουν συνεχή περιστροφή στην άτρακτο εξόδου τους. Στην κατηγορία των αξονικών εμβόλων οι κινητήρες χωρίζονται σε κεκλιμένης πλάκας (Εικόνα 3.5: Α) και κυρτού άξονα (Εικόνα 3.5: Β). Στην κατηγορία των ακτινικών εμβόλων οι κινητήρες χαρακτηρίζονται ως περιστρεφόμενου τυμπάνου (Εικόνα 3.5: Γ) [52]. Σε κάθε περίπτωση η αρχή λειτουργίας παραμένει η ίδια, το κινητήριο μέσο εισέρχεται υπό πίεση στο εσωτερικό των υποδοχών του τυμπάνου και ωθεί τα έμβολα προς την κεκλιμένη πλάκα ή προς την άτρακτο εξόδου, στην περίπτωση του κυρτού άξονα ή προς το κέλυφος του κινητήρα, στην περίπτωση των ακτινικών εμβόλων. Με αυτόν τον τρόπο τα ωθούμενα έμβολα αποδίδουν ροπή στην κινητήρια άτρακτο της μηχανής [55].



Εικόνα 3.5: Κατηγορίες υδραυλικών εμβολοφόρων κινητήρων [55, Εικόνα 6, 7, 8].

Βρίσκουν κυρίως εφαρμογή σε μεσαίους και βαρέως τύπου κινητήρες, διότι μπορούν να παρέχουν υψηλά επίπεδα ροπών, ταχύτητας και ισχύος. Σε γενικές γραμμές μπορούν να λειτουργούν σε εύρος ταχυτήτων από 10 έως 5000rpm, δίνοντας σταθερή ροπή στην έξοδο τους. Συγκριτικά με άλλους κινητήρες ανήκουν στην κατηγορία με τους πιο αποδοτικούς και πιο μικρούς σε μέγεθος, αλλά ταυτόχρονα και στους πιο κοστοβόρους, ως προς την κατασκευή τους. Η χρήση των εμβολοφόρων - παλινδρομικών κινητήρων είναι ευρέως διαδεδομένη στα συστήματα αυτόματου ελέγχου. Μερικά από τα συστήματα στα οποία αξιοποιούνται είναι στις πρέσες, στα διάφορα μικρά ανυψωτικά, στα φρένα κ.α [50].

3.3.4 Περιστροφικοί κινητήρες

Οι περιστροφικοί κινητήρες αποτελούν θετικής μετατοπίσεως ρευστοδυναμικές μηχανές και μαζί με τις εμβολοφόρες ανήκουν στην οικογένεια των υδραυλικών επενεργητών. Οι κινητήρες αυτοί διακρίνονται, στους κινητήρες με πτερύγια και στους κινητήρες με οδοντωτούς τροχούς.

Ένας **περιστροφικός πτερυγιοφόρος κινητήρας** αποτελείται από τον στροφέα, τα πτερύγια, την άτρακτο, το κέλυφος, και δύο διόδους εισόδου και εξόδου. Η λειτουργία του βασίζεται στη στρεπτική ροπή που δημιουργείται από την πίεση που ασκείται επί των πτερυγίων, η οποία ασκεί μία δύναμη σε κάποια ακτίνα επί της άτρακτου. Η αναπτυσσόμενη αυτή περιστροφική δύναμη στην άτρακτο εξαρτάται άμεσα από την επιφάνεια των πτερυγίων, την πίεση λειτουργίας (την πίεση, δηλαδή, που δημιουργείται στην είσοδο του κινητήρα), την πρόσφυση και την στεγάνωση που επιτυγχάνεται μεταξύ των πτερυγίων και της εσωτερικής επιφάνειας του κελύφους. Για την επίτευξη της απαραίτητης πρόσφυσης και στεγάνωσης, χρησιμοποιείται συνήθως ένα ελατήριο ή κάποιο ενεργοποιημένο υδραυλικό ρευστό στο κάτω μέρος του πτερυγίου. Με αυτό τον τρόπο το εκάστοτε πτερύγιο ωθείται προς την εσωτερική επιφάνεια του κελύφους (Εικόνα 3.6) [51].



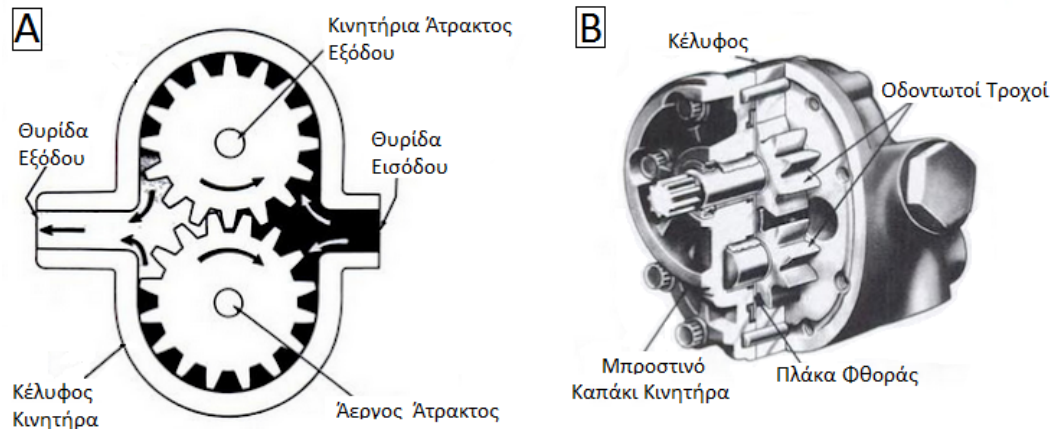
Εικόνα 3.6: Περιστροφικός υδραυλικός κινητήρας με πτερύγια, σε τομή. Χρήση ελατηρίων για το σπρώξιμο των πτερυγίων προς την εσωτερική επιφάνεια του κελύφους [56].

Οι υδραυλικοί κινητήρες με πτερύγια παρουσιάζουν εξαιρετική λειτουργία σε πολύ χαμηλές αλλά και υψηλές ταχύτητες, πιο συγκεκριμένα στο εύρος 20 έως 6000 rpm. Σημαντικό πλεονέκτημα για την επιλογή τους αποτελεί η ικανότητα τους για αμφίδρομη λειτουργία. Συγκριτικά με τους υπόλοιπους υδραυλικούς κινητήρες θετικής μετατοπίσεως, εκπέμπουν τα χαμηλότερα επίπεδα θορύβου κατά τη

λειτουργία τους. Το κατασκευαστικό κόστος τους είναι λιγότερο από αυτό των εμβολοφόρων, αλλά υψηλότερο των κινητήρων με οδοντωτούς τροχούς. Ωστόσο, αποτελούν τους πιο ευαίσθητους κινητήρες ως προς το φαινόμενο της μόλυνσης του ρευστού (fluid contamination) και στις εσωτερικές διαρροές, ειδικά κατά την λειτουργία τους στις χαμηλές στροφές. Ο ολικός βαθμός απόδοσης τους είναι μικρότερος σε σχέση με αυτόν των εμβολοφόρων. Η διάρκεια ζωής τους είναι μεγαλύτερη αυτής των κινητήρων με οδοντωτούς τροχούς και μικρότερη αυτής των εμβολοφόρων. Οι κινητήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως στον βιομηχανικό τομέα σε υδραυλικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα συναντώνται ευρέως σε εργαλεία μηχανών κατεργασίας, μηχανές χύτευσης πλαστικού με έγχυση, σε βαρούλκα/παλάγκα κ.α [50].

Οι **περιστροφικοί κινητήρες με οδοντωτούς τροχούς**, ανήκουν στους κινητήρες θετικής μετατοπίσεως και διακρίνονται σε δύο τύπους, σε εκείνους με εξωτερική και σε αυτούς με εσωτερική οδόντωση. Ανεξαρτήτως του τύπου όλοι οι κινητήρες με οδοντώσεις αναπτύσσουν στρεπτική ροπή στην άτρακτο εξόδου τους, εξαιτίας της δράσης πίεσης του ρευστού επί των οδόντων. Τα βασικά στοιχεία που αποτελούν έναν τέτοιο κινητήρα είναι οι δίοδοι εισόδου και εξόδου του εργαζόμενου μέσου, το κέλυφος και τα περιστρεφόμενα μέρη που είναι συνήθως δύο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί, όπου ο ένας εκ των οποίων συνδέεται με την άτρακτο του κινητήρα [51]. Σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων υδραυλικών κινητήρων θετικής μετατοπίσεως είναι η ανοχή που επιδεικνύουν στο φαινόμενο της μόλυνσης του κινητήριου ρευστού (fluid contamination) [50]. Εξαιτίας της διαφορετικής διάταξης αλλά και της μορφής των οδοντωτών τροχών, ο τρόπος δημιουργίας της στρεπτικής ροπής που αναπτύσσεται διαφέρει σε κάθε περίπτωση.

Στην περίπτωση των οδοντωτών τροχών με **εξωτερική οδόντωση** (Εικόνα 3.7: Α), το υπό πίεση ρευστό, που εισέρχεται μέσω της θυρίδας εισόδου στο εσωτερικό του κινητήρα, αναγκάζει σε περιστροφή το ζευγάρι των γραναζιών, καθώς κινείται στην περιφέρεια του κελύφους. Στη συνέχεια εξέρχεται από την θυρίδα εξόδου με πίεση αισθητά χαμηλότερη αυτής που είχε κατά την είσοδο του [50].



Εικόνα 3.7: (Α) Αναπαράσταση της διαδρομής που ακολουθεί το ρευστό εντός του κελύφους. (Β) Αναπαράσταση περιστροφικού κινητήρα με εξωτερική οδόντωση, σε τομή [57].

Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης αυτών των συστημάτων επιτυγχάνεται μέσω της όσο το δυνατόν καλύτερης εμπλοκής μεταξύ των οδόντων αλλά και της ελάχιστης δυνατής ανοχής που οι οδόντες δημιουργούν με την εσωτερική επιφάνεια του κελύφους (Εικόνα 3.7: Β). Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, ελέγχεται όσο το δυνατόν καλύτερα η προκαθορισμένη πορεία του ρευστού, αποφεύγοντας σε μεγάλο βαθμό τις εσωτερικές διαρροές [50].

Συγκριτικά με τους υπόλοιπους κινητήρες θετικής μετατοπίσεως οι περιστροφικοί κινητήρες με εξωτερική οδόντωση συντελούν συμπαγείς και ιδιαίτερα ανθεκτικές κινητήριες μηχανές. Το κατασκευαστικό κόστος τους κατατάσσεται αρκετά χαμηλότερα από αυτό των εμβολοφόρων και πτερυγιοφόρων κινητήρων, διότι δεν αποτελούν ιδιαίτερα σύνθετες κατασκευές. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που απαιτείται απόδοση υψηλών ταχυτήτων και χαμηλών ροπών στην κινητήρια άτρακτο εξόδου τους (HSLT - High Speed Low Torque motors). Η ικανότητα τους για αμφίδρομη λειτουργία περιστροφής τους καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικούς ως προς την αξιοποίησή τους. Παρόλα αυτά, αποτελούν τους λιγότερο αποδοτικούς και πιο θορυβώδεις κινητήρες [50].

Ο δεύτερος τύπος περιστροφικού κινητήρα με οδοντωτούς τροχούς είναι αυτός με **εσωτερικής οδόντωσης τροχούς** (Gerotor ή Generated Rotor). Οι κινητήρες αυτού του τύπου έκαναν την πρώτη εμφάνισή τους λίγο νωρίτερα από το 19^ο αιώνα. Αρκετοί ήταν μάλιστα οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με τη δημιουργία και τη βελτιστοποίησή τους, ξεχωρίζει όμως ο Myron F. Hill, ο οποίος αποκαλείται και πατέρας της βασικής γεωμετρικής αρχής των κινητήρων αυτών. Ένας τέτοιος κινητήρας αποτελείται από ένα ζευγάρι οδοντωτών τροχών εσωτερικής και εξωτερικής οδόντωσης. Ο οδοντωτός τροχός με την εξωτερική οδόντωση ονομάζεται

ρότορας και τοποθετείται εσωτερικά του οδοντωτού τροχού με την εσωτερική οδόντωση. Το γρανάζι με την εσωτερική οδόντωση χαρακτηρίζεται ως εξωτερικός οδοντωτός τροχός και ονομάζεται στάτορας. Εξαιτίας του τρόπου συνεργασίας τους, το σύστημα των οδοντωτών τροχών συχνά αποκαλείται ως πλανητικό σύστημα γραναζιών [50].

Οι κινητήρες αυτοί ακολουθούν τέσσερις βασικούς σχεδιαστικούς κανόνες. Ο πρώτος αφορά την έκκεντρη θέση που καταλαμβάνει στον εσωτερικό χώρο ο ρότορας σε σχέση με το κέντρο του στάτορα. Βέβαια η έκκεντρη κίνηση που πραγματοποιείται στο εσωτερικό του στάτορα διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα. Ο δεύτερος κανόνας σχετίζεται με τον αριθμό των δοντιών που διαθέτει το συνεργαζόμενο ζευγάρι των οδοντωτών τροχών. Ο εξωτερικός οδοντωτός τροχός απαρτίζεται από N δόντια και ο εσωτερικός τροχός από $N-1$ δόντια. Ο ρότορας, δηλαδή, διαθέτει ένα λιγότερο δόντι συγκριτικά με τον στάτορα. Ο τρίτος κανόνας αφορά τη συνεχή σύμπλεξη που παρουσιάζει η εξωτερική οδόντωση του ρότορα με την εσωτερική οδόντωση του στάτορα. Τέλος, ο τέταρτος κανόνας αφορά την επιφάνεια φόρτισης, η οποία εξαιτίας της καμπύλης γεωμετρίας των οδοντώσεων, είναι σε κάθε περίπτωση σημειακή.

Αυτοί οι κινητήρες είναι γνωστοί για την ικανότητά τους να παρέχουν αξιοσημείωτα επίπεδα ισχύος, λειτουργώντας σε χαμηλές ταχύτητες, αποδίδοντας υψηλά επίπεδα ροπής (LSHT - Low Speed High Torque motors) και εφόσον χρειαστεί μπορούν να παρέχουν αμφίδρομη περιστροφική κίνηση. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές στον βιομηχανικό και κατασκευαστικό τομέα, βρίσκοντας πεδίο δράσης σε οποιαδήποτε εφαρμογή ανύψωσης και χειρισμού εργαλείων ή υλικών. Ορισμένα παραδείγματα χρήσης που συναντώνται είναι στα μηχανήματα πλαστικής χύτευσης με έγχυση, σε συστήματα αλλαγής εργαλείων σε εργαλειομηχανές CNC, στους εκσκαφείς στο σύστημα περιστροφής των δαγκάνων κ.α. [50].

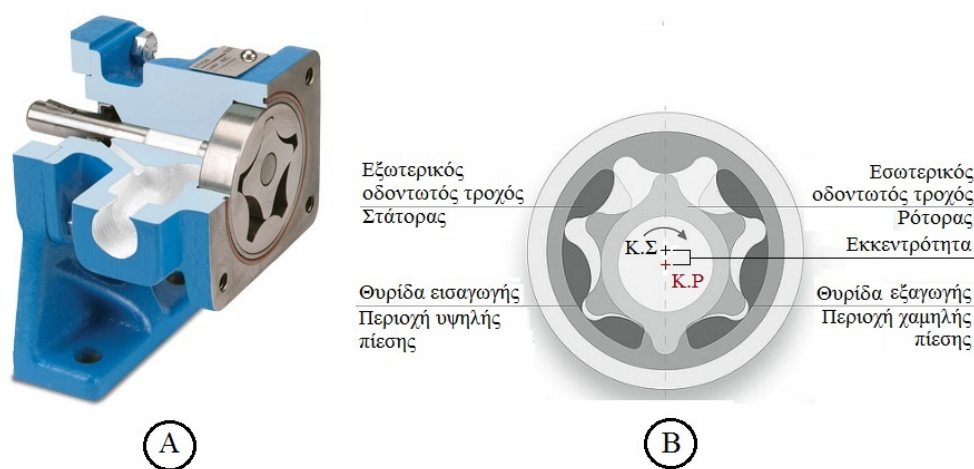
3.4 Τύποι περιστροφικών κινητήρων εσωτερικής οδόντωσης

Οι κινητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε πλήθος καθημερινών μηχανολογικών εργασιών. Για το λόγο αυτό η ανάγκη για τη συνεχή βελτιστοποίηση τους είναι μεγάλη. Από τη δημιουργία του πρώτου κινητήρα αυτού του είδους μέχρι και σήμερα έχει καταγραφεί ένας ιδιαίτερα εκτενής αριθμός πατεντών. Παρόλα αυτά η κύρια ταξινόμηση τους στηρίζεται κατά βάση στο τρόπο της σύμπλεξης και της συνεργασίας του ζευγαριού των οδοντωτών τροχών, από την οποία προκύπτουν τέσσερις βασικοί τύποι:

- Οι κινητήρες με περιστρεφόμενο στάτορα (Direct - drive gerotor motor).
- Οι κινητήρες με σταθερό στάτορα (Orbital gerotor motor).
- Οι κινητήρες σταθερού στάτορα με προσαρμοσμένους κυλίνδρους ολίσθησης (geroler).
- Οι κινητήρες σταθερού στάτορα με ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι (Orbital gerotor motor with floating outer ring).

3.4.1 Κινητήρας με περιστρεφόμενο στάτορα

Στην πρώτη κατηγορία τοποθετείται ο περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης με περιστρεφόμενο στάτορα (Direct - drive gerotor motor) [55]. Αυτός ο τύπος αποτελεί τη βασικότερη μορφή εσωτερικής οδόντωσης που συναντάται στις εργομηχανές. Η χρήση του δε ως κινητήρα έχει παραγκωνιστεί από τα υπόλοιπα πιο βελτιωμένα συστήματα που έχουν προκύψει και παρουσιάζονται στη συνέχεια.



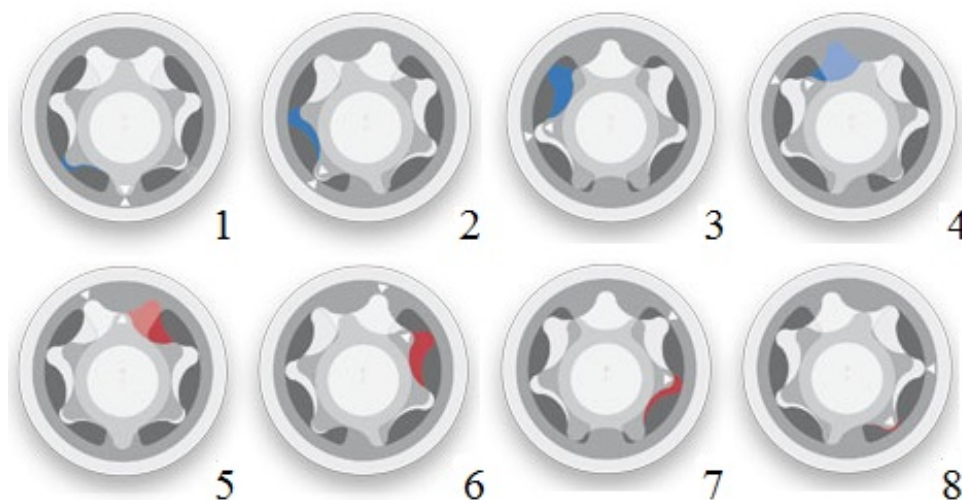
Εικόνα 3.8: (Α) Περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης με περιστρεφόμενο στάτορα σε τομή και (Β) Σύμπλεξη οδόντωσης [58, 59].

Τα βασικά μέρη που αποτελούν αυτόν τον τύπο κινητήρα (Εικόνα 3.8: A) είναι το συνεργαζόμενο ζευγάρι εσωτερικού και εξωτερικού οδοντωτού τροχού, η άτρακτος εξόδου του κινητήρα που συνδέεται με το εσωτερικό γρανάζι (ρότορα) και το σώμα του κινητήρα με τις εξωτερικές και τις εσωτερικές θυρίδες εισόδου και εξόδου του ρευστού. Οι εσωτερικοί δίοδοι διαθέτουν σχήμα νεφρού (kidney shaped ports), βρίσκονται στη πλάτη των οδοντωτών τροχών και αποτελούν είτε μέρος του σώματος του κινητήρα είτε μέρος κάποιου αφαιρούμενου αποστάτη διανομής (Εικόνα 3.8: B). Οι θυρίδες αυτές δεν διαθέτουν ομοιόμορφο σχήμα, αλλά πλαταιίνουν από κάτω προς τα πάνω, παρουσιάζοντας το φαρδύτερο τμήμα τους πλησίον της περιοχής που σχηματίζεται ο μέγιστος θάλαμος ρευστού ανάμεσα στο στάτορα και στο ρότορα. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η τροφοδοσία των αρχικών - μικρών σχηματιζόμενων θαλάμων και των μεγαλύτερων στη συνέχεια θαλάμων με την επιθυμητή ποσότητα ρευστού. Αντιστοίχως επιτυγχάνεται η σταδιακή και αρκετά ελεγχόμενη αποστράγγιση του σχηματισμένου θυλακίου από τη στιγμή που αυτό αρχίζει να συρρικνώνεται. Το κέντρο της ατράκτου είναι διαφορετικό από αυτό του εξωτερικού γραναζιού (στάτορα) και συμπίπτει με το κέντρο του ρότορα, προσδίδοντας του την επιθυμητή εκκεντρότητα (Εικόνα 3.8: B). Τα δόντια κάθε οδοντωτού τροχού έχουν συγκεκριμένη γεωμετρία, με αποτέλεσμα κάθε δόντι του ρότορα να βρίσκεται σε συνεχή επαφή με κάποιο δόντι ή εγκοπή του στάτορα [55].

Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται υδραυλικός κινητήρας με 7 δόντια στον εξωτερικό και 6 δόντια στον εσωτερικό οδοντωτό τροχό. Η κατανομή της πίεσης σε αυτόν τον συνδυασμό οδόντων διακρίνεται σε δύο περιοχές, μία υψηλής και μία χαμηλής πίεσης. Η υψηλής πίεσης περιοχή αποτελείται από τους τρεις διαδοχικούς θαλάμους ρευστού που σχηματίζονται στο άκρο της θυρίδας εισόδου και η χαμηλής πίεσης περιοχή από τους άλλους τρεις διαδοχικούς θαλάμους που βρίσκονται από τη μεριά της θυρίδας εξόδου [55]. Οι περιοχές πιέσεων σχετίζονται άμεσα από τους θαλάμους ρευστού, για αυτό και τροποποιούνται στην περίπτωση κάποιου άλλου συνδυασμού οδόντων.

Ο κύκλος λειτουργίας αρχίζει όταν το υψηλής πίεσης ρευστό διανέμεται διαμέσου της θυρίδας εισόδου στο εσωτερικό τμήμα του κινητήρα. Το κινητήριο ρευστό ρέει μέσα από τους διαδοχικούς θαλάμους που σχηματίζονται μεταξύ των δοντιών του εσωτερικού και εξωτερικού γραναζιού (Εικόνα 3.9: 1-4). Εν συνεχεία οδηγείται σταδιακά προς τη θυρίδα εξαγωγής (Εικόνα 3.9: 5-8) και από εκεί πίσω στη δεξαμενή εναπόθεσης. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.9)

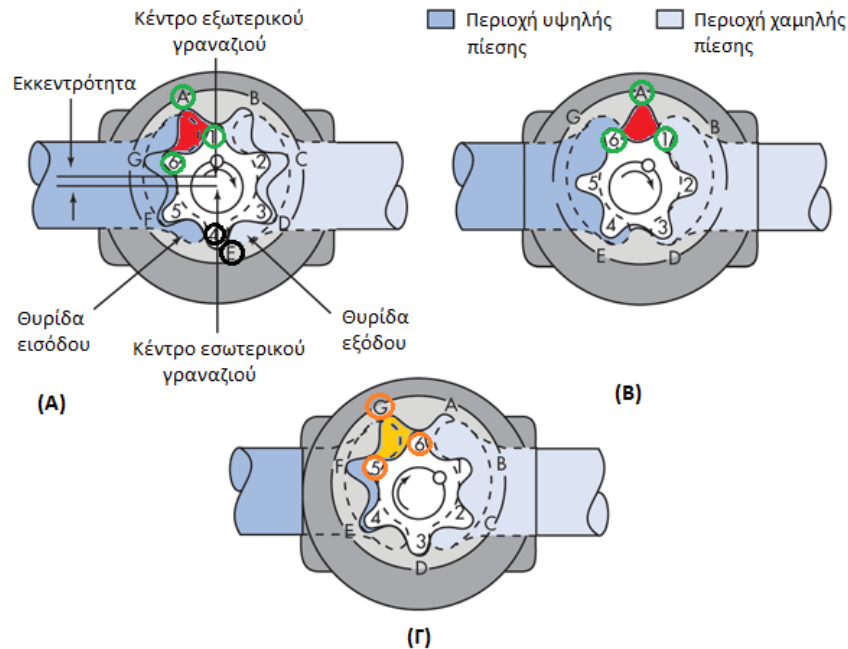
παράλληλα με την περιστροφή του ρότορα περιστρέφεται και ο στάτορας. Επειδή όμως το εσωτερικό γρανάζι διαθέτει ένα λιγότερο δόντι έναντι του εξωτερικού η περιστροφική του κίνηση προηγείται κατά ένα δόντι ανά περιστροφή (Εικόνα 3.9: 8) [55].



Εικόνα 3.9: Κύκλος λειτουργίας, (1-4): Περιοχή υψηλής πίεσης (είσοδος), (5-8): Περιοχή χαμηλής πίεσης (έξοδος) [59].

Πιο συγκεκριμένα με την εισαγωγή του κινητήριου ρευστού δια μέσου της θυρίδας εισόδου στο εσωτερικό του κινητήρα (Εικόνα 3.10: Α), εξαιτίας του ενός λιγότερου δοντιού καθώς και της εκκεντρότητας που διαμορφώνεται ανάμεσα στα δύο γρανάζια, δημιουργείται ένα θυλάκιο μεταξύ των κορυφών 1 και 6 του ρότορα και της εγκοπής Α του στάτορα (κόκκινη περιοχή). Ταυτόχρονα η κορυφή 4 ενός από τα δόντια του ρότορα βρίσκεται σε πλήρη ευθυγράμμιση με το κέντρο του εξωτερικού γραναζιού, που τυγχάνει να είναι η κοιλάδα Ε. Σε εκείνο το σημείο σχηματίζεται ο μικρότερος θάλαμος ρευστού. Το σχήμα της θυρίδας εισόδου είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το μέγεθος και την περιοχή αυτού του δημιουργούμενου θυλακίου (κόκκινη περιοχή). Η θυρίδα είναι σχεδιασμένη κατά αυτόν τον τρόπο, ώστε όταν το κέντρο του θυλακίου ευθυγραμμίζεται με το κέντρο του στάτορα τότε να αναπτύσσεται το μέγιστο μέγεθος του και η εισαγόμενη ροή του ρευστού να διακόπτεται (Εικόνα 3.10: Β). Ο θάλαμος ρευστού σε αυτή τη χρονική στιγμή βρίσκεται ανάμεσα στη θυρίδα εισόδου και εξόδου. Κατά τη συνέχιση της περιστροφής των δύο οδοντωτών τροχών (Εικόνα 3.10: Γ), το μέγεθος του θυλακίου 1-6-Α που είχε δημιουργηθεί ελαττώνεται, διότι κατευθύνεται προς την θυρίδα εξόδου και παραχωρεί τη θέση του σε ένα καινούριο θυλάκιο το οποίο αρχίζει να διαμορφώνεται μεταξύ των κορυφών 5 και 6 του ρότορα και της κοιλάδας Γ του

στάτορα. Με την ολοκλήρωση του κύκλου λειτουργίας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.10 και την έναρξη του επόμενου η κορυφή 4 δεν θα ξεκινάει από τον άξονα συμμετρίας του κινητήρα αλλά θα βρίσκεται στην εγκοπή F του στάτορα [55].



Εικόνα 3.10: Αναπαράσταση ενός πλήρη κύκλου λειτουργίας [56, Εικόνα 2].

Η ταχύτητες των οδοντωτών τροχών δεν είναι ίδιες, αλλά εξαιτίας της φύσης της περιστροφικής τους κίνησης παρουσιάζουν μία σχετικά χαμηλή διαφοροποίηση. Επιπλέον, χάρις την περιστροφική κίνηση που διαθέτει ο κινητήρας με τη σταδιακή ογκομετρική αυξομείωση από την εισαγωγή μέχρι την εξαγωγή του ρευστού, επιτυγχάνεται στρωτή ομοιόμορφη ροή στο ρευστό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διατήρηση των διακυμάνσεων της πίεσης σε πολύ χαμηλά επίπεδα [55].

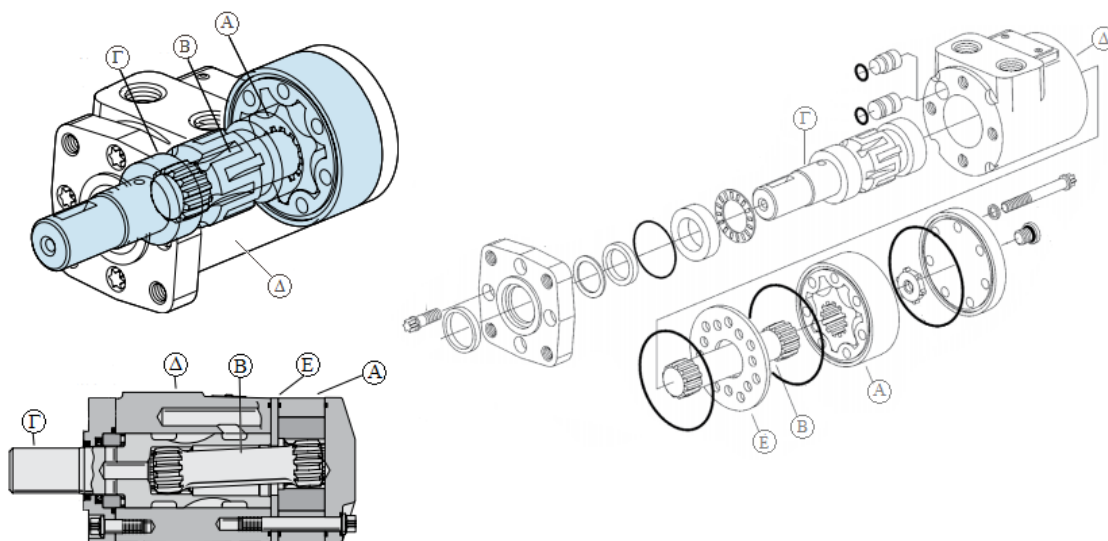
3.4.2 Κινητήρας με σταθερό στάτορα

Στην δεύτερη κατηγορία τοποθετείται ο περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης με σταθερό τον εξωτερικό οδοντωτό τροχό (Orbiting ή Orbit ή Orbital gerotor motor) [55]. Ο κινητήρας αυτός αποτελεί το πρώτο στάδιο εξέλιξης της πρώτης κατηγορίας και μαζί με την επόμενη κατηγορία αποτελούν τους δύο πιο πολυχρησιμοποιημένους τύπους αυτής της οικογένειας κινητήρων.

Τα βασικά μέρη που απαρτίζουν το συγκεκριμένο συγκρότημα είναι το ζευγάρι των περιστρεφόμενων οδοντωτών τροχών, το κέλυφος του κινητήρα με τις διαμορφωμένες θυρίδες εισόδου και εξόδου του ρευστού, η κινητήρια άτρακτος του κινητήρα (cardan shaft [60]), η άτρακτος εξόδου του κινητήρα, η βαλβίδα πηνίου

για τον έλεγχο ροής εισόδου και εξόδου του ρευστού τύπου πηνίου (spool valve) και ο αποστάτης διανομής.

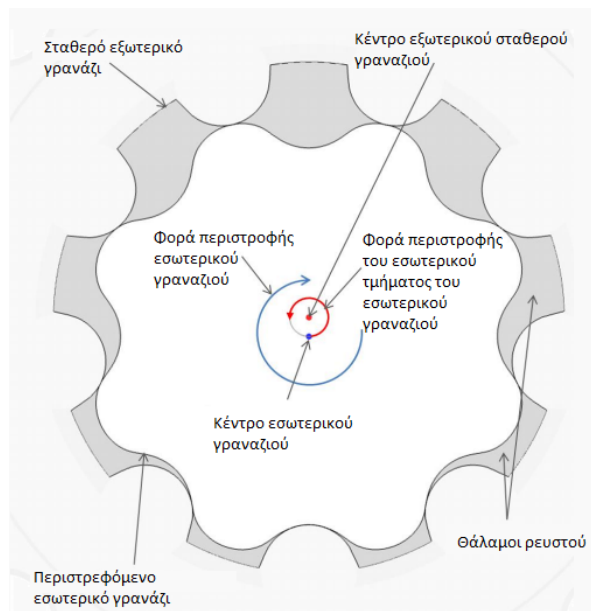
Οι διαφορές και οι βελτιώσεις που έχουν προκύψει είναι αρκετές (Εικόνα 3.11). Η βασική διαφορά αφορά το ζευγάρι των οδοντωτών τροχών. Αρχικά, ο στάτορας αποτελεί μέρος του σώματος του κινητήρα, διότι προσαρμόζεται σε αυτόν με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει ακίνητος και να μην περιστρέφεται. Κατά δεύτερον, εξαιτίας της ακινησίας του στάτορα η έκκεντρη περιστροφική κίνηση του ρότορα δεν επιτυγχάνεται πλέον όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Η δεύτερη τροποποίηση αφορά την άτρακτο της μηχανής, όπου πλέον απαρτίζεται από δύο μέρη, από την κινητήριο άτρακτο του κινητήρα (cardan shaft ή eccentric arm [55]) και την άτρακτο εξόδου. Ο συνδυασμός αυτών των δύο ατράκτων αποδίδει στο σύστημα των οδοντωτών τροχών μία διαφορετική έκκεντρη περιστροφική κίνηση. Η τρίτη διαφορά σχετίζεται με τον αποστάτη διανομής, διότι οι θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής που είναι διαμορφωμένες πάνω του δεν είναι πλέον δύο αλλά πολλοί περισσότερες και διαθέτουν κυκλικό ή κάποιο άλλο σχήμα.



Εικόνα 3.11: Περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης με σταθερό στάτορα (Gerotor, H series motors). (A) Ζεύγος οδοντωτών τροχών, (B) Κινητήριος άτρακτος μηχανής, (Γ) Άτρακτος εξόδου/Βαλβίδα διανομής, (Δ) Κέλυφος κινητήρα, (E) Αποστάτης διανομής [61, σελ.Β-2-1, Β-2-2 & σελ.4].

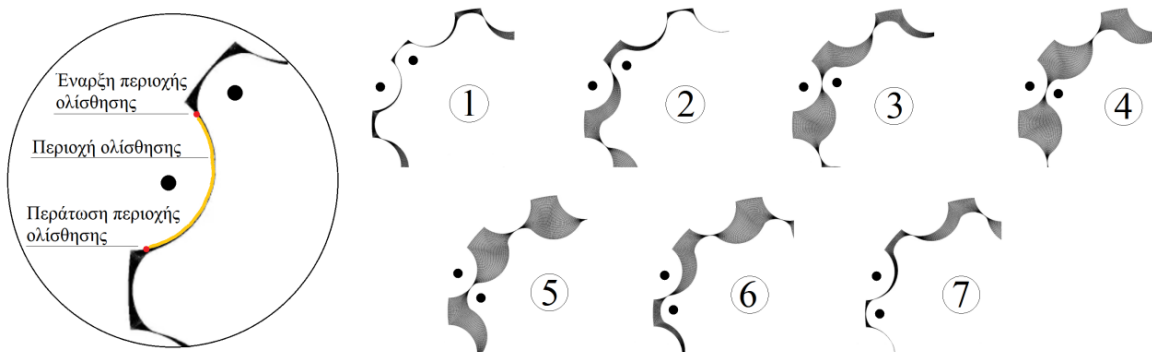
Σε αυτή την περίπτωση ο εσωτερικός οδοντωτός τροχός περιστρέφεται και ταυτόχρονα κυλιέται επί της επιφάνειας των δοντιών του στάτορα προς μία κατεύθυνση (συνήθως δεξιόστροφη). Η κινητήρια άτρακτος, που συνδέεται με την πλήμνη του ρότορα παρουσιάζει σύνθετη περιστροφική κίνηση, διότι περιστρέφεται γύρω από τον άξονα συμμετρίας της, με φορά ίδια με αυτήν του ρότορα και

ταυτόχρονα διαγράφει κυκλική τροχιά (μη περιστροφική) γύρω από το κέντρο του ρότορα, αντίθετης κατεύθυνσεως από αυτήν του ρότορα (Εικόνα 3.12). Η χρονική στιγμή όπου ένα δόντι του ρότορα μεταπηδά από μία κοιλότητα του στάτορα στην ακριβώς επόμενη, αντιστοιχεί σε μία πλήρη περιστροφή του εσωτερικού μέρους του ρότορα ή αλλιώς σε μία πλήρη περιστροφή της κινητήριας ατράκτου. Από την άλλη μία πλήρη περιστροφή της ατράκτου εξόδου αντιστοιχεί σε x περιστροφές της κινητήριας ατράκτου, όπου x ο αριθμός των δοντιών του εξωτερικού σταθερού γραναζιού [63].



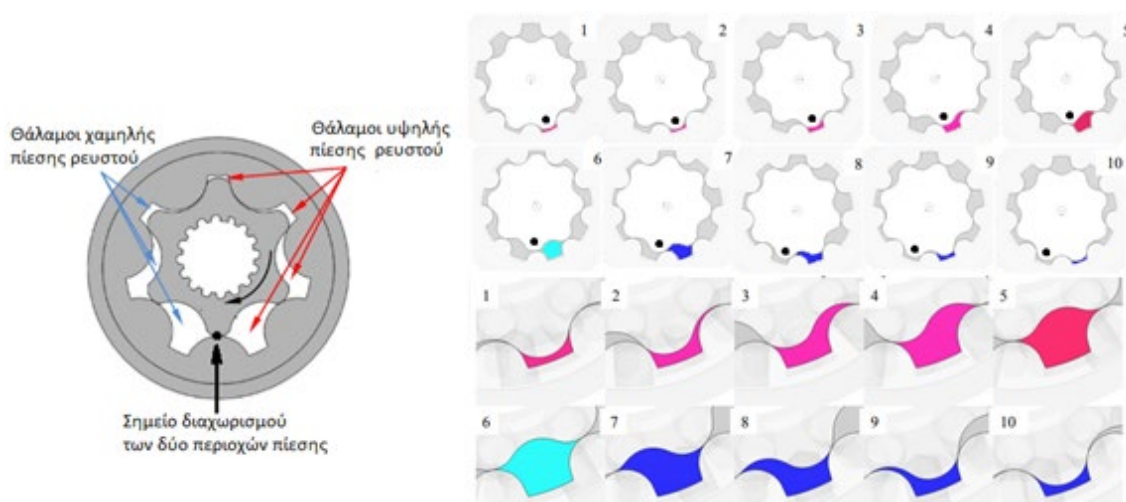
Εικόνα 3.12: Εφαρμογή και στοιχεία περιστροφής ενός κινητήρα περιστροφής εσωτερικής οδόντωσης με σταθερό εξωτερικό γρανάζι [63, Εικόνα 1, σελ.2].

Μπορεί ο ρότορας να περιστρέφεται και ταυτόχρονα να κυλιέται πάνω στις οδοντώσεις του στάτορα, ωστόσο, η σχετική κίνηση που αναπτύσσεται μεταξύ ενός δοντιού του ρότορα και ενός δοντιού του στάτορα χαρακτηρίζεται από ολίσθηση. Η κίνηση αυτή παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.13: Αναπαράσταση της περιοχής ολίσθησης μεταξύ ενός δοντιού του ρότορα και ενός δοντιού του στάτορα.

Ο κύκλος λειτουργίας αρχίζει με την εισαγωγή του κινητήριου μέσου από τη θυρίδα εισαγωγής στο εσωτερικό του κελύφους. Η διανομή και εξαγωγή του ρευστού από και προς το θάλαμο περιστροφής των οδοντωτών τροχών επιτυγχάνεται μέσα από τον συνδυασμό της βαλβίδας ελέγχου και του αποστάτη διανομής. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η βαλβίδα ελέγχου της ροής εισόδου και εξόδου του ρευστού αποτελεί μέρος της ατράκτου εξόδου του κινητήρα (Εικόνα 3.11). Ο χρονισμός του ρυθμού περιστροφής του ρότορα με τον αντίστοιχο της βαλβίδας, σε συνδυασμό με την θέση των οπών διέλευσης του αποστάτη και φυσικά της γεωμετρίας των οδοντωτών τροχών συμβάλλουν στην συνεχόμενη εναλλαγή των θυρίδων σε εισόδου και εξόδου, οδηγώντας το ρευστό εντός ή εκτός των σχηματιζόμενων θαλάμων. Οι θάλαμοι ρευστού/λειτουργίας δημιουργούνται κατά τη περιστροφή και κύλιση του εσωτερικού γραναζιού πάνω στις οδοντώσεις και τις κοιλότητες του εξωτερικού σταθερού οδοντωτού τροχού, αλλάζουν συνεχώς σχήμα και μέγεθος. Όταν το μέγεθος ενός θαλάμου λειτουργίας αρχίζει να αυξάνεται, τότε το υψηλής πίεσης κινητήριο μέσο εισέρχεται εντός του θυλακίου και αντίστοιχα όταν αυτό αρχίσει να συρρικνώνεται, τότε το χαμηλής πίεσης κινητήριο μέσο αρχίζει να αποβάλλεται (Εικόνα 3.14). Σκοπός αυτής της εναλλαγής είναι η δημιουργία διαδοχικών θαλάμων ρευστού υψηλής πίεσης - εισαγωγής και ταυτόχρονα χαμηλής πίεσης - εξαγωγής, ανά μισή περιστροφή της ατράκτου σύζευξης. Το σημείο διαχωρισμού των δύο αυτών περιοχών πίεσης ορίζεται από το σημείο ένωσης των κορυφών των δύο οδοντωτών κορυφών [63].

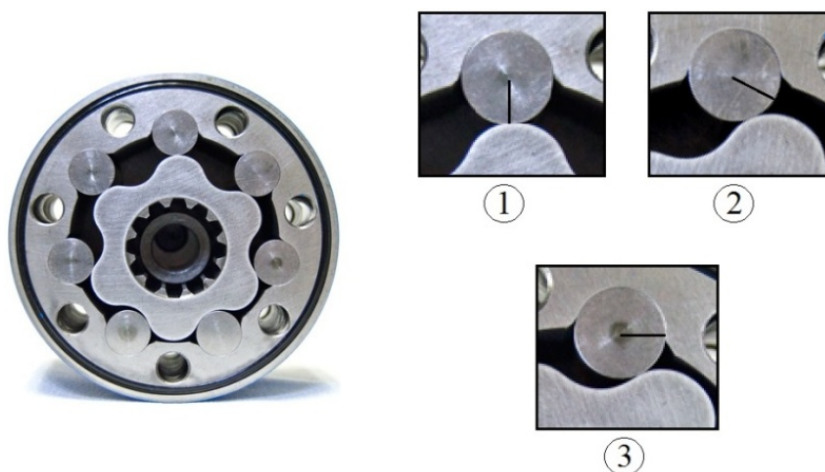


Εικόνα 3.14: Αλλαγή σχήματος και μεγέθους ενός θαλάμου ρευστού σε μία πλήρη περιστροφή του εσωτερικού τμήματος του ρότορα. (1-5): Αναπαράσταση της εισροής ρευστού και (6-10): Αναπαράσταση της διαδικασίας συμπίεσης – εξαγωγής του ρευστού [63, Εικόνα 1 & 2, σελ.2-3] & [64, Εικόνα 1, σελ.3].

Ο συνδυασμός των παραπάνω ενεργειών έχει σαν αποτέλεσμα την έκκεντρη περιστροφή του ρότορα στην εσωτερική οδόντωση του στάτορα. Η κινητήριος άτρακτος του κινητήρα διαθέτει και στις δυο άκρες τις κατάλληλα διαμορφωμένες οδοντώσεις από τις οποίες η μία συνδέεται στην πλήμνη του ρότορα και η άλλη στο εσωτερικό της άτρακτου εξόδου. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται η στρεπτική ροπή που δημιουργείται από το ζεύγος των γραναζιών στην άτρακτο εξόδου και από εκεί σε κάποιο εξωτερικό φορτίο. Η κινητήριος άτρακτος μπορεί να χαρακτηριστεί και ως άτρακτος σύζευξης, διότι συνδέει τον θάλαμο των οδοντωτών τροχών με την άτρακτο εξόδου.

3.4.3 Κινητήρας σταθερού στάτορα με κυλίνδρους

Στη τρίτη κατηγορία τοποθετείται ο περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης με σταθερό στάτορα, όπου αντί για οδοντώσεις διαθέτει κυλίνδρους (Geroler ή Roller - vane gerotor motor) [55]. Ο στάτορας διαθέτει κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές στις οποίες τοποθετούνται οι κύλινδροι (rollers). Η έκκεντρη περιστροφική κίνηση που ακολουθεί ο ρότορας είναι παρόμοια με αυτήν που παρουσιάστηκε στον κινητήρα σταθερού στάτορα. Σε αυτή την περίπτωση ο ρότορας περιστρέφεται και κυλιέται πάνω στους κυλίνδρους του στάτορα. Οι κύλινδροι που συμμετέχουν στην κίνηση περιστρέφονται μέσα στην υποδοχή τους, υποβοηθώντας ακόμη περισσότερο την έκκεντρη περιστροφική κίνηση του ρότορα. Η διαφορά λοιπόν σχετίζεται με την σχετική κίνηση που αναπτύσσεται μεταξύ ενός δοντιού του ρότορα και ενός κυλίνδρου του στάτορα, διότι πλέον η κίνηση δεν χαρακτηρίζεται από ολίσθηση αλλά από κύλιση ή από κύλιση και ολίσθηση (Εικόνα 3.15).



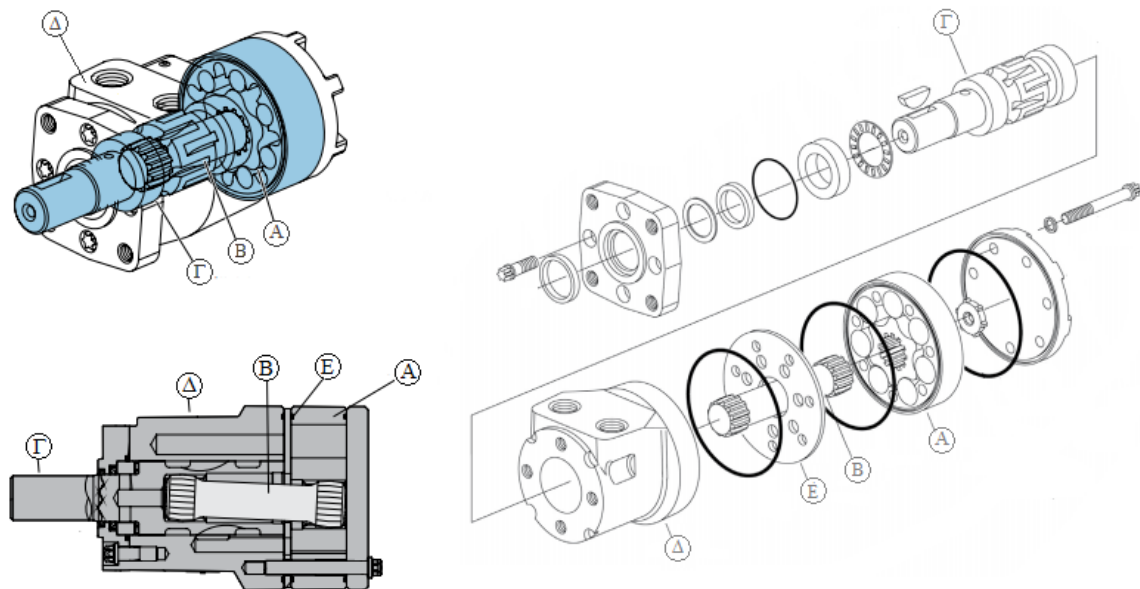
Εικόνα 3.15: Αναπαράσταση της κύλισης ενός δοντιού του ρότορα σε έναν κύλινδρο του στάτορα [65].

Με την συμμετοχή των κυλίνδρων στη σχετική κίνηση του συστήματος αυξάνεται το προσδόκιμο όριο ζωής των οδοντωτών τροχών. Αυτό συμβαίνει διότι τα επίπεδα φθοράς που προκύπτουν κατά την κύλιση είναι λιγότερο έντονα από τα αυτά της ολίσθησης.

Οι κινητήρες αυτοί αποδίδουν υψηλότερα επίπεδα ροπής και ομαλότερη λειτουργία στις χαμηλές ταχύτητες σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία. Ταυτόχρονα η συμπαγής βαρέως τύπου κατασκευή του και η αύξηση του βαθμού απόδοσης που απορρέει από τα παραπάνω χαρακτηριστικά των καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό προς χρήση [61].

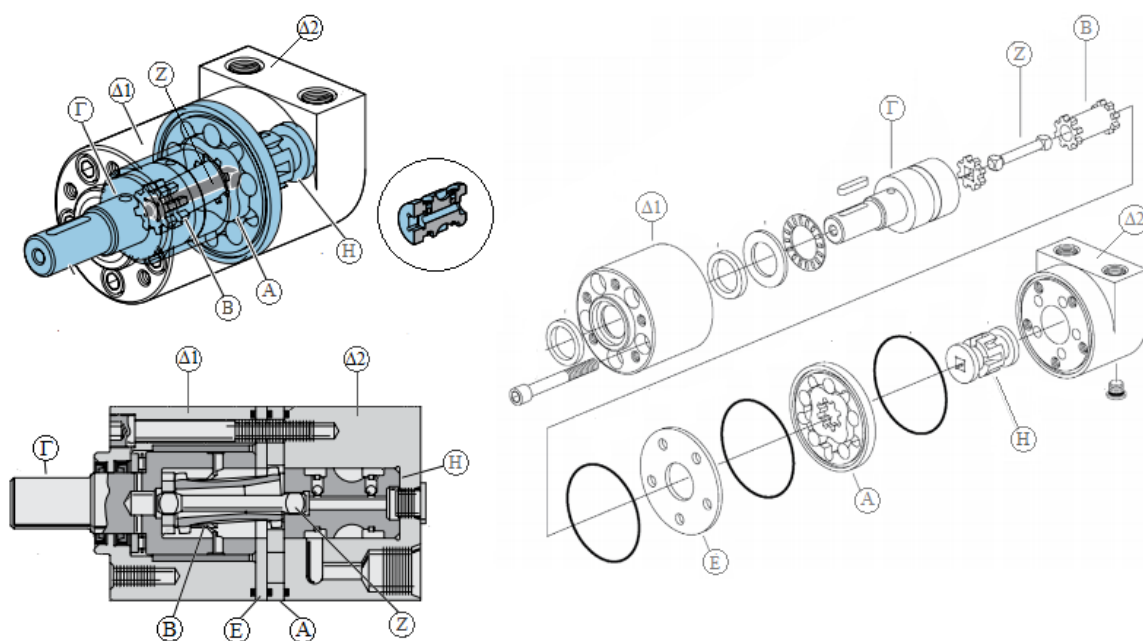
Η διάταξη των βασικών εξαρτημάτων που απαρτίζουν έναν τέτοιο περιστροφικό κινητήρα δεν είναι πάντοτε η ίδια με αυτήν της προηγούμενης κατηγορίας, αλλά διακρίνεται σε τρεις κύριες ομάδες. Η διάκριση τους βασίζεται στην τροποποίηση της βαλβίδας ελέγχου της ροής [61].

Η πρώτη κατηγορία διαθέτει την ίδια διάταξη με αυτήν που αναφέρθηκε στον περιστροφικό κινητήρα με σταθερό στάτορα χωρίς κυλίνδρους. Σε αυτή την περίπτωση η βαλβίδα πηνίου ελέγχου (spool valve) αποτελεί μέρος της ατράκτου εξόδου (Εικόνα 3.16).



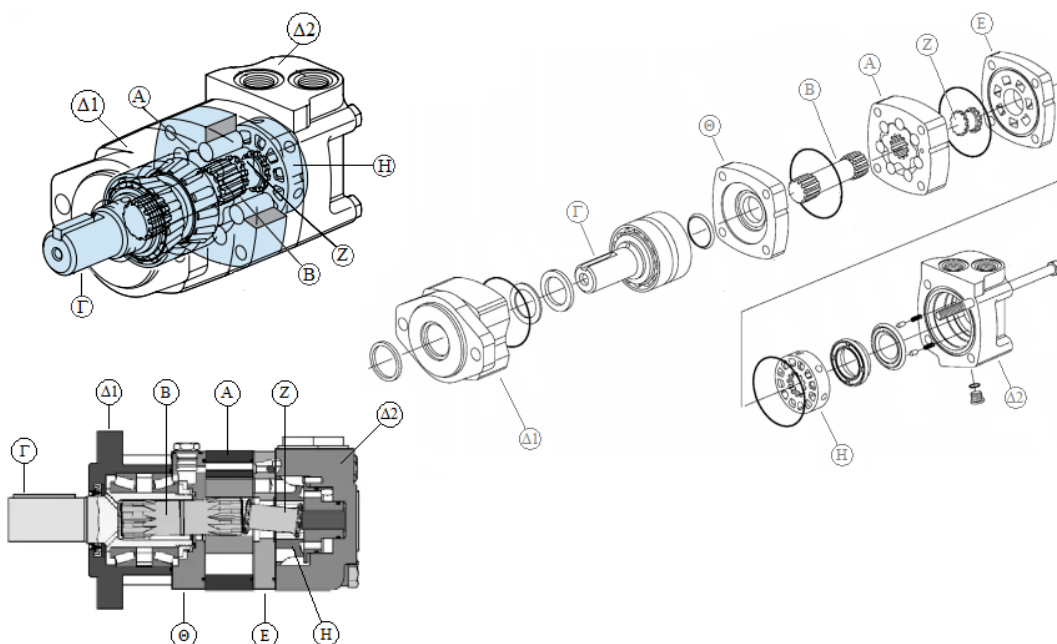
Εικόνα 3.16: Περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης σταθερού στάτορα με προσαρμοσμένους κυλίνδρους (Geroler, S & T series motors). (Α) Ζεύγος οδοντωτών τροχών, (Β) Κινητήριος άτρακτος μηχανής, (Γ) Άτρακτος εξόδου, (Δ) Κέλυφος κινητήρα, (Ε) Αποστάτης διανομής [61, σελ.Β-3-2, Β-4-2] & [62, σελ.6].

Στη δεύτερη κατηγορία η βαλβίδα πηνίου ελέγχου (spool valve), αποτελεί ξεχωριστό εξάρτημα από την άτρακτο εξόδου (Εικόνα 3.17). Σε αυτή την περίπτωση το κινητήριο ρευστό εισέρχεται μέσω της θυρίδας εισαγωγής στο εσωτερικό του κινητήρα και από εκεί έρχεται σε επαφή με τη βαλβίδα ελέγχου της ροής εισόδου και εξόδου. Εν συνεχεία η βαλβίδα διανέμει το ρευστό στον θάλαμο των οδοντωτών τροχών. Οι δίοδοι της βαλβίδα ελέγχου διαθέτουν την ίδια μορφολογία με την προηγούμενη κατηγορία. Μεταξύ της βαλβίδας και του θαλάμου των οδοντωτών τροχών δεν παρεμβάλλεται κάποιος αποστάτης διανομής. Όσο για τον αποστάτη που διακρίνεται στην Εικόνα 3.17 αποτελεί την πλάκα φθοράς πάνω στη οποία ολισθαίνει η μία επιφάνεια του ρότορα. Όσο για τις οπές που διαθέτει αποτελούν οπές διέλευσης για τους κοχλίες σύνδεσης των επιμέρους εξαρτημάτων του κινητήρα. Ο σκοπός αυτού του αποστάτη είναι ο διαχωρισμός του θαλάμου των οδοντωτών τροχών από τα υπόλοιπα μέρη του κινητήρα. Η άτρακτος της μηχανής απαρτίζεται από τρία μέρη, την άτρακτο εξόδου, την κινητήριο άτρακτο του κινητήρα, η οποία διαθέτει κατάλληλα διαμορφωμένες εγκοπές στις άκρες της και συνδέεται με την πλήμνη του ρότορα και με το εσωτερικό της άτρακτου εξόδου και από την κινητήριο άτρακτο της βαλβίδας, η οποία προσαρμόζεται στο εσωτερικό της κινητήριας άτρακτου του κινητήρα.



Εικόνα 3.17: Περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης σταθερού στάτορα με προσαρμοσμένους κυλίνδρους (Geroler, J series motors). (A) Ζεύγος οδοντωτών τροχών, (B) Κινητήριο άτρακτος μηχανής, (C) Άτρακτος εξόδου, (D1) Κέλυφος κινητήρα, (D2) Κέλυφος βαλβίδας (E) Αποστάτης φθοράς, (Z) Κινητήριο άτρακτος βαλβίδας, (H) Βαλβίδα ελέγχου [61, σελ. B-1-1, B-1-2] & [62, σελ. 1].

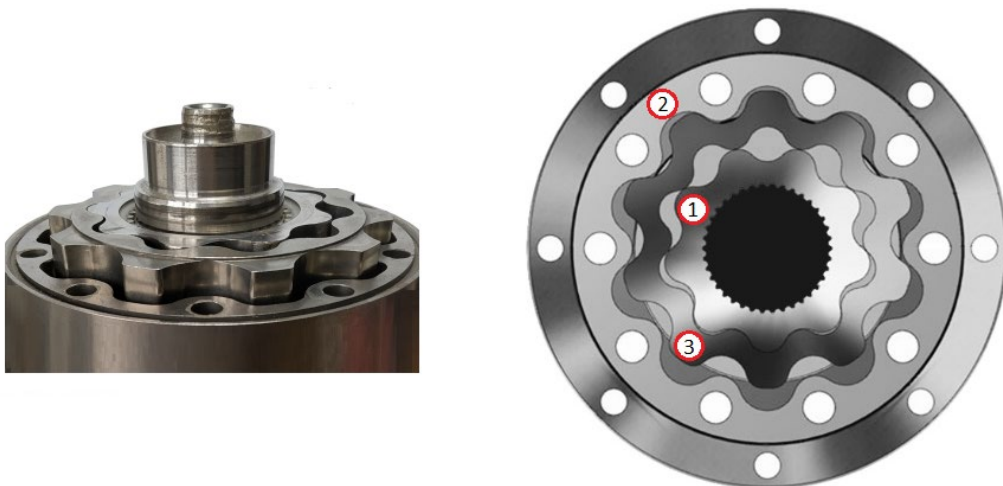
Στην τρίτη κατηγορία η βαλβίδα ελέγχου είναι τύπου δίσκου (disk valve) (Εικόνα 3.18). Σε αυτή την περίπτωση το κινητήριο ρευστό εισέρχεται μέσω της θυρίδας εισαγωγής στο εσωτερικό του κινητήρα και από εκεί έρχεται σε επαφή με τη βαλβίδα ελέγχου της ροής εισόδου και εξόδου. Εν συνεχεία η βαλβίδα διανέμει το ρευστό στον θάλαμο των οδοντωτών τροχών διαμέσου του αποστάτη διανομής. Ο αποστάτης που παρεμβάλλεται μεταξύ του θαλάμου των οδοντωτών τροχών και της ατράκτου εξόδου αποτελεί την πλάκα φθοράς πάνω στη οποία ολισθαίνει η μία επιφάνεια του ρότορα. Ο σκοπός αυτού του αποστάτη είναι και πάλι ο διαχωρισμός του θαλάμου των οδοντωτών τροχών από τα υπόλοιπα μέρη του κινητήρα. Η άτρακτος της μηχανής απαρτίζεται από δύο μέρη, την άτρακτο εξόδου και την κινητήρια άτρακτο του κινητήρα, η οποία διαθέτει κατάλληλα διαμορφωμένες εγκοπές στις άκρες της και συνδέεται με την πλήμνη του ρότορα και με το εσωτερικό της ατράκτου εξόδου. Η κινητήρια άτρακτος της βαλβίδας, τοποθετείται ενδιάμεσα του θαλάμου των οδοντωτών τροχών και της βαλβίδας ελέγχου της ροής. Η άτρακτος αυτή έχει κατάλληλα διαμορφωμένες οδοντώσεις στα άκρα της, ώστε να προσαρμόζεται στην πλήμνη του ρότορα και αντίστοιχα στην βαλβίδα.



Εικόνα 3.18: Περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης σταθερού στάτορα με προσαρμοσμένους κλίνδρους (Geroler, 2K series motors). (A) Ζεύγος οδοντωτών τροχών, (B) Κινητήριος άτρακτος μηχανής, (Γ) Άτρακτος εξόδου, (Δ1) Κέλυφος κινητήρα, (Δ2) Κέλυφος βαλβίδας (E) Αποστάτης διανομής, (Z) Κινητήρια άτρακτος βαλβίδας, (H) Βαλβίδα ελέγχου τύπου δίσκου και (Θ) Αποστάτης φθοράς [61, σελ.Β-1-1, Β-1-2] & [62, σελ.1] & [66].

3.4.4 Κινητήρας σταθερού στάτορα με ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι

Ο περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης με ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι (Orbital gerotor motor with floating outer ring) αποτελείται από τρεις οδοντωτούς τροχούς, τον ρότορα (Εικόνα 3.19: 1) που είναι γρανάτζι εξωτερικής οδόντωσης, τον στάτορα (Εικόνα 3.19: 2) που διαθέτει εσωτερική οδόντωση και αποτελεί μέρος του σώματος του κινητήρα και το ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι (Εικόνα 3.19: 3) [67]. Το ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι αποτελεί ένα εσωτερικής και παράλληλα εξωτερικής οδόντωσης γρανάτζι, με τον αριθμό των οδόντων του να είναι ο ίδιος και στις δύο του πλευρές. Η εσωτερική επιφάνεια του οδοντωτού δαχτυλιδιού, με N αριθμό δοντιών, είναι αυτή που έρχεται σε συνεργασία με τα δόντια του ρότορα, με $N-1$ αριθμό δοντιών. Σε αυτή την περίπτωση η εξωτερική οδόντωση του ρότορα βρίσκεται σε συνεχή σύμπλεξη με την εσωτερική οδόντωση του οδοντωτού δαχτυλιδιού. Από την άλλη, ο αριθμός των δοντιών του στάτορα είναι ίδιος με αυτόν της εξωτερικής επιφάνειας του οδοντωτού δαχτυλιδιού. Το κέντρο του στάτορα συμπίπτει με το σταθερό κέντρο του ρότορα και της κινητήριας ατράκτου της μηχανής. Η εκκεντρότητα που αποτελεί έναν από τους βασικούς σχεδιαστικούς κανόνες που χαρακτηρίζουν τους κινητήρες εσωτερικής οδόντωσης, εξασφαλίζεται από την έκκεντρη τοποθέτηση του οδοντωτού δαχτυλιδιού ανάμεσα στον ρότορα και τον στάτορα.

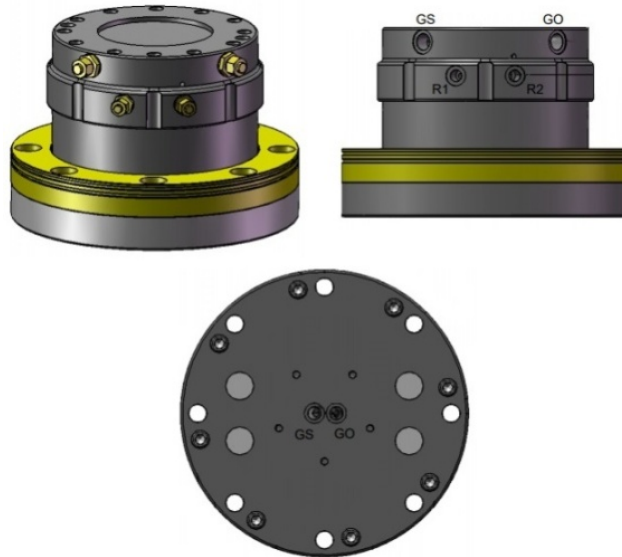


Εικόνα 3.19: Περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης με οδοντωτό δαχτυλίδι [67, Εικόνα 1, σελ.2] & [68].

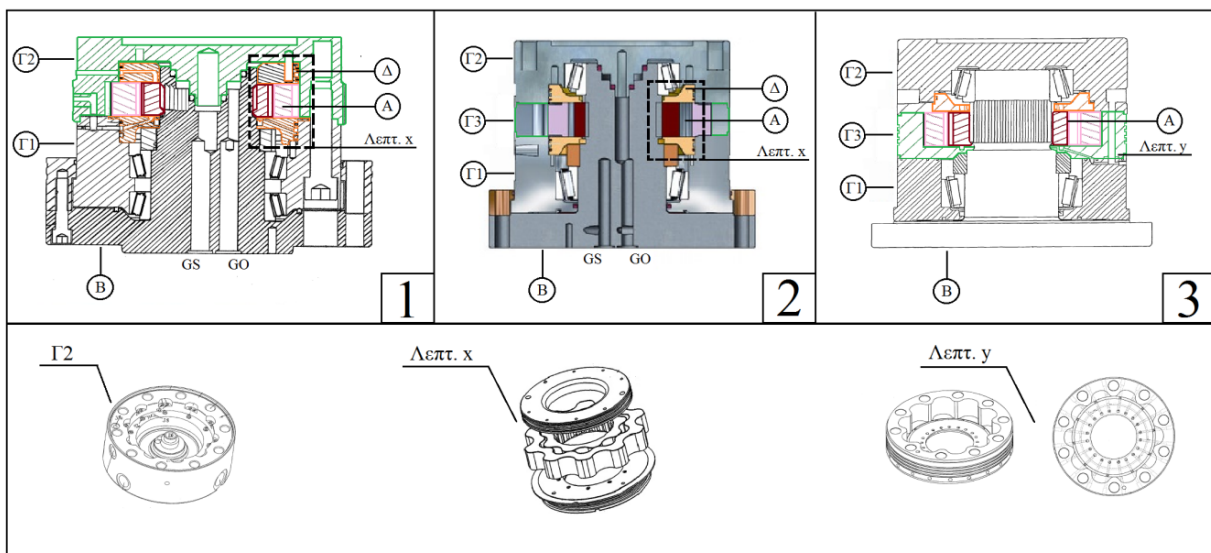
Τα υπόλοιπα κύρια μέρη που στελεχώνουν αυτόν τον τύπο κινητήρα είναι το κέλυφος που φέρει τις θυρίδες εισόδου και εξόδου του ρευστού, η κινητήρια ατράκτος της μηχανής και ο αποστάτης διανομής. Το σώμα του υδραυλικού κινητήρα

είναι διαιρούμενο και συνήθως αποτελείται από δύο ή τρία μέρη. Το κάτω τμήμα (motor housing) βρίσκεται ακριβώς πάνω από τη βάση του κινητήρα, στην οποία προσαρμόζεται κάποιος άλλος μηχανισμός (π.χ. αρπάγες) και εναγκαλιάζει το μεγαλύτερο μέρος του σώματος της κινητήριας ατράκτου. Το επάνω τμήμα χαρακτηρίζεται ως κεφαλή του κινητήρα (motor head housing) και αποτελείται από τις θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής του ρευστού για την αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη περιστροφή της ατράκτου. Εκτός από τις θυρίδες εισόδου και εξόδου του κινητήριου ρευστού διακρίνονται και άλλες θυρίδες (Εικόνα 3.20), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κίνηση του μηχανισμού που συνδέεται με τον κινητήρα (π.χ. άνοιγμα και κλείσιμο αρπαγών). Παράλληλα το επάνω μέρος του κελύφους στελεχώνεται και από τη βαλβίδα ελέγχου. Σε αυτή την περίπτωση η βαλβίδα δεν παρουσιάζει κάποια σχετική κίνηση όπως συνέβαινε στους προηγούμενους τύπους κινητήρων, απλώς έτσι χαρακτηρίζεται το τμήμα της κεφαλής που διαθέτει τους εσωτερικούς αυλούς διαχωρισμού και διανομής του ρευστού. Ενδιάμεσα των δύο τμημάτων παρεμβάλλεται ο θάλαμος των τριών οδοντωτών τροχών, ο οποίος αποτελεί και το τρίτο - ενδιάμεσο τμήμα του κελύφους (rotor housing). Όταν το κέλυφος του κινητήρα απαρτίζεται από δύο μέρη, τότε η εσωτερική οδόντωση του στάτορα αποτελεί μέρος της κεφαλής. Η πλευρική οριοθέτηση του θαλάμου των οδοντωτών τροχών, καθώς και η εισαγωγή και εξαγωγή του κινητήριου μέσου προς και από τον θάλαμο ελέγχεται από τους αποστάτες διανομής/φθοράς. Οι πιο γνωστές διατάξεις συνεργασίας στάτορα και αποστατών είναι δύο. Στην μία διάταξη χρησιμοποιούνται δύο αποστάτες, οι οποίοι προσαρμόζονται εκατέρωθεν του θαλάμου των οδοντωτών τροχών ως ξεχωριστά εξαρτήματα. Στην περίπτωση αυτή ο στάτορας είτε είναι μέρος της κεφαλής του κινητήρα (Εικόνα 3.21: 1) είτε αποτελεί το ενδιάμεσο τμήμα του κελύφους (Εικόνα 3.21: 2). Στην δεύτερη διάταξη το κάτω μέρος του στάτορα είναι διαμορφωμένο σαν αποστάτης διανομής και στο επάνω μέρος, ενδιάμεσα του θαλάμου περιστροφής και της βαλβίδας, προσαρμόζεται ο δεύτερος αποστάτης διανομής (Εικόνα 3.21: 3). Σε αυτή την περίπτωση ο στάτορας αποτελεί το τρίτο - ενδιάμεσο τμήμα του κελύφους. Οι αποστάτες αποτελούνται από πλήθος οπών διέλευσης ρευστού, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την παροχή και την αποστράγγιση των θαλάμων λειτουργίας των οδοντωτών τροχών. Τέλος, η κινητήρια άτρακτος του κινητήρα είναι σταθερή, ενιαία και αποτελεί ταυτόχρονα και την άτρακτο εξόδου. Στο σώμα της ατράκτου είναι διαμορφωμένες κατάλληλες οδοντώσεις, στις οποίες προσαρμόζεται η πλήμνη του ρότορα. Επιπλέον, το

εσωτερικό της δεν είναι συμπαγές, αλλά διαθέτει διάφορους αυλούς από τους οποίους διέρχεται το κινητήριο ρευστό από την κεφαλή στη βάση του κινητήρα, για την κίνηση του προσαρτημένου μηχανισμού. Οι θυρίδες σύνδεσης αυτών των διόδων βρίσκονται πλευρικά ή κάτω της βάσης του υδραυλικού κινητήρα (Εικόνα 3.19) [69, 70].



Εικόνα 3.20: Θυρίδες εισόδου και εξόδου κινητήριου ρευστού. (R1) Δεξιά περιστροφή ατράκτου, (R2) Αριστερή περιστροφή ατράκτου, (GO) Άνοιγμα αρπάγης, (GS) Κλείσιμο αρπάγης [71].

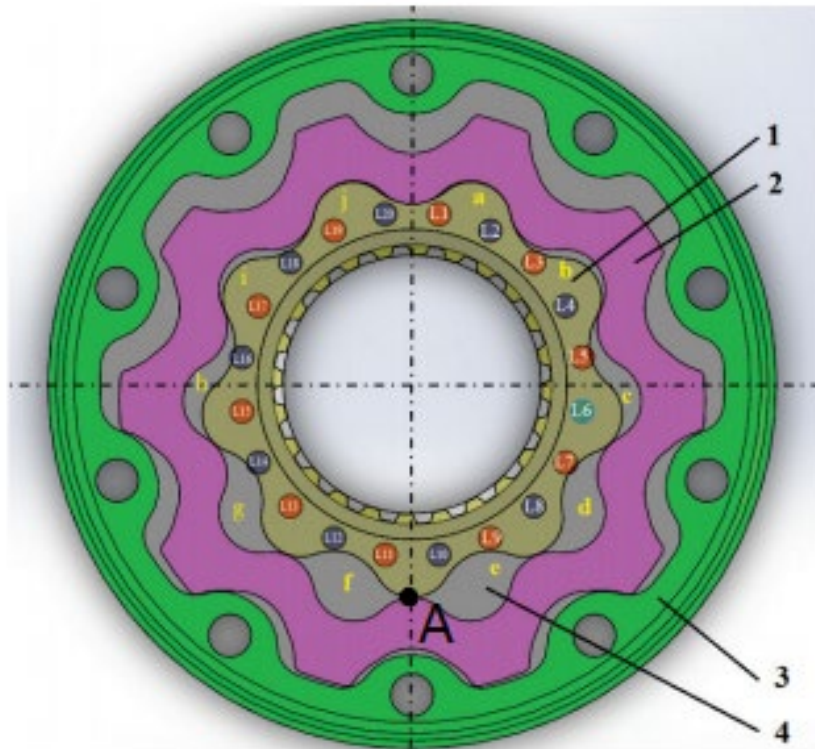


Εικόνα 3.21: Περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης σταθερού στάτορα με ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι. (Α) Ζεύγος οδοντωτών τροχών ρότορας - ενδιάμεσο δαχτυλίδι, (Β) Κινητήριος άτρακτος μηχανής/Άτρακτος εξόδου, (Γ1) Κάτω μέρος κελύφους κινητήρα, (Γ2) Κεφαλή κινητήρα, (Γ3) Ενδιάμεσο τμήμα κελύφους - στάτορας, (Δ) Αποστάτης διανομής [69, Εικόνα 2,3,4,5, σελ.2/9-5/9] & [70, Εικόνα 1 και 4, σελ.9 και 12] & [72] .

Οι θάλαμοι πίεσης και οι θάλαμοι επιστροφής σχηματίζονται μόνον μεταξύ του ρότορα και του οδοντωτού δαχτυλιδιού. Με βάση την θέση των οπών διέλευσης του ρευστού που διαθέτει ο αποστάτης σε συνδυασμό με την κίνηση του οδοντωτού δαχτυλιδιού και την περιστροφή του ρότορα, οι θάλαμοι εισόδου και εξόδου συνεχώς εναλλάσσονται.

Το οδοντωτό δαχτυλίδι χαρακτηρίζεται από έκκεντρη κυκλική (μη περιστροφική) κίνηση, αντίθετης κατεύθυνσης από αυτή του ρότορα. Η κίνηση αυτή αποδίδεται στις διαδοχικές εκατέρωθεν συμπλέξεις του δαχτυλιδιού με τις επιφάνειες του ρότορα και του στάτορα. Οι εκατέρωθεν συμπλέξεις οφείλονται στη συνεχή εναλλαγή των εισόδων και εξόδων του ρευστού, διότι κατά την είσοδο του ρευστού στον σχηματιζόμενο θάλαμο λειτουργίας, το οδοντωτό δαχτυλίδι ωθείται προς την εσωτερική οδόντωση του στάτορα, ενώ κατά την εξαγωγή του το δαχτυλίδι ωθείται προς την εξωτερική οδόντωση του ρότορα. Ο ρόλος του στάτορα είναι να περιορίζει το πεδίο κίνησης του οδοντωτού δαχτυλιδιού και ταυτόχρονα μέσω της συνεργασίας της εσωτερικής οδόντωσης που διαθέτει με την εξωτερική οδόντωση του δαχτυλιδιού, να ορίζει με ακρίβεια την τροχιά επιστροφής του οδοντωτού δαχτυλιδιού πίσω στο ρότορα. Μέσω την κίνησης αυτής που δημιουργείται στο δαχτυλίδι παράγεται ροπή, η οποία στη συνέχεια μεταβιβάζεται στο ρότορα και από εκεί στην άτρακτο εξόδου [69, 70].

Στην Εικόνα 3.22 παρουσιάζεται υδραυλικός κινητήρας με 9 - δόντια στον ρότορα, 10 - δόντια στον στάτορα και 20 - δόντια στο επιπλέον ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι (δέκα από την μεριά του ρότορα και άλλα δέκα από τη μεριά του στάτορα). Σε αυτόν τον συνδυασμό οδόντων μεταξύ του ρότορα και του ενδιάμεσου οδοντωτού δαχτυλιδιού δημιουργούνται 10 θάλαμοι ρευστού (συμβολίζονται με μικρούς λατινικούς χαρακτήρες). Επιπλέον, ο αποστάτης διανομής διαθέτει 20 θυρίδες διέλευσης ρευστού, από τις οποίες οι μισές εισάγουν υψηλής πίεσης και οι άλλες μισές εξάγουν χαμηλής πίεσης ρευστό [73].



Εικόνα 3.22: Αναπαράσταση δημιουργίας των θαλάμων ρευστού (μικροί λατινικοί χαρακτήρες a - j) και των οπών διανομής ρευστού του αποστάτη (κεφαλαίοι λατινικοί χαρακτήρες L1 - L20). Όπου (1) ο ρότορας, (2) το οδοντωτό δαχτυλίδι, (3) ο στάτορας και (4) οι θάλαμοι ρευστού [73, Εικόνα 3, σελ.610].

Μία παραλλαγή αυτού του συστήματος αποτελεί η διαμόρφωση υποδοχών στις θέσεις των δοντιών του στάτορα και του ρότορα και την προσαρμογή κυλίνδρων (rollers) σε αυτές (Εικόνα 3.23). Με την χρήση των κυλίνδρων εξασφαλίζεται καλύτερη σύμπλεξη και ομαλότερη λειτουργία μεταξύ του οδοντωτού δαχτυλιδιού με τον στάτορα και τον ρότορα. Τα επίπεδα φθοράς λόγω της κρούσης και της ολίσθησης ελαχιστοποιούνται, διότι η σχετική κίνηση των οδοντώσεων χαρακτηρίζεται πλέον από την κύλιση. Τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης, καθώς και τα επίπεδα ροπής που αποδίδονται στην άτρακτο εξόδου να αυξάνονται.



Εικόνα 3.23: Περιστροφικός κινητήρας εσωτερικής οδόντωσης με ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι και με προσαρτημένους κυλίνδρους [74].

Β΄ ΜΕΡΟΣ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΛΛΟΓΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

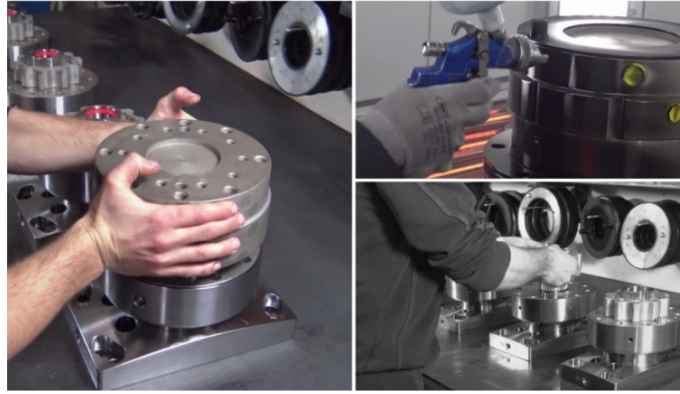
Το προς μελέτη εξάρτημα αποτελεί μέρος των περιστρεφόμενων μερών ενός υδραυλικού περιστροφικού κινητήρα εσωτερικής οδόντωσης. Ο τύπος του κινητήρα ανήκει στην κατηγορία των περιστροφικών κινητήρων εσωτερικής οδόντωσης με το ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι. Από τους τρεις οδοντωτούς τροχούς που συγκροτούν αυτό το περιστρεφόμενο σύστημα το προς εξέταση εξάρτημα είναι ο ρότορας, που αποτελεί το εσωτερικό γρανάζι με την εξωτερική οδόντωση.

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η συναρμολόγηση και τον τελικό έλεγχο των κινητήρων αυτών επιμελείται η αυστριακή εταιρία AVS Rotators. Στο παρακάτω πλέγμα εικόνων, που συλλέχθηκαν από την ιστοσελίδα της εταιρείας (Εικόνα 4.1), παρουσιάζεται ο τρόπος επεξεργασίας κάποιων βασικών στοιχείων του κινητήρα, όπως είναι η άτρακτος περιστροφής (διακρίνονται τρεις διαφορετικοί τύποι ατράκτων) και ο ρότορας του κινητήρα.



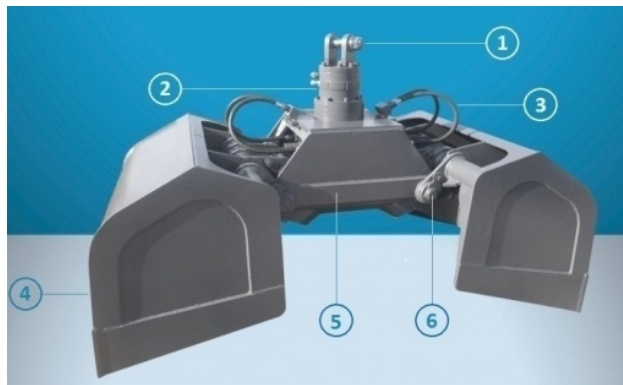
Εικόνα 4.1: Παρουσίαση της μηχανουργικής κατεργασίας των κύριων μερών ενός κινητήρα εσωτερικής οδόντωσης [65].

Στο επόμενο πλέγμα εικόνων που συγκεντρώθηκαν επίσης από την ιστοσελίδα της εταιρείας (Εικόνα 4.2), παρουσιάζεται το τελικό στάδιο της συναρμολόγησης του κινητήρα: η τοποθέτηση του ρότορα, του ενδιάμεσου οδοντωτού δαχτυλιδιού και του στάτορα, καθώς επίσης και η διαδικασία του φινιρίσματος. Προδιαγράφοντας υψηλές απαιτήσεις ως προς τις διαστάσεις αλλά και την ποιότητα επιφανείας του εξαρτήματος.



Εικόνα 4.2: Παρουσίαση του σταδίου συναρμολόγησης των κύριων μερών και του τελικού φινιρίσματος ενός κινητήρα εσωτερικής οδόντωσης [65].

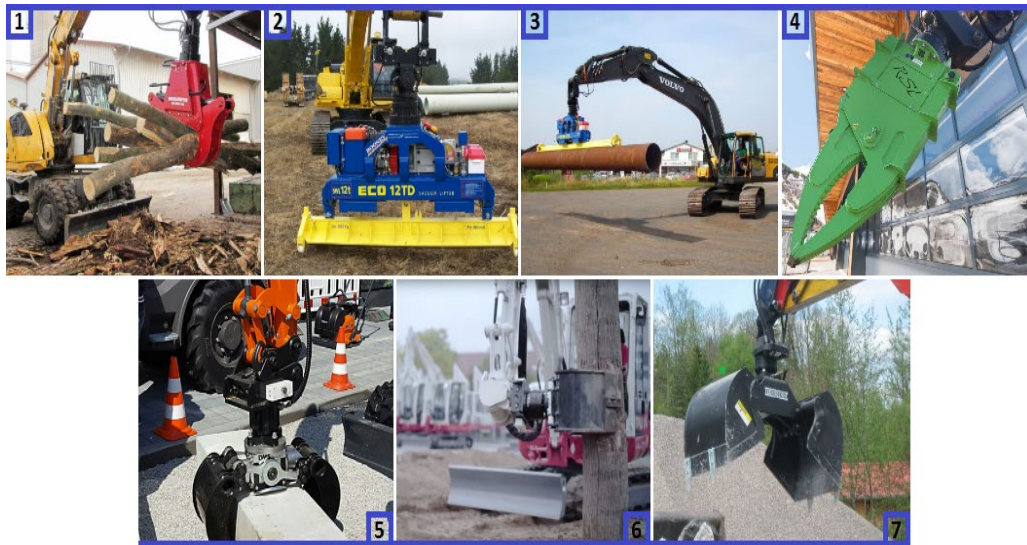
Η εταιρεία εξειδικεύεται στην κατασκευή υδραυλικών περιστροφικών κινητήρων εσωτερικής οδόντωσης, που βασίζονται μόνο στην αρχή λειτουργίας της κατηγορίας με το ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι και εφαρμόζονται κυρίως σε συστήματα συγκράτησης και ανύψωσης, όπως αναπαριστάται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3: Αρπάγη με κινητήρα. (1) Κοχλίας σύνδεσης της αρπάγης με τον βραχίονα, (2) Ηλεκτροϋδραυλικό συγκρότημα, (3) Εύκαμπτες σωληνώσεις διανομής του ρευστού κίνησης για την περιστροφή και κίνηση της αρπάγης, (4) Σιαγόνες, (5) Δοκός, (6) Αρθρώσεις κίνησης των σιαγόνων [65].

Συγκεκριμένα, προσαρμόζονται στο άνω μέρος των αρπάγων γερανών (Εικόνα 4.4: 1, 5, 6), των βραχιόνων συγκράτησης (gripper arms) (Εικόνα 4.4: 4), των εκσκαφέων (Εικόνα 4.4: 7), και διαφόρων άλλων κατασκευαστικών μηχανισμών όπως και σε πλήθος άλλων ειδικών εφαρμογών (Εικόνα 4.4: 2, 3). Σκοπός αυτών των υδραυλικών κινητήρων είναι η αμφίδρομη περιστροφή των αρπαγών ως προς τον άξονα κίνησης κατά τη φάση της σύσφιξης κάποιου φορτίου ή κατά τη διάρκεια της συγκράτησης και ανύψωσης του φορτίου αυτού. Μία σημαντική πρωτοτυπία των περιστροφικών αυτών κινητήρων της αυστριακής εταιρείας, εκτός από την εξασφάλιση της αμφίδρομης περιστροφικής κίνησης, είναι η ικανότητά τους να θέτουν σε κίνηση και τις σιαγόνες που αποτελούν τον εκάστοτε τύπο αρπάγης. Από

την άλλη ο βραχίονας που συνδέεται με το συγκρότημα αρπάγη - κινητήρα, οφείλει την κίνηση του σε διαφορετικά υδραυλικά κυκλώματα. Η κίνησή του επιτυγχάνεται με τη χρήση άλλων υδραυλικών επενεργητών, όπως είναι οι υδραυλικοί κύλινδροι. Να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι περιστροφικοί κινητήρες εσωτερικής οδόντωσης που αξιοποιούνται σε ανάλογες εφαρμογές εξασφαλίζουν μόνο την περιστροφική κίνηση της αρπάγης, ενώ η κίνηση των σιαγόνων επιτυγχάνεται επίσης με τη χρήση υδραυλικών κυλίνδρων.



Εικόνα 4.4: Ορισμένες εφαρμογές προσαρμογής του περιστροφικού κινητήρα εσωτερικής οδόντωσης της AVS Rotators [65].

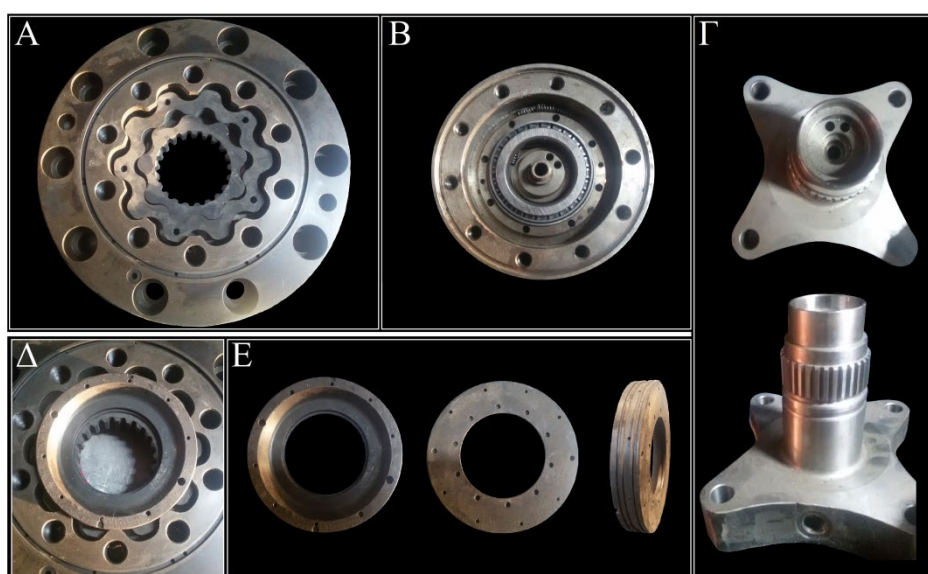
Η εταιρεία διαθέτει ένα ευρύ δίκτυο συνεργατών σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο, το οποίο περιλαμβάνει και την Ελλάδα (Εικόνα 4.5). Η βελτιστοποίηση αυτού του τύπου περιστροφικού κινητήρα με εσωτερική οδόντωση, στα πλαίσια της αυστριακής εταιρείας, διαθέτει και ελληνικό χρώμα, καθώς ο ένας εκ των δύο ιδρυτών της ήταν ελληνικής καταγωγής και πιστώνεται σύμφωνα με την εταιρεία πλήθος πατεντών.



Εικόνα 4.5: Δίκτυο συνεργατών της AVS Rotators [65].

Ο υπεύθυνος διανομής της χώρας μας, δέχτηκε να μας συναντήσει και να απαντήσει στις απορίες μας. Μέσα από τις ερωτήσεις που τέθηκαν, ενημερωθήκαμε σχετικά με την λειτουργία της αυστριακής εταιρείας και πληροφορηθήκαμε για ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά, που αφορούν το υλικό, την κατεργασία, τον τρόπο συναρμολόγησης των επιμέρους μερών που συγκροτούν τον κινητήρα, καθώς και τον τρόπο λειτουργίας του. Τα στοιχεία επικοινωνίας του αντιπροσώπου είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα της εταιρείας, ωστόσο για λόγους διασφάλισης του απορρήτου δεν θα γίνουν γνωστά. Αρχικά, ο αντιπρόσωπος μας ενημέρωσε ότι το δίκτυο των συνεργατών δεν είναι υπεύθυνο μόνο για την εμπορική διακίνηση των κινητήρων αυτών ή των ανταλλακτικών τους, αλλά πολλές φορές και για την κατασκευή ορισμένων εξαρτημάτων τους. Η συναρμολόγηση και ο τελικός έλεγχος, πραγματοποιείται πάντα σε εγκαταστάσεις της κατασκευάστριας εταιρείας. Στη συνέχεια, μας παρουσιάστηκε ο τρόπος και η σειρά συναρμολόγησης, καθώς και ο τρόπος συνεργασίας των βασικών τμημάτων που συγκροτούν το περιστροφικό σύστημα των οδοντωτών τροχών. Τα μέρη αυτά αποτελούσαν τον ρότορα, το ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι, το σταθερό στάτορα, τον αποστάτη διανομής και την άτρακτο εξόδου (Εικόνα 4.6).

Δυστυχώς, δεν υπήρχε τη δεδομένη χρονική στιγμή κάποιος ολοκληρωμένος κινητήρας προς επίδειξη, για αυτό το λόγο τα επιμέρους εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη παρουσίαση ήταν από διαφορετικούς τύπους και μοντέλα υδραυλικών κινητήρων.



Εικόνα 4.6: (Α) Συναρμολόγηση οδοντωτών τροχών, (Β) Κεφαλή κινητήρα - Βαλβίδα ελέγχου διανομής, (Γ) Κινητήρια άτρακτος, (Δ) Τοποθέτηση αποστάτη διανομής και (Ε) Αποστάτης διανομής.

Για την βέλτιστη παρουσίαση των τεχνικών πληροφοριών που συγκεντρώθηκαν, αυτές χωρίστηκαν και ταξινομήθηκαν σε τρεις πίνακες. Στον πρώτο πίνακα (Πίνακας 4.1) κατατάσσονται οι πληροφορίες που σχετίζονται με το υλικό και την κατεργασία του προς μελέτη εξαρτήματος.

Πίνακας 4.1: Κατασκευαστικά δεδομένα.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
Υλικό	31CrMoV9
Θερμική κατεργασία	Διπλή υγρή εναζώτωση (8h)
Μέθοδος Κατεργασίας	CNC

Στον δεύτερο πίνακα (Πίνακας 4.2) τοποθετούνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα, που άνηκε το εξάρτημα.

Πίνακας 4.2: Κινησιολογικά χαρακτηριστικά.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
Αντοχή Περιστροφής με Μέγιστο Φορτίο	Περίπου 30 τόνοι
Ικανότητα Περιστροφής	360° - Αμφίδρομη περιστροφή
Ταχύτητα Περιστροφής	18 rpm

Στον τρίτο πίνακα (Πίνακας 4.3) ανήκουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά σύνδεσης των κύριων κοχλιών σύσφιξης.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά σύσφιξης κοχλιών.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
Μέγεθος Κεντρικού Κοχλία Συγκράτησης του Κινητήρα με τον Βραχίονα του Οχήματος	M135
Σύσφιξη Κεντρικού Κοχλία Συγκράτησης του Κινητήρα με τον Βραχίονα του Οχήματος	200Kg (με τη χρήση δυναμόκλειδου)
Αριθμός Περιφερειακών Κοχλιών	9
Αντοχή Περιφερειακών Κοχλιών σε Δυναμική Φόρτιση	9 1/2 τόνοι/κοχλία
Αντοχή Περιφερειακών Κοχλιών σε Στατικό Φορτίο	18 τόνοι/κοχλία

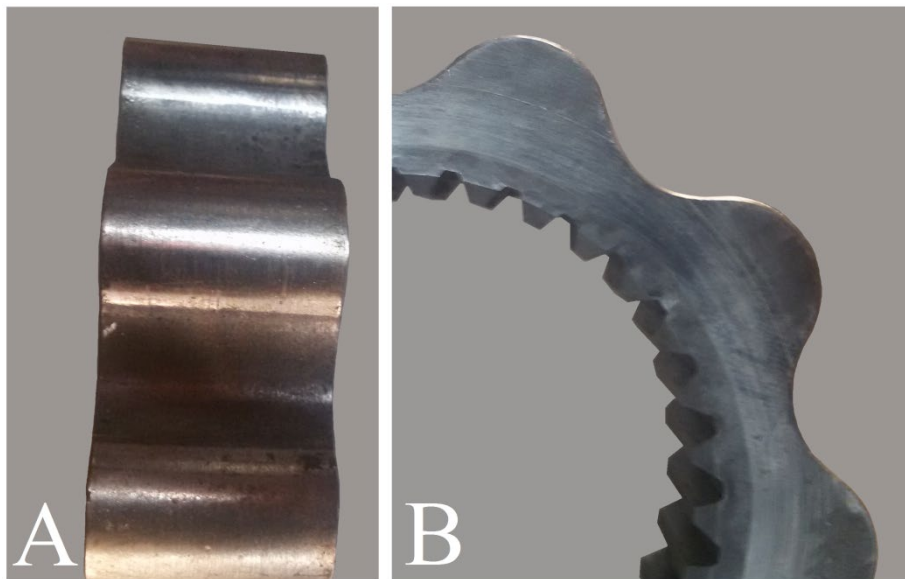
Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που συλλέχθηκαν από τον Έλληνα αντιπρόσωπο σε συνδυασμό με το φωτογραφικό υλικό που συλλέχθηκε και με τα ετοιμοπαράδοτα μοντέλα κινητήρων που παρουσιάζονται αυτή τη στιγμή στην ιστοσελίδα της εταιρείας προκύπτει μία πιθανή κατηγοριοποίηση του κινητήρα στον οποίο λειτουργούσε το προς ανάλυση εσωτερικό γρανάζι (ρότορας). Είναι πιθανόν, να ήταν μέρος ενός περιστροφικού κινητήρα της κατηγορίας των εκσκαφέων και πιο συγκεκριμένα να άνηκε στην οικογένεια του μοντέλου ARB 150 ή σε αυτή του ARB 200 (Εικόνα 4.7). Δυστυχώς ο αντιπρόσωπος δεν ήξερε να μας ενημερώσει για τον ακριβή τύπο του κινητήρα.



Εικόνα 4.7: Μοντέλα κινητήρων της αυστριακής εταιρείας AVS Rotators [71].

Μέσω της παρουσίασης των παραπάνω τεχνικών πληροφοριών γίνεται αντιληπτό το απαιτητικό περιβάλλον στο οποίο θα πρέπει να λειτουργήσουν και να ανταπεξέλθουν οι κινητήρες αυτοί. Παρόλο το αντίξοο περιβάλλον λειτουργίας τους, τα σημάδια φθοράς που παρουσιάστηκαν στην εξωτερική οδόντωση του γραναζιού δεν παρουσιάζουν την αναμενόμενη εικόνα μετά από τρεις περίπου μήνες

λειτουργίας, διότι σύμφωνα και με τον αντιπρόσωπο το προσδόκιμο όριο ζωής των περιστροφικών εσωτερικών μερών ξεπερνά κατά πολύ τα τρία χρόνια συνεχούς λειτουργίας και κατά την αντικατάστασή τους δεν παρουσιάζουν αυτή την εικόνα. Ο αντιπρόσωπος μας παρουσίασε ένα αντίστοιχο γρανάζι - ρότορα το οποίο αντικαταστάθηκε μετά από περισσότερα από τρία χρόνια χρήσης (Εικόνα 4.8). Το γρανάζι αυτό δεν παρουσίαζε έντονα σημάδια φθοράς (αποκολλήσεις υλικού ή έντονες παραμορφώσεις), αλλά σημάδια που σύμφωνα με τον αντιπρόσωπο θεωρούνται φυσιολογικά και οφείλονται στη συνεργασία των επιμέρους μεταλλικών στοιχείων. Συγκεκριμένα στη περιοχή της εξωτερικής οδόντωσης (Εικόνα 4.8: A) διακρίνονται γυαλισμένες περιοχές κυρίως στις κορυφές των οδόντων, οι οποίες οφείλονται στη σύμπλεξη των οδοντωτών τροχών. Στην πάνω πλευρά του ρότορα (Εικόνα 4.8: B) γίνονται εμφανή οι τροχιακές γραμμές που οφείλονται στη περιστροφή και ολίσθηση της επιφάνειας πάνω στο κέλυφος του κινητήρα.



Εικόνα 4.8: Μεταχειρισμένο γρανάζι - ρότορας.

Γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές των ανοχών μεταξύ των συνεργαζόμενων περιστροφικών οδοντωτών μερών είναι συγκεκριμένες και πρέπει να διατηρούνται εντός αυστηρών ορίων. Η παραμικρή αλλοίωση στην επιφάνεια της οδόντωσης των γραναζιών, που εμφανίζεται εξαιτίας της χρήσης τους, μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ορθή λειτουργία του κινητήρα.

Οι περισσότεροι μηχανικοί επισκευής κινητήρων χαρακτηρίζουν τα μέταλλα ως ζωντανούς οργανισμούς, που εκφράζουν την ιστορία τους μέσα από τα σημάδια που παρουσιάζονται στην επιφάνεια τους και αναλόγως της πείρας που οι ίδιοι

διαθέτουν μπορούν αρχικά να τα παρατηρήσουν και στην συνέχεια να τα ερμηνεύσουν. Πραγματοποιούν, δηλαδή, μία μακροσκοπική, τις περισσότερες φορές εμπειρική, εξέταση. Θεωρούν επίσης ότι η αστοχία ενός εξαρτήματος δεν πιστώνεται πάντα μόνο στο ίδιο το εξάρτημα αλλά και σε άλλους συνδυαστικούς πολλές φορές παράγοντες.

Βασική προϋπόθεση για τον εντοπισμό της κύριας αιτίας της αστοχίας, ειδικά όταν αυτή δεν προέρχεται από το ίδιο το εξάρτημα, αλλά οφείλεται σε διαφορετικά αίτια, είναι η καταγραφή οποιασδήποτε λεπτομέρειας παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια της αποσυναρμολόγησης του κινητήρα. Δυστυχώς, τόσο από ολόκληρο τον κινητήρα όσο και από το σύστημα των εσωτερικών περιστροφικών οδοντωτών τροχών του, διατίθεται μόνο ο ρότορας. Δεν διαθέτουμε ούτε τον στάτορα, ούτε το ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι, ούτε γνωρίζουμε εάν υπήρξαν σημάδια φθοράς και εάν ναι σε τι βαθμό, στην επιφάνειά τους ή σε άλλα μέρη και εξαρτήματα του κινητήρα. Για αυτό το λόγο η ανάλυση αστοχίας που θα ακολουθήσει θα βασιστεί μόνο στα αποτελέσματα που θα ληφθούν από τον μακροσκοπικό και μικροσκοπικό έλεγχο που θα υποβληθεί το γρανάζι - ρότορας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

Αμέσως μετά τη συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών για το προς μελέτη εξάρτημα και πριν την έναρξη των καταστροφικών δοκιμών, ακολουθεί η προκαταρκτική οπτική εξέταση. Η εξέταση αυτή ονομάζεται μακροσκοπικός έλεγχος ή οπτική επισκόπηση. Το πρώτο βήμα του ελέγχου είναι η διαστασιολόγηση του εξαρτήματος και εν συνεχεία η επιφανειακή επιθεώρησή του. Από τον οπτικό έλεγχο επιτυγχάνεται η παρατήρηση των αλλοιώσεων που έχει υποστεί το εξεταζόμενο εξάρτημα.

Ο μακροσκοπικός έλεγχος χρήζει εξέχουσας σημασίας, καθώς τα στοιχεία που συλλέγονται σε αυτό το στάδιο καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τον σχεδιασμό και τα βήματα που θα ακολουθηθούν στη συνέχεια της μελέτης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σημείο ή τα σημεία κοπής που επιλέγονται για το στάδιο των καταστροφικών δοκιμών. Σημεία τα οποία καθορίζονται από την ποιότητα της επιφάνειας που έχει παρατηρηθεί, όπως είναι οι ρωγμές, οι αποκολλήσεις υλικού και οι πλαστικές παραμορφώσεις. Εάν τα σημεία κοπής ληφθούν λανθασμένα, πιθανόν τα εξεταζόμενα τμήματα που θα προκύψουν να μην αποδώσουν την κατάλληλη εικόνα για τον εντοπισμό των αιτιών της αστοχίας και όπως γίνεται αντιληπτό είναι ένα στάδιο της μελέτης το οποίο δεν μπορεί να επαναληφθεί.

Τα δεδομένα αυτά πάντοτε καταγράφονται χρησιμοποιώντας κάποιο οπτικό μέσο, το οποίο αξιοποιείται σε πρώτη φάση ως βοήθημα του αναλυτή κατά τη μελέτη της ανάλυσης αστοχίας που ακολουθεί, αλλά και ως αρχείο κατά την μεταγενέστερη μελέτη της από κάποιον άλλον ενδιαφερόμενο.

5.1 Εξοπλισμός μακροσκοπικού ελέγχου

Αρχικά, η μακροσκοπική ανάλυση των επιφανειών φθοράς πραγματοποιήθηκε δια γυμνού οφθαλμού και εν συνεχεία μέσω στερεοσκοπίου. Για την καταγραφή των δια γυμνού οφθαλμού πληροφοριών χρησιμοποιήθηκε επαγγελματική ψηφιακή κάμερα (Μοντέλο: Sony A290) και θάλαμος ελεγχόμενου φωτισμού (Εικόνα 5.1). Με την φωτογραφική μηχανή έγινε καταγραφή της γενικής μορφολογίας του εξεταζόμενου εξαρτήματος. Με το στερεοσκόπιο έγινε καταγραφή της μορφολογίας του εξαρτήματος σε αρκετά μεγαλύτερες μεγεθύνσεις (περίπου έως 230x), με σκοπό την σε βάθος διερεύνηση της προκλειθής φθοράς. Το στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το: Dino - Lite Premier Digital Microscope με αριθμό μοντέλου: AM4113ZT και σειριακό αριθμό: 24BIM00 (Εικόνα 5.2). Το στερεοσκόπιο αυτό αποτελεί ιδιοκτησία του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών, του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.



Εικόνα 5.1: Θάλαμος φωτογράφισης (photobooth).

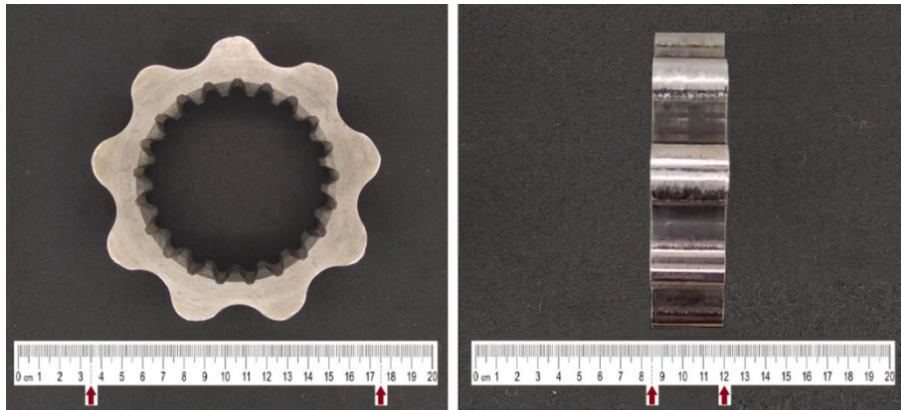


Εικόνα 5.2: Στερεοσκόπιο Dino Lite 2.0.

5.2 Οπτική επιθεώρηση

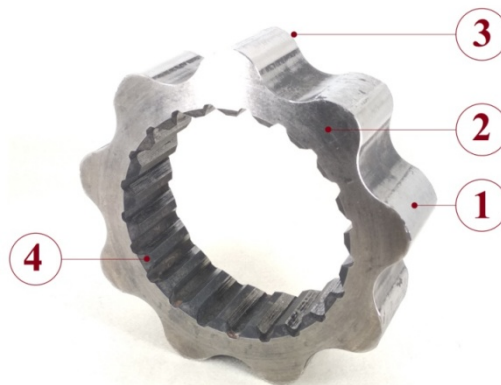
5.2.1 Διαστασιολόγηση και περιγραφή εξαρτήματος

Το προς μελέτη εξάρτημα αποτελεί τον εσωτερικό οδοντωτό τροχό ενός κινητήρα εσωτερικής οδόντωσης σταθερού στάτορα με ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι (Εικόνα 5.3). Ο εσωτερικός οδοντωτός τροχός ονομάζεται ρότορας και αποτελείται από 9 δόντια στην εξωτερική του οδόντωση και από 21 δόντια στην εσωτερική του οδόντωση (πλήμνη). Η εξωτερική διάμετρος του οδοντωτού τροχού είναι περίπου 140mm και το πάχος του 35mm. Εξαιτίας των αλλοιώσεων που έχει υποστεί το προς μελέτη εξάρτημα δεν μπορούν να ληφθούν μετρήσεις ακριβείας.



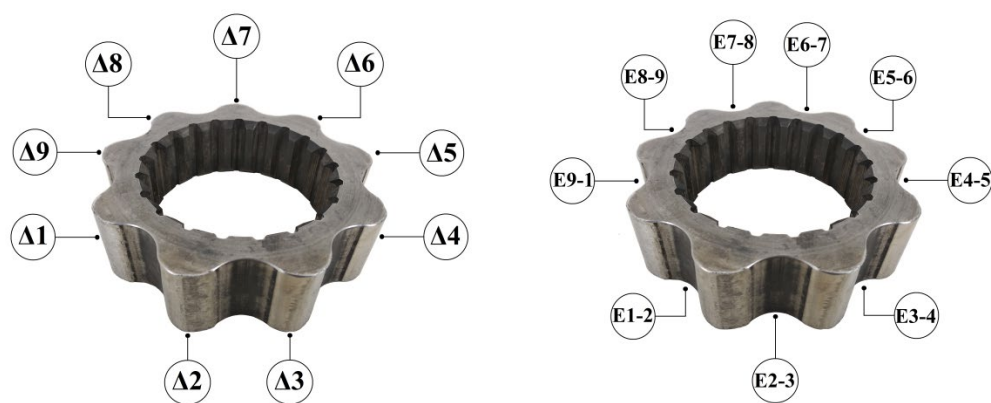
Εικόνα 5.3: Διαστασιολόγηση του προς μελέτη εξαρτήματος.

Όπως παρατηρείται στην εικόνα 5.4 ο ρότορας διέπεται από τέσσερις επιφάνειες: την επιφάνεια της εξωτερικής οδόντωσης (1), την επιφάνεια Β (2), την επιφάνεια Α (3), και την επιφάνεια της εσωτερικής οδόντωσης (4). Η επιφάνεια Α αποτελεί την επιφάνεια που έρχεται σε επαφή ο αποστάτης διανομής (Εικόνα 4.6: Δ). Οι επιφάνειες αυτές θα αποτελέσουν τις περιοχές ελέγχου της μακρό - οπτικής επιθεώρησης.



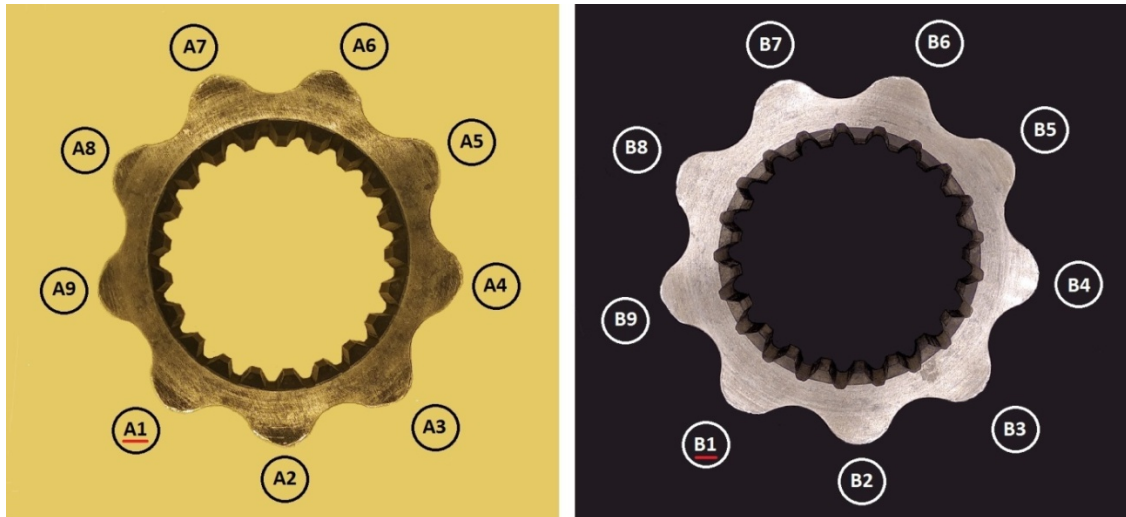
Εικόνα 5.4: Τμηματοποίηση του προς μελέτη εξαρτήματος.

Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 5.5) παρουσιάζεται η επιλεγθείσα αρίθμηση των οδοντώσεων. Η αρίθμηση των οδοντώσεων ακολουθεί αντιωρολογιακή φορά, ξεκινώντας από τον αριθμό 1 και καταλήγοντας στον αριθμό 9. Η ταυτοποίηση ολοκληρώνεται με την χρήση του προθέματος Δ, ως δηλωτικό αναφοράς του εκάστοτε δοντιού. Με αυτό τον τρόπο ο χαρακτηρισμός του κάθε δοντιού διαθέτει την μορφή Δ1, Δ2 κ.ο.κ. Αξίζει να αναφερθεί ότι η αναγνώριση του δοντιού Δ1 γινόταν με βάση συγκεκριμένων αλλοιώσεων που διαθέτει, μέχρι που έγινε η ταυτοποίησή του. Όσον αφορά την αρίθμηση των εγχοπών του οδοντωτού τροχού, χρησιμοποιείται το πρόθεμα Ε, ως δηλωτικό αναφοράς της εκάστοτε εγχοπής, σε συνδυασμό με τους αριθμούς των εκατέρωθεν δοντιών. Με αυτό τον τρόπο ο χαρακτηρισμός της κάθε εγχοπής διαθέτει την μορφή Ε1-2, Ε2-3 κ.ο.κ.



Εικόνα 5.5: Αρίθμηση δοντιών και εγχοπών.

Για την βέλτιστη οργάνωση των ευρημάτων του οπτικού ελέγχου των δύο πλευρών Α και Β που παρουσιάζεται στη συνέχεια, αριθμήθηκαν και τα προφίλ των επιμέρους δοντιών και στις δύο επιφάνειες (Εικόνα 5.6). Σε αυτή την περίπτωση το πρόθεμα Δ δίνει τη θέση του στο δηλωτικό πρόθεμα Α ή Β, ανάλογα με την επιφάνεια που εξετάζεται. Με αυτό τον τρόπο ο χαρακτηρισμός του κάθε δοντιού ανά επιφάνεια διαθέτει την μορφή Α1, Α2 κ.ο.κ. για την επιφάνεια Α και Β1, Β2 κ.ο.κ. για την επιφάνεια Β.

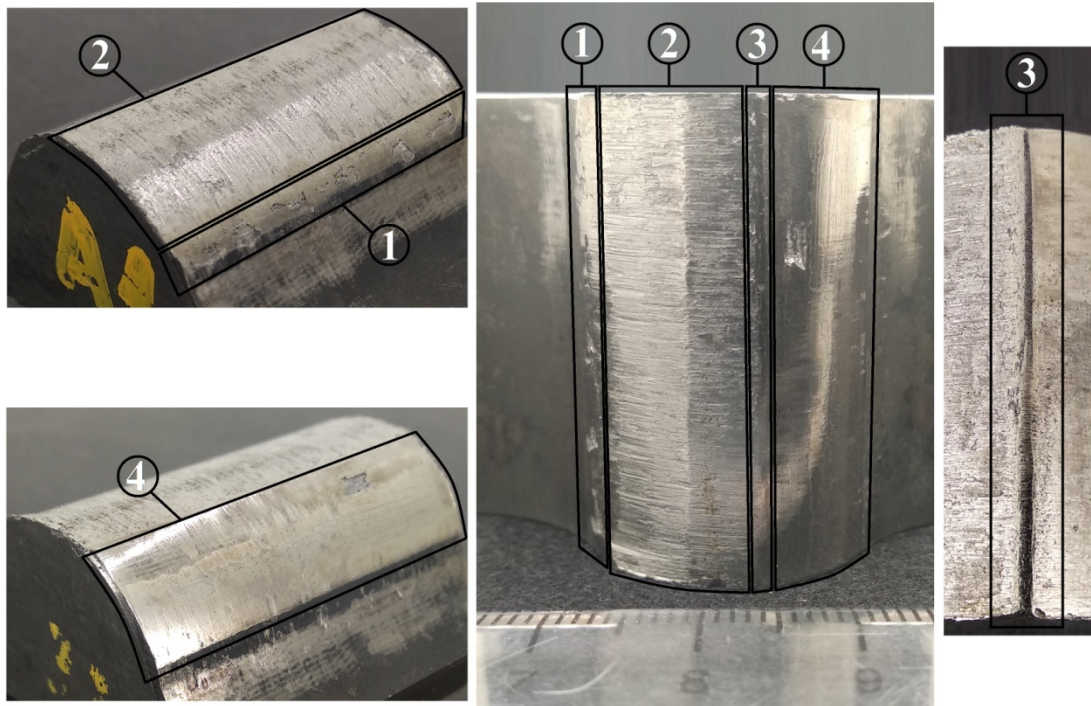


Εικόνα 5.6: Αρίθμηση των δοντιών στην επιφάνεια A και B.

5.2.2 Επιθεώρηση εξωτερικής οδόντωσης

Η εξωτερική επιφάνεια οδόντωσης αποτελεί την επιφάνεια λειτουργίας του ρότορα. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και της εσωτερικής οδόντωσης του ενδιάμεσου οδοντωτού τροχού σχηματίζονται οι θάλαμοι λειτουργίας του κινητήριου μέσου. Σε αυτή την περιοχή εντοπίζεται η κύρια φθορά του εξαρτήματος.

Κατά την οπτική επιθεώρηση δια γυμνού οφθαλμού της εξωτερικής επιφάνειας διακρίνονται γυαλισμένες περιοχές στα δόντια και σκουρόχρωμης απόχρωσης περιοχές στις εγκοπές. Η σκουρόχρωμη απόχρωση, η οποία παρατηρείται και σε άλλες επιφάνειες του ρότορα, είναι αποτέλεσμα της θερμοχημικής κατεργασίας της εναζώτωσης. Γίνεται αντιληπτό ότι κατά τη σύμπλεξη των δύο οδοντωτών τροχών, οι οδοντώσεις του ενδιάμεσου οδοντωτού δαχτυλιδιού έρχονται σε επαφή μόνον με τις οδοντώσεις του ρότορα και όχι και με τις εγκοπές. Για τον λόγο αυτό μόνο οι επιφάνειες των επιμέρους οδοντώσεων παρουσιάζουν στοιχεία φθοράς. Με βάση του τρόπου σύμπλεξης και της σχετικής κίνησης που χαρακτηρίζει τη συνεργασία του ενδιάμεσου οδοντωτού δαχτυλιδιού με τον ρότορα διακρίνονται τέσσερις περιοχές φθοράς: η περιοχή κρούσης, η περιοχή ολίσθησης, η περιοχή μετάβασης και η περιοχή συμπίεσης. Σύμφωνα με τα συλλεχθέντα ιστορικά στοιχεία, οι περιοχές αυτές δεν θα έπρεπε να υφίστανται. Η αρίθμηση των περιοχών που παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 5.7) έγινε με βάση τη χρονική σειρά διαμόρφωσης της κάθε περιοχής.



Εικόνα 5.7: Απεικόνιση των περιοχών φθοράς.

Η αρχή της σύμπλεξης ενός δοντιού του οδοντωτού δαχτυλιδιού με ένα δόντι του ρότορα πραγματοποιείται υπό την μορφή κρούσης. Η κρούση πραγματοποιείται πλησίον της βάσης του δοντιού του ρότορα. Σε αυτή την περιοχή διακρίνονται εκλεπίσεις υλικού. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται ως περιοχή κρούσης.

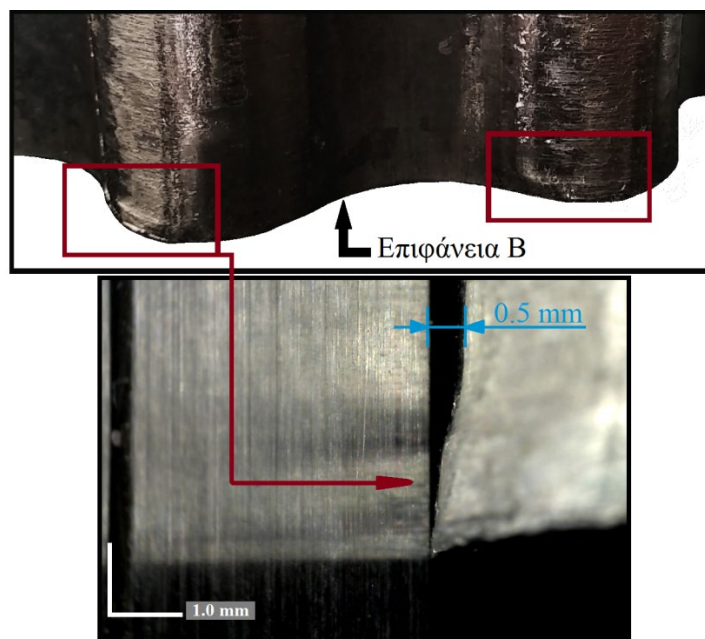
Στη συνέχεια η επιφάνεια του δοντιού του δαχτυλιδιού ολισθαίνει επί της επιφάνειας του δοντιού του ρότορα, προκαλώντας μία περιοχή εκτεταμένης φθοράς. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται ως περιοχή ολίσθησης.

Ως αποτέλεσμα της ολίσθησης, πλησίον της κορυφής του δοντιού του ρότορα παρατηρείται μετατόπιση υλικού υπό τη διαμόρφωση μίας διαμήκουσ νεύρωσης. Η διαμήκης νεύρωση χαρακτηρίζεται από πλαστική παραμόρφωση και από μικρές αποκολλήσεις υλικού. Για το λόγο ότι αποτελεί μία μεικτή περιοχή και οριοθετεί την περιοχή ολίσθησης με την επόμενη περιοχή φθοράς και χαρακτηρίζεται ως περιοχή μετάβασης.

Η τέταρτη επιφάνεια φθοράς παρουσιάζει μία συμπιεσμένη μορφολογία, εξαιτίας της σχετικής κίνησης του δαχτυλιδιού επί του ρότορα. Στην περιοχή αυτή γίνονται αντιληπτές διαμήκεις μικρο - ρηγματώσεις. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται ως περιοχή συμπίεσης.

Στην περιοχή της ολίσθησης από την πλευρά της επιφάνειας Α προς αυτήν της Β διακρίνεται ανομοιόμορφη διαμήκης φθορά, η οποία τεκμηριώνεται από την ύπαρξη πλαστικής παραμόρφωσης στη Β πλευρά. Παρόλο που η πλαστική

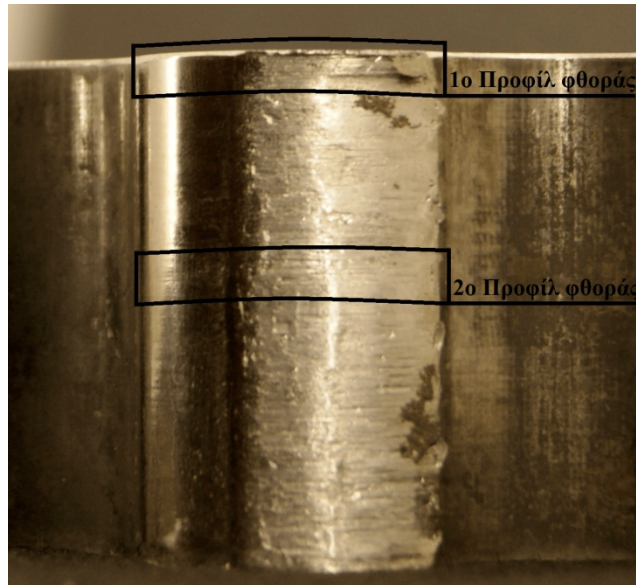
παραμόρφωση γίνεται αντιληπτή δια γυμνού οφθαλμού, χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο σε μεγέθυνση 20x, ώστε να υπολογιστεί η υψομετρική διαφορά της παραμόρφωσης. Σύμφωνα με την εικόνα 5.8 και την κλίμακα που προκύπτει συναρτήσει της κάθε μεγέθυνσης, διακρίνεται ότι η υψομετρική απόκλιση είναι της τάξης του 0,5mm.



Εικόνα 5.8: Απεικόνιση ανομοιόμορφης διαμήκης φθοράς.

Από την εξέταση της οδόντωσης του ρότορα παρατηρείται ότι το μοτίβο της φθοράς που εμφανίζεται σε κάθε δόντι είναι επαναλαμβανόμενο. Για το λόγο αυτό δεν τέθηκαν και τα εννέα δόντια του ρότορα σε περαιτέρω εξέταση υπό τη χρήση του στερεοσκοπίου, παρα μόνον τρία: το Δ1, το Δ6 και το Δ9. Η επιλογή έγινε τυχαία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το φωτογραφικό υλικό που συλλέχθηκε υπό τη χρήση του στερεοσκοπίου και που παρουσιάζεται στη συνέχεια για κάθε δόντι, έχει χωριστεί σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος αναφέρεται στην εξέταση του προφίλ της φθοράς από άκρη σε άκρη. Σε κάθε περίπτωση επιλέχθηκαν δύο προφίλ (Εικόνα 5.9), ένα που στοχεύει στον έλεγχο της πλαστικής παραμόρφωσης στη Β πλευρά (Εικόνα 5.8) και ένα δεύτερο που ελέγχει τον σχηματισμό της φθοράς στο κέντρο του δοντιού. Στο δεύτερο μέρος εξετάζεται η μορφολογία των εκλεπίσεων, της πλαστικής παραμόρφωσης και των ρηγματώσεων που εντοπίζονται στην περιοχή της κρούσης. Στο τρίτο μέρος εξετάζονται οι διαμήκεις ρηγματώσεις που εντοπίστηκαν στην περιοχή της συμπίεσης.

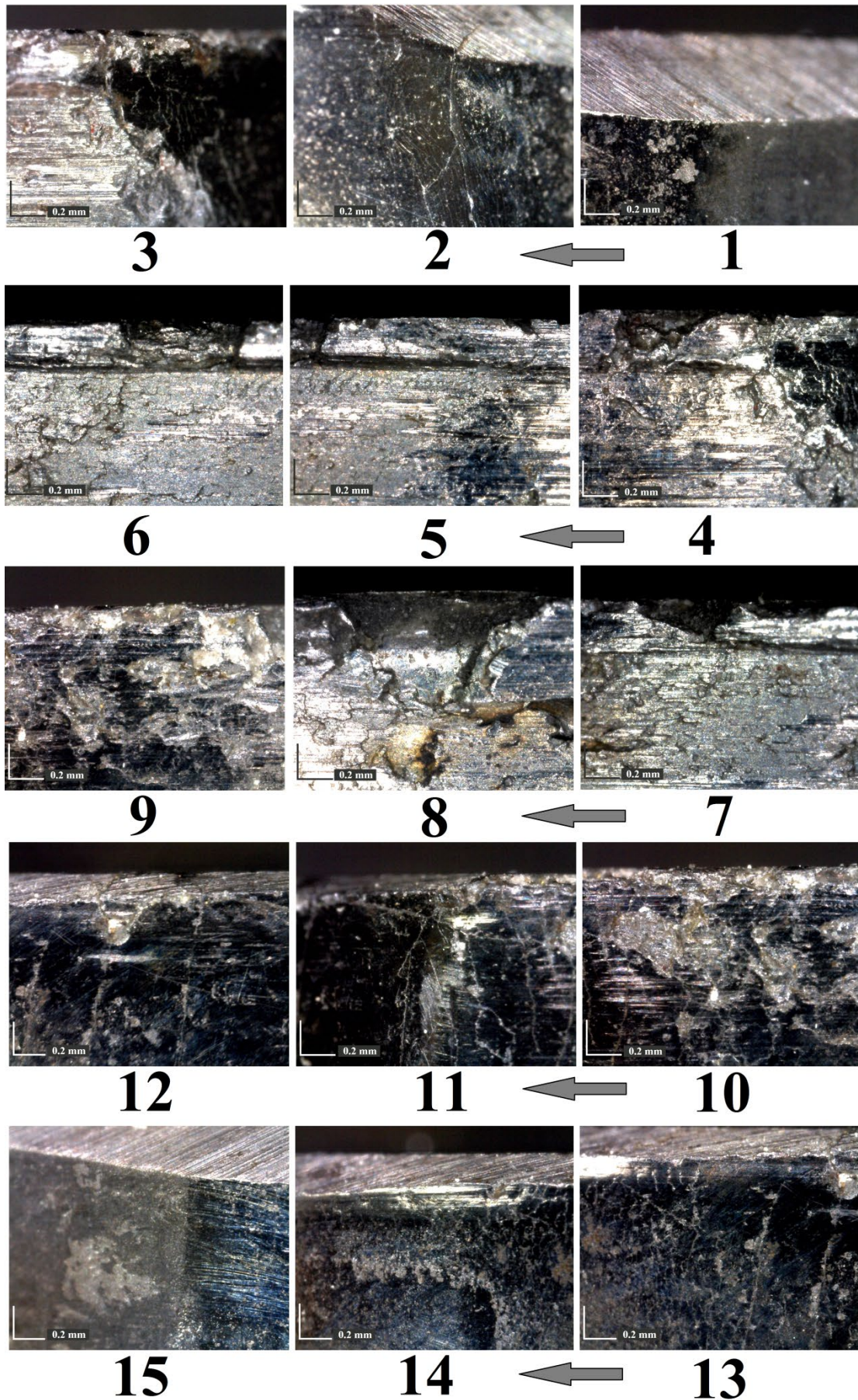


Εικόνα 5.9: Απεικόνιση των προφίλ φθοράς.

Δόντι Δ1

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η διαμορφωμένη φθορά που έχει προκύψει στην οδόντωση Δ1, από την περιοχή της κρούσης έως το πέρας της περιοχής της συμπίεσης. Η καταγραφή των επιφανειών φθοράς πραγματοποιήθηκε σε μεγέθυνση στερεοσκοπίου 230x με υψομετρική απόσταση σχεδόν εφαπτομενική επί της εξεταζόμενης επιφανείας. Στην εικόνα 5.10 παρουσιάζεται το πρώτο προφίλ ελέγχου από την πλευρά Β, όπου:

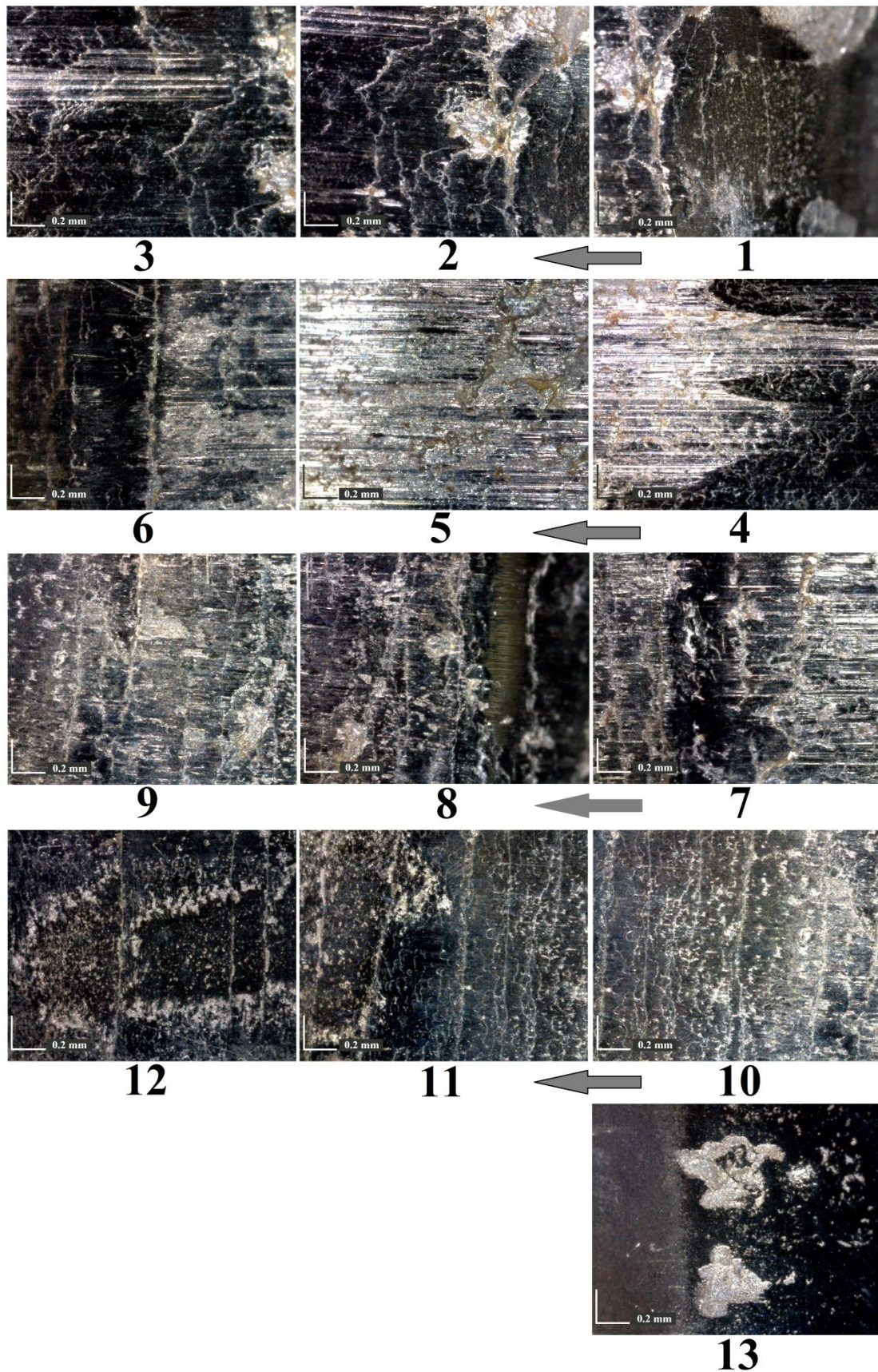
- Οι περιοχές 1-2 ανήκουν στην περιοχή της κρούσης.
- Οι περιοχές 2-3 ανήκουν στην αρχή της πλαστικής παραμόρφωσης που εντοπίζονται στην πλευρά Β.
- Οι περιοχές 4-8 ανήκουν στην περιοχή της ολίσθησης.
- Οι περιοχές 9-11 ανήκουν στην περιοχή της μετάβασης.
- Οι περιοχές 12-15 ανήκουν στην περιοχή της συμπίεσης.
- Η περιοχή 4 αντιστοιχεί στην έναρξη της ολίσθησης.
- Η περιοχή 9 αντιστοιχεί στο τέλος της ολίσθησης και στην έναρξη της μεταβατικής περιοχής.
- Η περιοχή 11 αντιστοιχεί στην λήξη της μεταβατικής περιοχής και στην έναρξη της περιοχής της συμπίεσης.
- Η περιοχή 15 αντιστοιχεί στην λήξη της περιοχής της συμπίεσης.



Εικόνα 5.10: Παρουσίαση του Ιου προφίλ φθοράς (Μεγέθυνση στερεοσκοπίου: 230x).

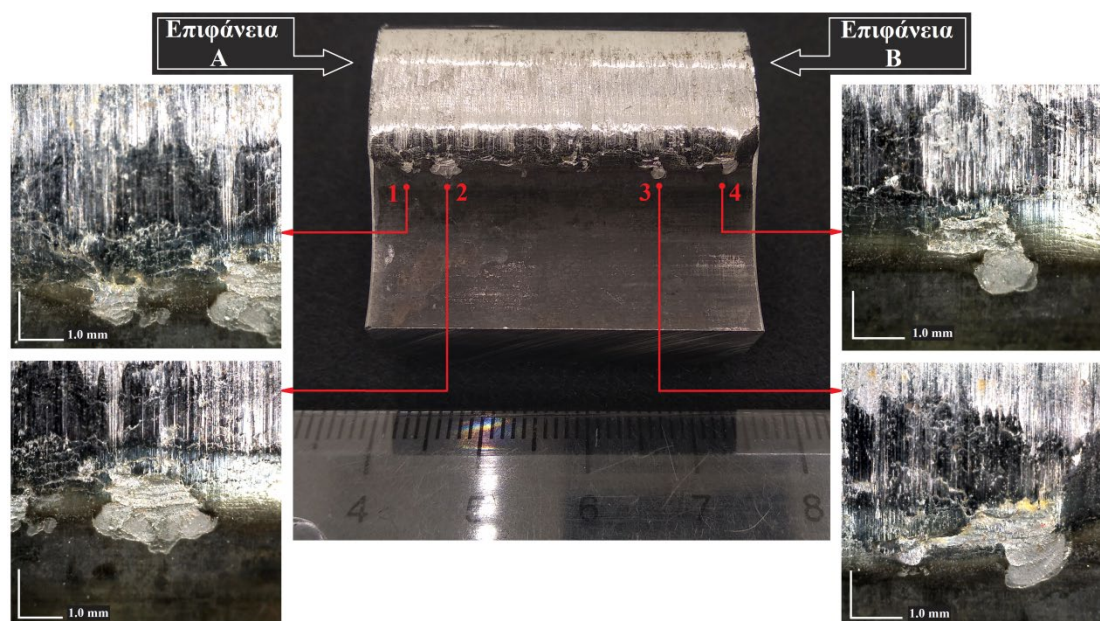
Στην εικόνα 5.11 παρουσιάζεται το δεύτερο προφίλ ελέγχου στη μέση του δοντιού, όπου:

- Οι περιοχές 1-3 ανήκουν στην περιοχή της κρούσης.
- Οι περιοχές 4-6 ανήκουν στην περιοχή της ολίσθησης.
- Οι περιοχές 6-8 ανήκουν στην περιοχή της μετάβασης.
- Οι περιοχές 8-13 ανήκουν στην περιοχή της συμπίεσης.
- Η περιοχή 4 αντιστοιχεί στην έναρξη της ολίσθησης.
- Η περιοχή 6 αντιστοιχεί στο τέλος της ολίσθησης και στην έναρξη της μεταβατικής περιοχής.
- Η περιοχή 8 αντιστοιχεί στην λήξη της μεταβατικής περιοχής και στην έναρξη της περιοχής της συμπίεσης.
- Η περιοχή 13 αντιστοιχεί στην λήξη της περιοχής της συμπίεσης.



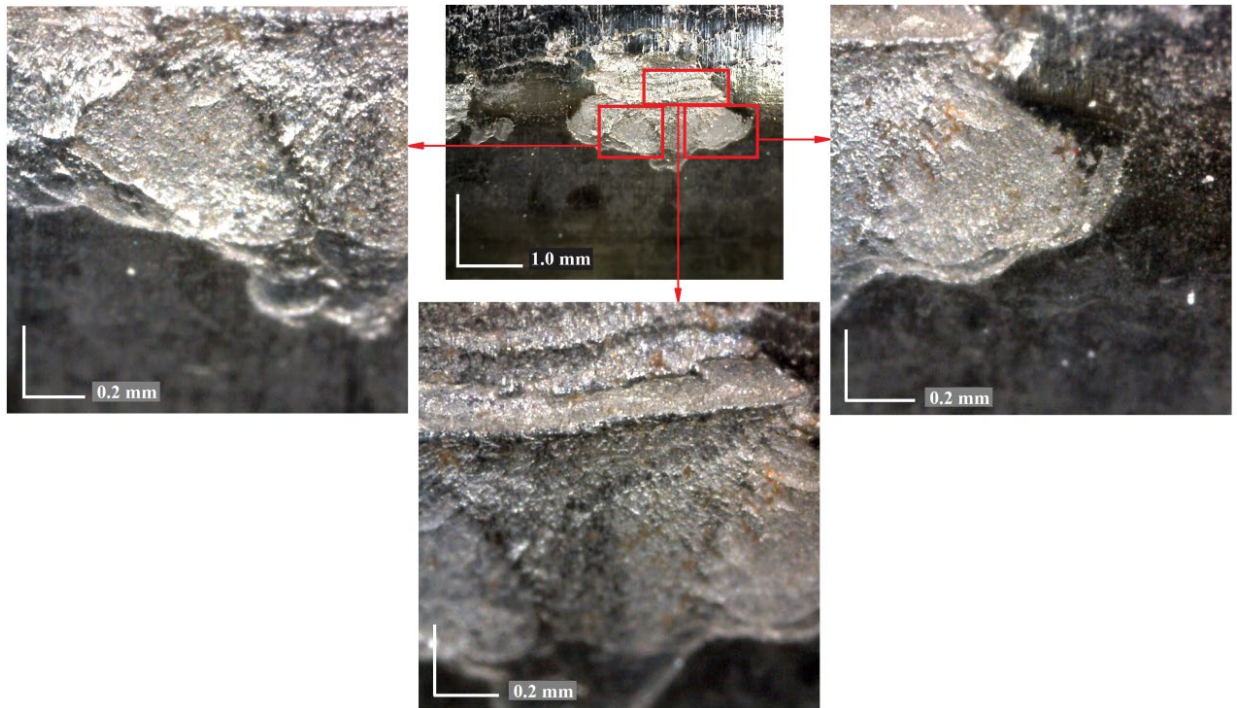
Εικόνα 5.11: Παρουσίαση του 2ου προφίλ φθοράς (Μεγέθυνση στερεοσκοπίου: 230x).

Στην συνέχεια ελέγχεται η περιοχή της κρούσης. Από τις αλλοιώσεις που διακρίνονται σε αυτή την περιοχή επιλέγονται προς εξέταση αυτές με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον (Εικόνα 5.12). Η μεγέθυνση που αρχικά εφαρμόζεται στο στερεοσκόπιο είναι 50x με υψομετρική απόσταση σχεδόν εφαπτομενική επί της εξεταζόμενης επιφανείας του ρότορα. Σε αυτή την μεγέθυνση αποτυπώνεται η πλήρης μορφολογία των επιλεγμένων ξεφλουδισμάτων.

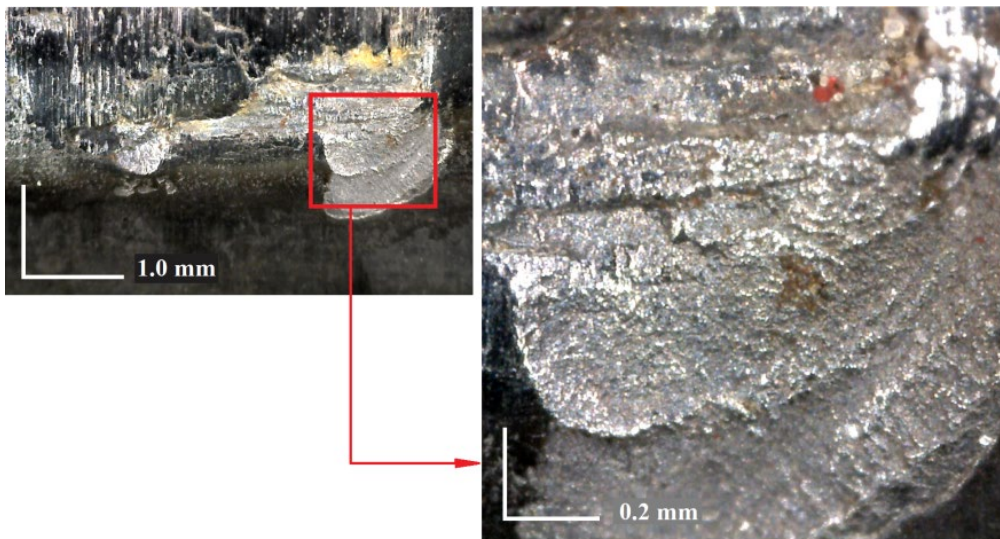


Εικόνα 5.12: Απεικόνιση των ψαθυρών εκλείψεων στην περιοχή κρούσης (50x).

Για την εξέταση της επιφανείας θραύσης των ξεφλουδισμάτων εφαρμόστηκε μεγέθυνση 230x με υψομετρική απόσταση σχεδόν εφαπτομενική επί της εξεταζόμενης επιφανείας. Στην εικόνα 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκλείψης No2 και στην εικόνα 5.14 της εκλείψης No4, από τον έλεγχο σε αυτή τη μεγέθυνση.

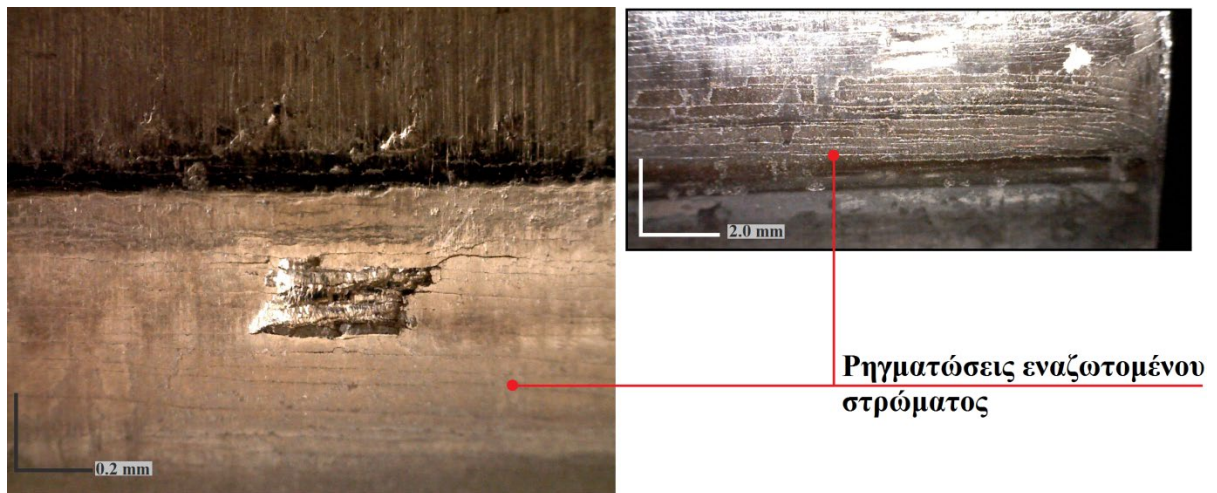


Εικόνα 5.13: Μεγέθυνση εκλέπισης No 2, τεκμηρίωση ψαθυρής αποκόλλησης (230x).



Εικόνα 5.14: Μεγέθυνση ξεφλουδίσματος No 4, τεκμηρίωση ψαθυρής αποκόλλησης (230x).

Τέλος, ελέγχονται οι επιφανειακές ρηγματώσεις του υλικού στην περιοχή της συμπίεσης (Εικόνα 5.15). Οι ρηγματώσεις αυτές παρουσιάζουν παράλληλη κατεύθυνση μεταξύ τους και αρχίζουν να αποκλίνουν η μία από την άλλη, καθώς οδεύουν προς την πλευρά Α. Κατ' εξαίρεση, το δόντι αυτό παρουσιάζει στην περιοχή της συμπίεσης μία μεγάλη αποκόλληση υλικού, η οποία αξιοποιήθηκε ως ένδειξη αναφοράς στην αρίθμηση των οδοντώσεων.

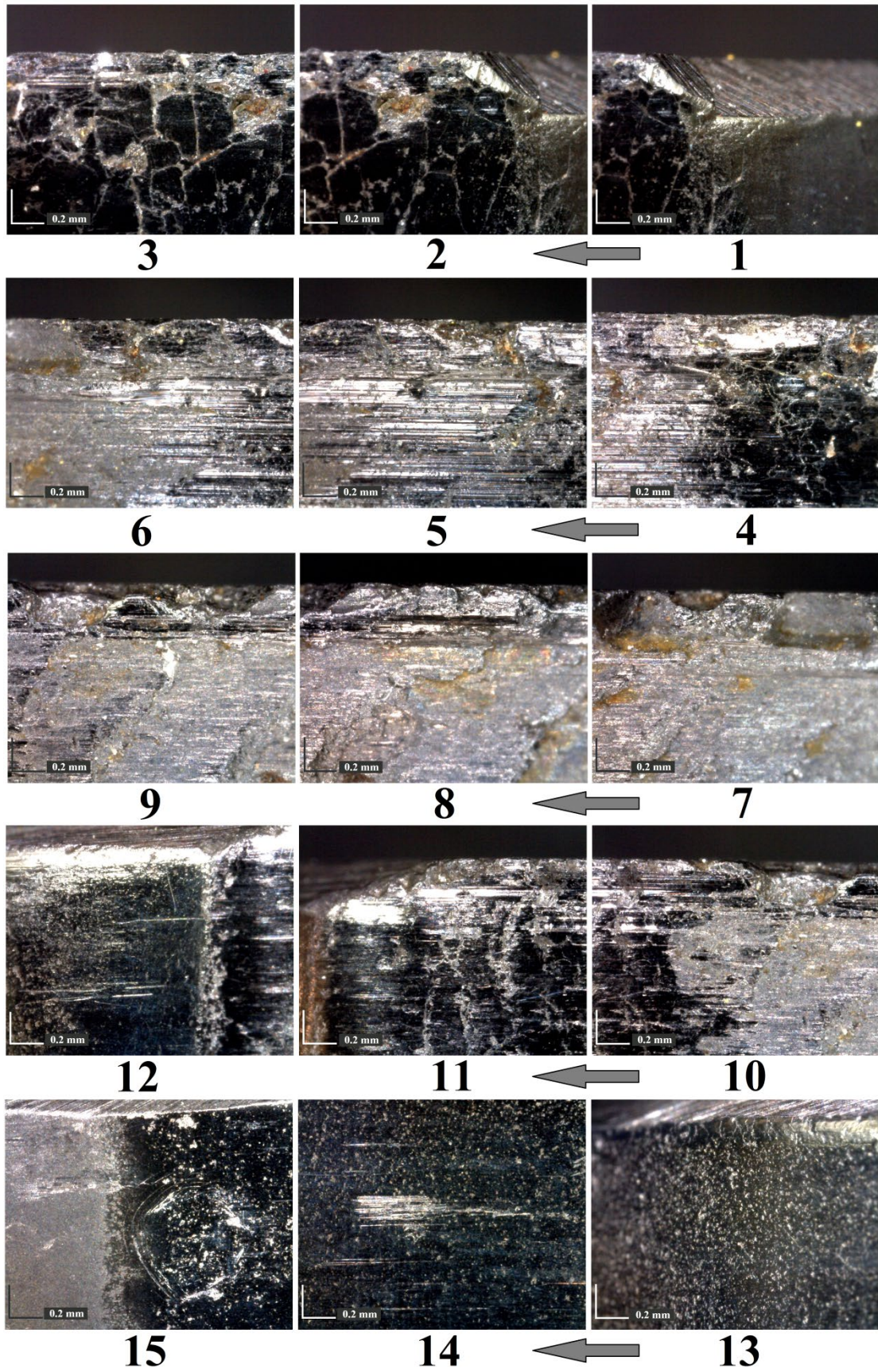


Εικόνα 5.15: Απεικόνιση της αποκόλλησης αναφοράς (230x) και των ρηγματώσεων (20x).

Δόντι Δ6

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η διαμορφωμένη φθορά που έχει προκύψει στην οδόντωση Δ6, από την περιοχή της κρούσης έως το πέρας της περιοχής της συμπίεσης. Η καταγραφή των επιφανειών φθοράς πραγματοποιήθηκε σε μεγέθυνση στερεοσκοπίου 230x με υψομετρική απόσταση σχεδόν εφαπτομενική επί της εξεταζόμενης επιφανείας. Στην εικόνα 5.16 παρουσιάζεται το πρώτο προφίλ ελέγχου από την πλευρά Β, όπου:

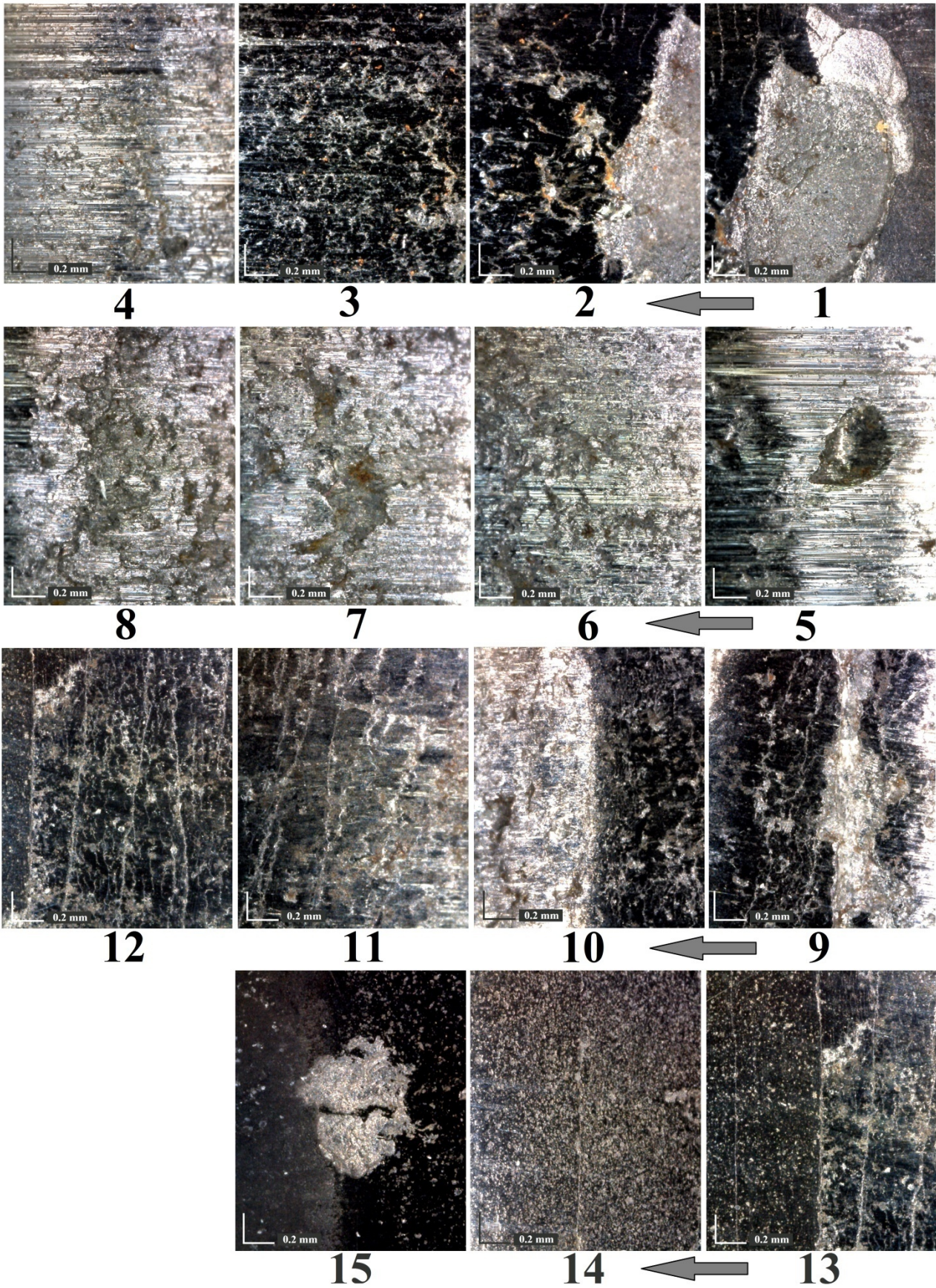
- Οι περιοχές 1-2 ανήκουν στην περιοχή της κρούσης.
- Οι περιοχές 2-4 ανήκουν στην πλαστική παραμόρφωση που εντοπίζεται στην πλευρά Β.
- Οι περιοχές 4-10 ανήκουν στην περιοχή της ολίσθησης
- Οι περιοχές 11-12 ανήκουν στην περιοχή της μετάβασης.
- Οι περιοχές 12-15 ανήκουν στην περιοχή της συμπίεσης.
- Η περιοχή 4 αντιστοιχεί στην έναρξη της ολίσθησης.
- Η περιοχή 10 αντιστοιχεί στο τέλος της ολίσθησης και στην έναρξη της μεταβατικής περιοχής.
- Η περιοχή 12 αντιστοιχεί στην λήξη της μεταβατικής περιοχής και στην έναρξη της περιοχής της συμπίεσης.
- Η περιοχή 15 αντιστοιχεί στην λήξη της περιοχής της συμπίεσης.



Εικόνα 5.16: Παρουσίαση του 1ου προφίλ φθοράς (230x).

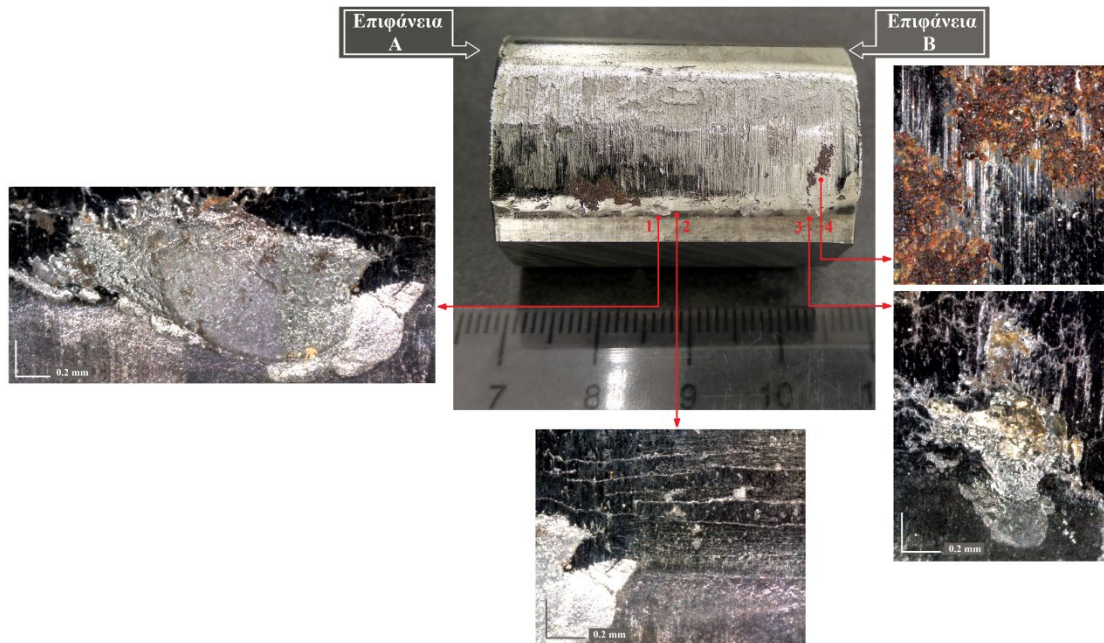
Στην εικόνα 5.17 παρουσιάζεται το δεύτερο προφίλ ελέγχου στη μέση του δοντιού, όπου:

- Οι περιοχές 1-2 ανήκουν στην περιοχή της κρούσης.
- Οι περιοχές 3-8 ανήκουν στην περιοχή της ολίσθησης.
- Οι περιοχές 9-10 ανήκουν στην περιοχή της μετάβασης.
- Οι περιοχές 11-15 ανήκουν στην περιοχή της συμπίεσης.
- Η περιοχή 3 αντιστοιχεί στην έναρξη της ολίσθησης.
- Η περιοχή 8 αντιστοιχεί στο τέλος της ολίσθησης και στην έναρξη της μεταβατικής περιοχής.
- Η περιοχή 10 αντιστοιχεί στην λήξη της μεταβατικής περιοχής και στην έναρξη της περιοχής της συμπίεσης.
- Η περιοχή 15 αντιστοιχεί στην λήξη της περιοχής της συμπίεσης.



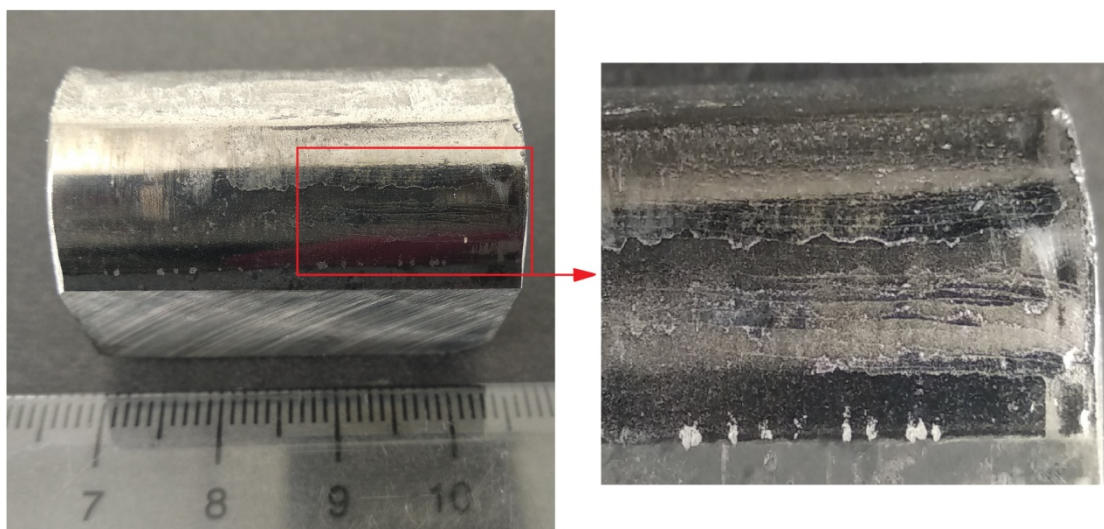
Εικόνα 5.17: Παρουσίαση του 2ου προφίλ φθοράς (230x).

Στη συνέχεια εξετάζονται οι επιφάνειες θραύσης των ξεφλουδισμάτων του υλικού στην περιοχή της κρούσης, σε μεγέθυνση στερεοσκοπίου 230x με υψομετρική απόσταση σχεδόν επαπτομενική επί της επιφανείας ελέγχου. Εκτός από τις αποκολλήσεις διακρίνονται εγκάρσιες στη κίνηση μικρορηγματώσεις και περιοχές οξείδωσης (Εικόνα 5.18).



Εικόνα 5.18: Απεικόνιση των εκλεπίσεων στην περιοχή κρούσης και η ύπαρξη διάβρωσης (230x).

Τέλος, ελέγχονται οι επιφανειακές ρηγματώσεις του υλικού στην περιοχή της συμπίεσης (Εικόνα 5.19). Και σε αυτή την περίπτωση οι ρηγματώσεις παρουσιάζουν παράλληλη κατεύθυνση μεταξύ τους, έως ότου αρχίζουν και αποκλίνουν πλησίον της πλευράς Α.

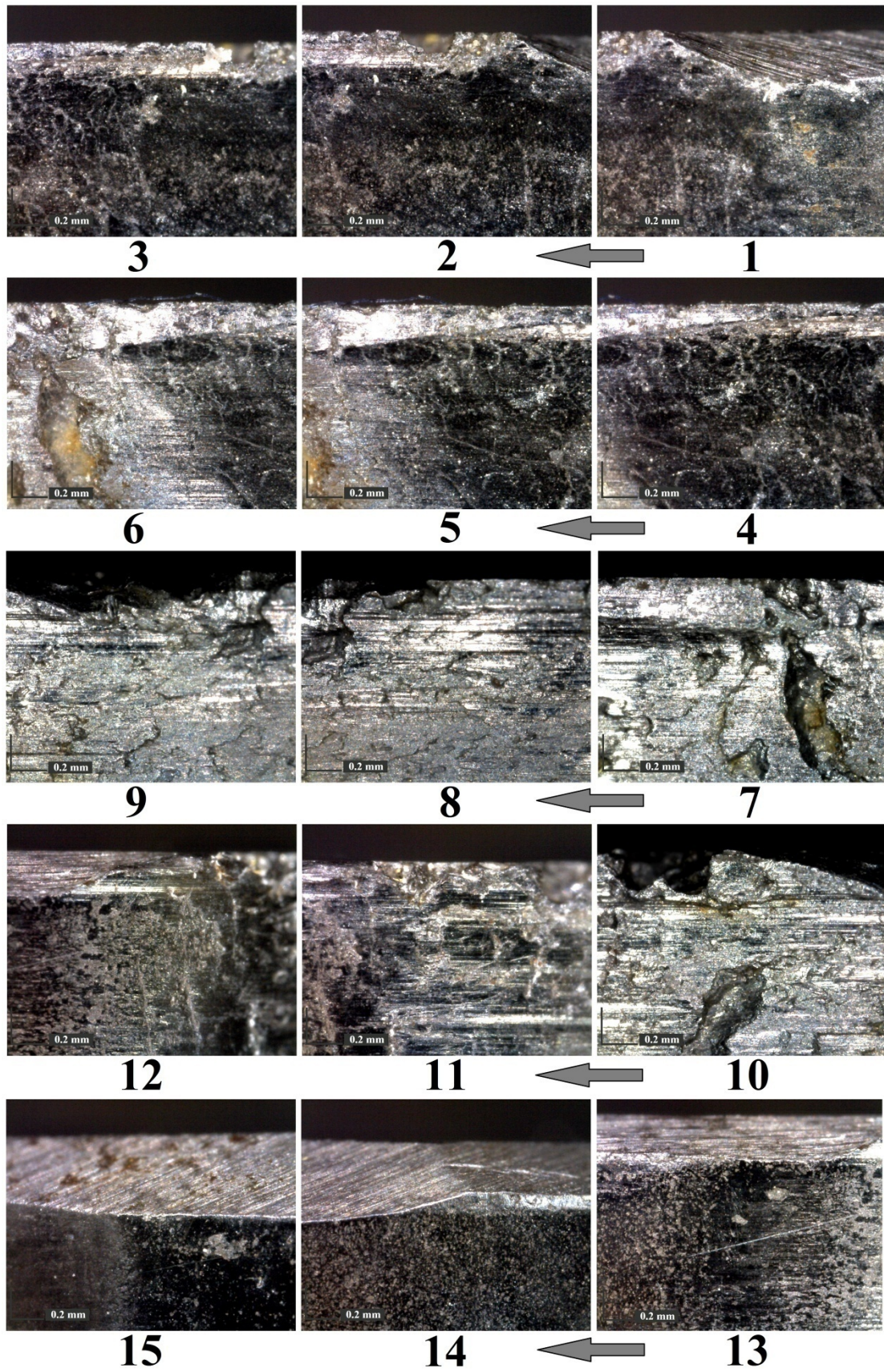


Εικόνα 5.19: Απεικόνιση των ρηγματώσεων στην περιοχή της συμπίεσης.

Δόντι Δ9

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η διαμορφωμένη φθορά που έχει προκύψει στην οδόντωση Δ9, από την περιοχή της κρούσης έως το πέρας της περιοχής της συμπίεσης. Η καταγραφή των επιφανειών φθοράς πραγματοποιήθηκε σε μεγέθυνση στερεοσκοπίου 230x με υψομετρική απόσταση σχεδόν εφαπτομενική επί της εξεταζόμενης επιφανείας. Στην εικόνα 5.20 παρουσιάζεται το πρώτο προφίλ ελέγχου από την πλευρά Β, όπου:

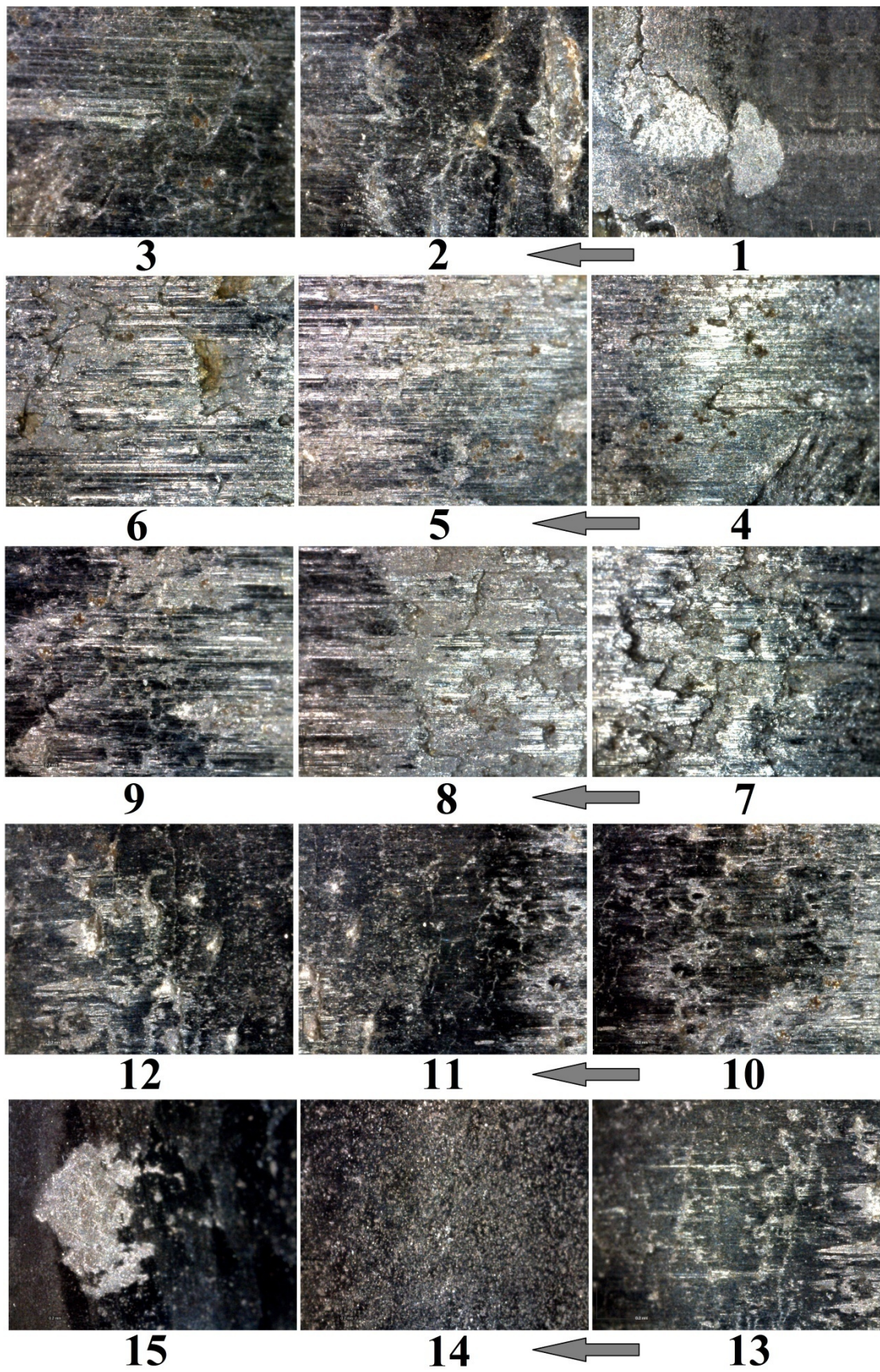
- Η περιοχή 1 ανήκει στην περιοχή της κρούσης.
- Οι περιοχές 1-5 ανήκουν στην αρχή της πλαστικής παραμόρφωσης που εντοπίζονται στην πλευρά Β.
- Οι περιοχές 6-11 ανήκουν στην περιοχή της ολίσθησης.
- Οι περιοχές 11-12 ανήκουν στην περιοχή της μετάβασης.
- Οι περιοχές 12-15 ανήκουν στην περιοχή της συμπίεσης.
- Η περιοχή 6 αντιστοιχεί στην έναρξη της ολίσθησης.
- Η περιοχή 11 αντιστοιχεί στο τέλος της ολίσθησης και στην έναρξη της μεταβατικής περιοχής.
- Η περιοχή 12 αντιστοιχεί στην λήξη της μεταβατικής περιοχής και στην έναρξη της περιοχής της συμπίεσης.
- Η περιοχή 15 αντιστοιχεί στην λήξη της περιοχής της συμπίεσης.



Εικόνα 5.20: Παρουσίαση του Ιου προφίλ φθοράς (230x).

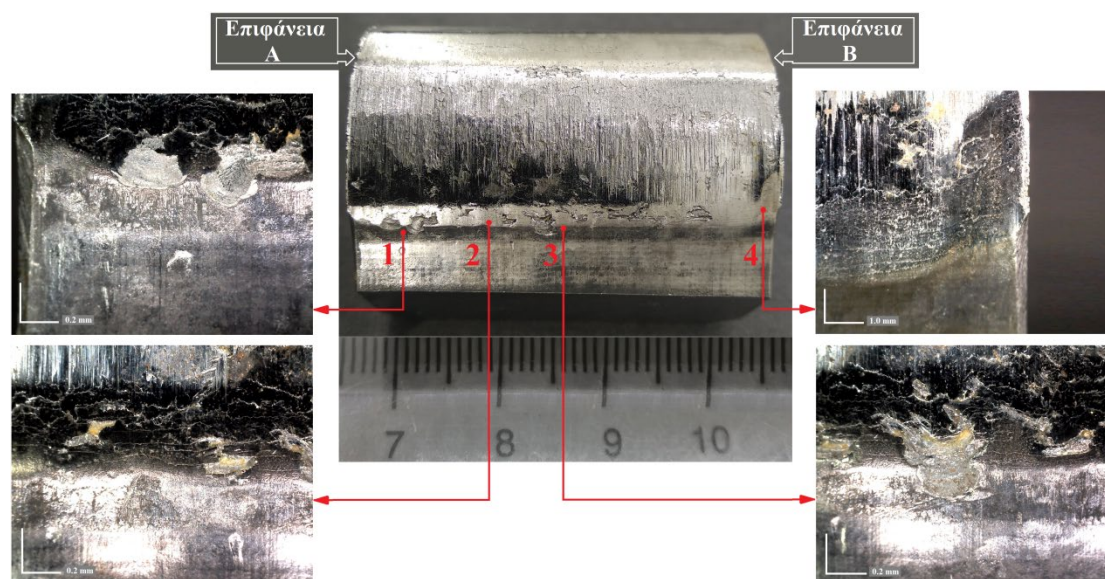
Στην εικόνα 5.21 παρουσιάζεται το δεύτερο προφίλ ελέγχου στη μέση του δοντιού, όπου:

- Οι περιοχές 1-2 ανήκουν στην περιοχή της κρούσης.
- Οι περιοχές 3-10 ανήκουν στην περιοχή της ολίσθησης.
- Οι περιοχές 10-12 ανήκουν στην περιοχή της μετάβασης.
- Οι περιοχές 13-15 ανήκουν στην περιοχή της συμπίεσης.
- Η περιοχή 3 αντιστοιχεί στην έναρξη της ολίσθησης.
- Η περιοχή 10 αντιστοιχεί στο τέλος της ολίσθησης και στην έναρξη της μεταβατικής περιοχής.
- Η περιοχή 12 αντιστοιχεί στην λήξη της μεταβατικής περιοχής και στην έναρξη της περιοχής της συμπίεσης.
- Η περιοχή 15 αντιστοιχεί στην λήξη της περιοχής της συμπίεσης.



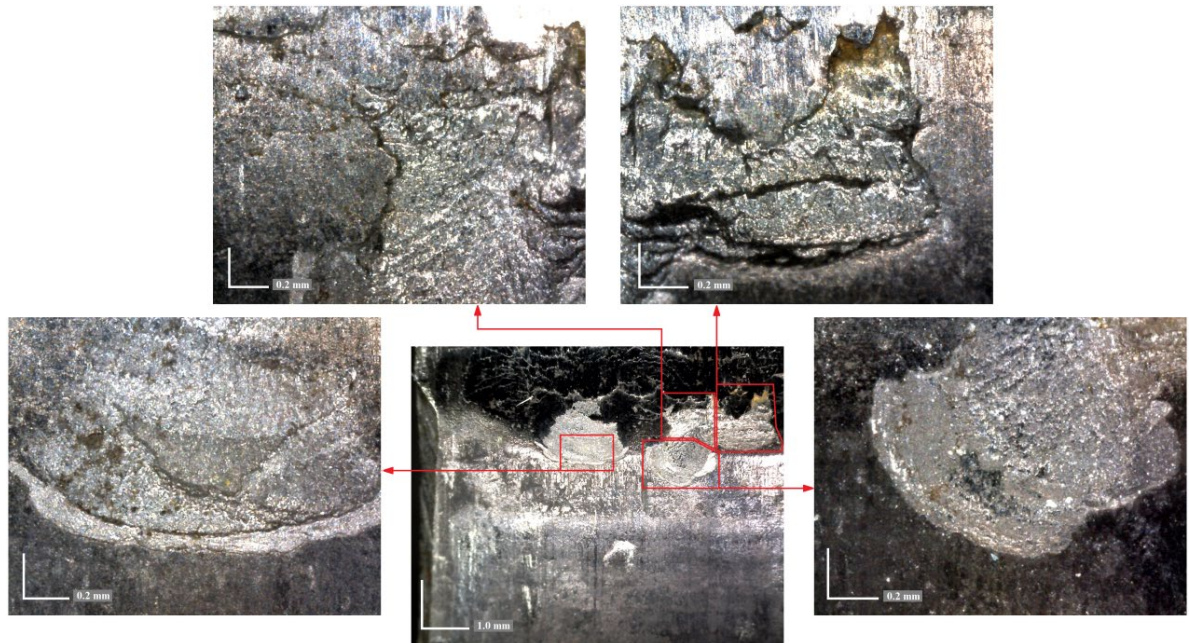
Εικόνα 5.21: Παρουσίαση του 2ου προφίλ φθοράς (230x).

Στην συνέχεια ελέγχεται η περιοχή της κρούσης. Από τις αλλοιώσεις που διακρίνονται σε αυτή την περιοχή επιλέγονται προς έλεγχο αυτές με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον (Εικόνα 5.22). Η μεγέθυνση που αρχικά εφαρμόζεται στο στερεοσκόπιο είναι 50x με υψομετρική απόσταση σχεδόν επαπτομενική επί της εξεταζόμενης επιφανείας του ρότορα. Σε αυτή την μεγέθυνση αποτυπώνεται η πλήρης μορφολογία των επιλεγμένων ξεφλουδισμάτων και των ρηγματώσεων που εντοπίζονται πλησίον της πλαστικής παραμόρφωσης στην πλευρά Β.

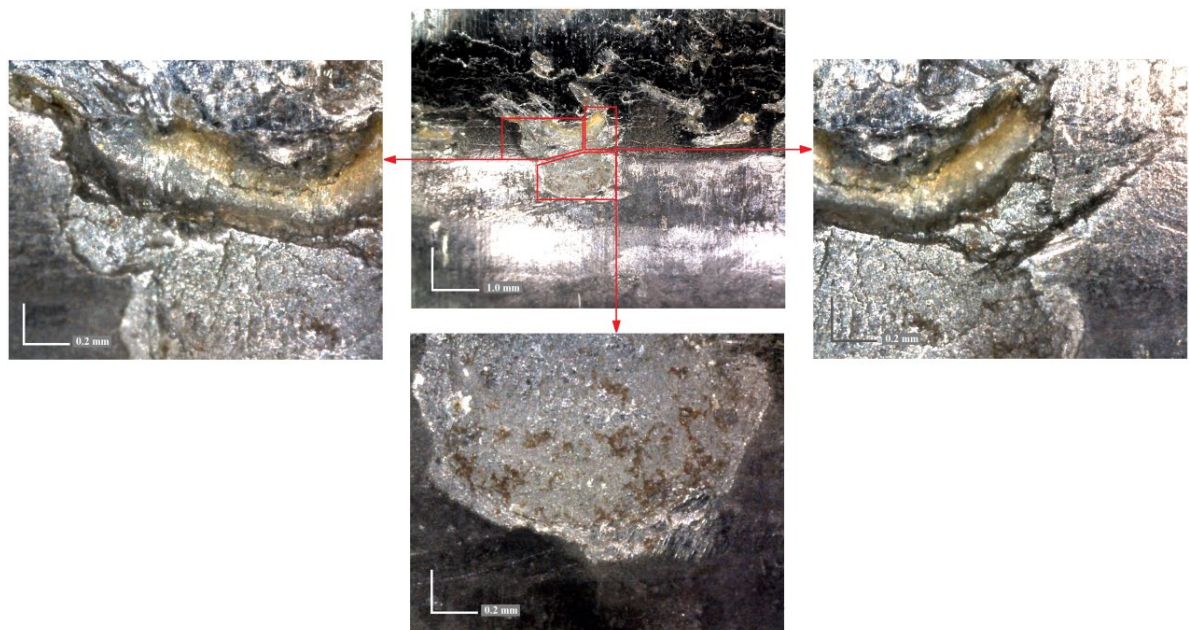


Εικόνα 5.22: Απεικόνιση των εκλεπίσεων στην περιοχή κρούσης (50x).

Για την εξέταση της επιφανείας θραύσης των αποκολλήσεων εφαρμόστηκε μεγέθυνση 230x με υψομετρική απόσταση σχεδόν επαπτομενική επί της εξεταζόμενης επιφανείας. Στην εικόνα 5.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκλέπισης Νο1 και στην εικόνα 5.24 της εκλέπισης Νο3, από τον έλεγχο σε αυτή τη μεγέθυνση.

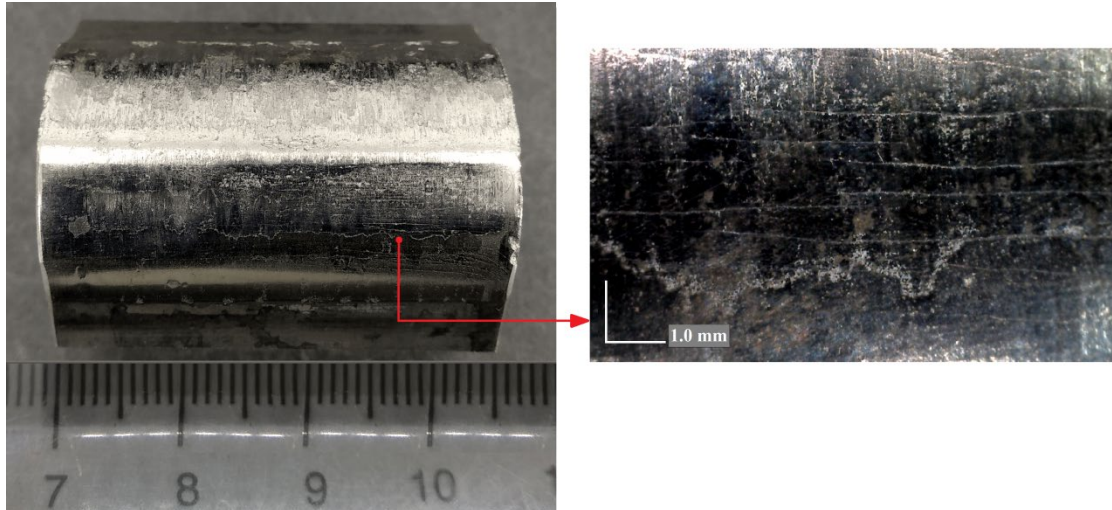


Εικόνα 5.23: Μεγέθυνση εκθέπισης Νο 1, τεκμηρίωση ψαθυρής αποκόλλησης (230x).



Εικόνα 5.24: Μεγέθυνση εκθέπισης Νο 3, τεκμηρίωση ψαθυρής αποκόλλησης (230x).

Τέλος, ελέγχονται οι διαμήκεις επιφανειακές ρηγματώσεις του υλικού στην περιοχή της συμπίεσης σε μεγέθυνση 50x του στερεοσκοπίου (Εικόνα 5.25). Οι ρηγματώσεις που εντοπίζονται παρουσιάζουν σχεδόν παράλληλη κατεύθυνση. Πλησίον όμως της πλευράς A οι ρηγματώσεις αρχίζουν και πάλι να αποκλίνουν η μία από την άλλη.



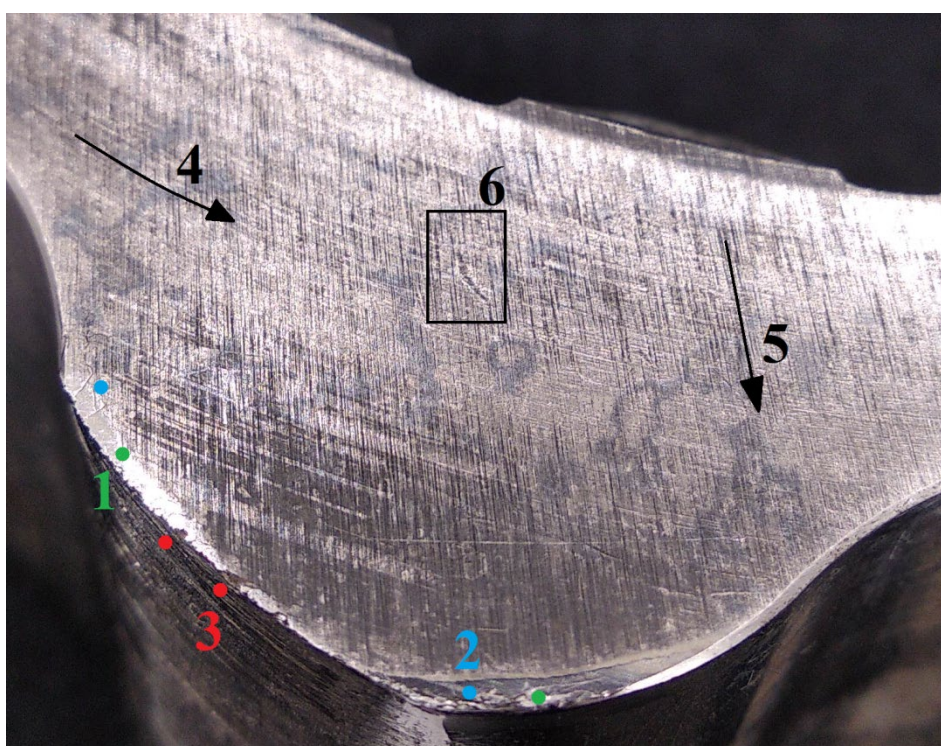
Εικόνα 5.25: Απεικόνιση των ρηγματώσεων στην περιοχή συμπίεσης (50x).

5.2.3 Επιθεώρηση επιφανειών A και B

Οι επιφάνειες A και B αποτελούν τις πλευρές του ρότορα που ολισθαίνουν υπό κυκλική τροχιά πάνω στις επιφάνειες οριοθέτησης του θαλάμου των οδοντωτών τροχών. Ως επιφάνειες οριοθέτησης χαρακτηρίζονται οι επιφάνειες των αποστατών διανομής και φθοράς που προσαρμόζονται εκατέρωθεν του θαλάμου.

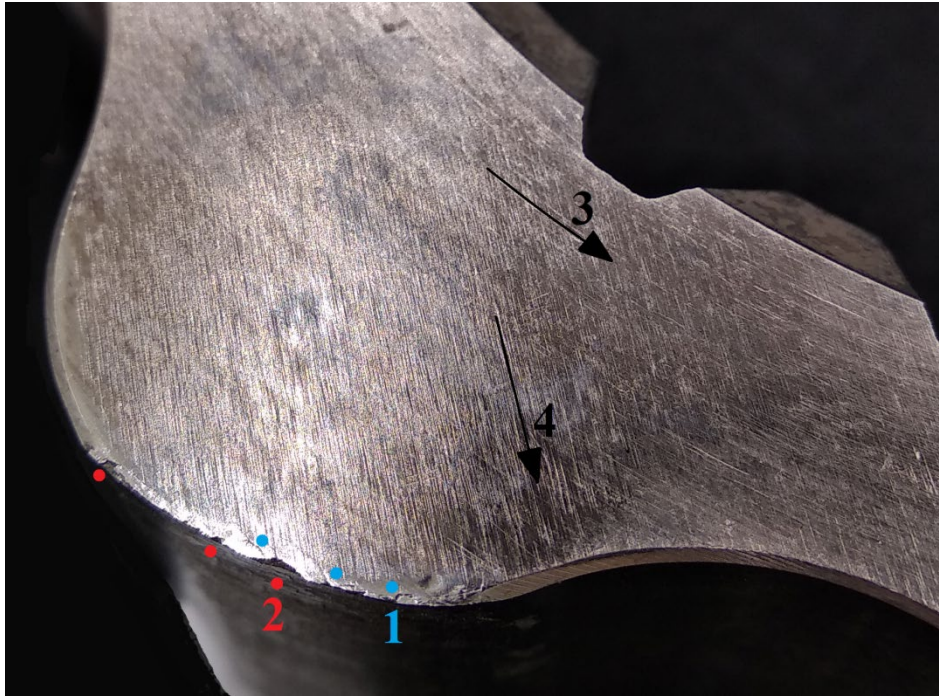
Κατά την επιθεώρηση της επιφάνειας A (Εικόνα 5.26) ακριβώς στα όρια της κάθε οδόντωσης παρατηρούνται αλλοιώσεις στις λοξοτιμήσεις (Εικόνα 5.26: σημεία 1), μικρές ρηγματώσεις (Εικόνα 5.26: σημεία 2) και εκλεπίσεις (chipping) (Εικόνα 5.26: σημεία 3). Αυτές οι επιφανειακές βλάβες είναι αποτέλεσμα της σύμπλεξης των οδοντώσεων του ενδιάμεσου οδοντωτού δαχτυλιδιού με τον ρότορα, σε συνδυασμό με την φύση του εναζωτού στρώματος. Κατά μήκος της επιφάνειας διακρίνονται γυαλισμένες και μαυρισμένες περιοχές. Οι μαυρισμένες επιφάνειες είναι αποτέλεσμα του αποκτηθέντος χρωματισμού του εξαρτήματος μετά το πέρας της θερμοχημικής διεργασίας της εναζωτώσεως. Ενώ οι γυαλισμένες περιοχές είναι αποτέλεσμα της επαφής της συγκεκριμένης επιφάνειας του ρότορα με την επιφάνεια του αποστάτη, κατά τη σχετική κίνηση του πρώτου επί του δεύτερου. Συγκεκριμένα οι μαυρισμένες περιοχές διακρίνονται πλησίον των κορυφών των οδοντώσεων, κάτι που δικαιολογείται από το μέγεθος του αποστάτη διανομής, ο οποίος διαθέτει μικρότερη διάμετρο σε σχέση με αυτήν του ρότορα, καθώς επίσης και από την υψομετρική διαφορά που παρουσιάζει το ζευγάρι του ρότορα και του ενδιάμεσου οδοντωτού δαχτυλιδιού με τον στάτορα (Εικόνα 4.6). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι εν λόγω περιοχές να μην έρχονται σε επαφή με κάποια άλλη επιφάνεια. Στη συνέχεια επί της επιφάνειας διακρίνονται μικρής εμβέλειας κυκλικές τροχιακές (Εικόνα 5.26: περιοχή

4), διαγώνιες (Εικόνα 5.26: περιοχή 5) και ακανόνιστες (Εικόνα 5.26: περιοχή 6) γραμμές φθοράς. Οι τροχιακές γραμμές είναι διαμορφωμένες κατά την φορά κίνησης του ρότορα και είναι αποτέλεσμα της σχετικής του κίνησης. Οι διαγώνιες γραμμές και η κατεύθυνση που αυτές ακολουθούν σχετίζονται με την σχετική κίνηση του ρότορα, με τη διαφορά όμως ότι είναι αποτέλεσμα της ολίσθησης των μικρών σωματιδίων εκτριβής που παράγονται από τις αποκολλήσεις υλικού τόσο από τις άκρες του προφίλ των δοντιών όσο και από τις υπόλοιπες περιοχές του ρότορα. Οι ακανόνιστες γραμμές φθοράς είναι επίσης προϊόν των σωματιδίων εκτριβής, τα οποία όμως δεν ακολούθησαν την ίδια τροχιά.



Εικόνα 5.26: Αλλοιώσεις επιφάνειας A (προφίλ A2).

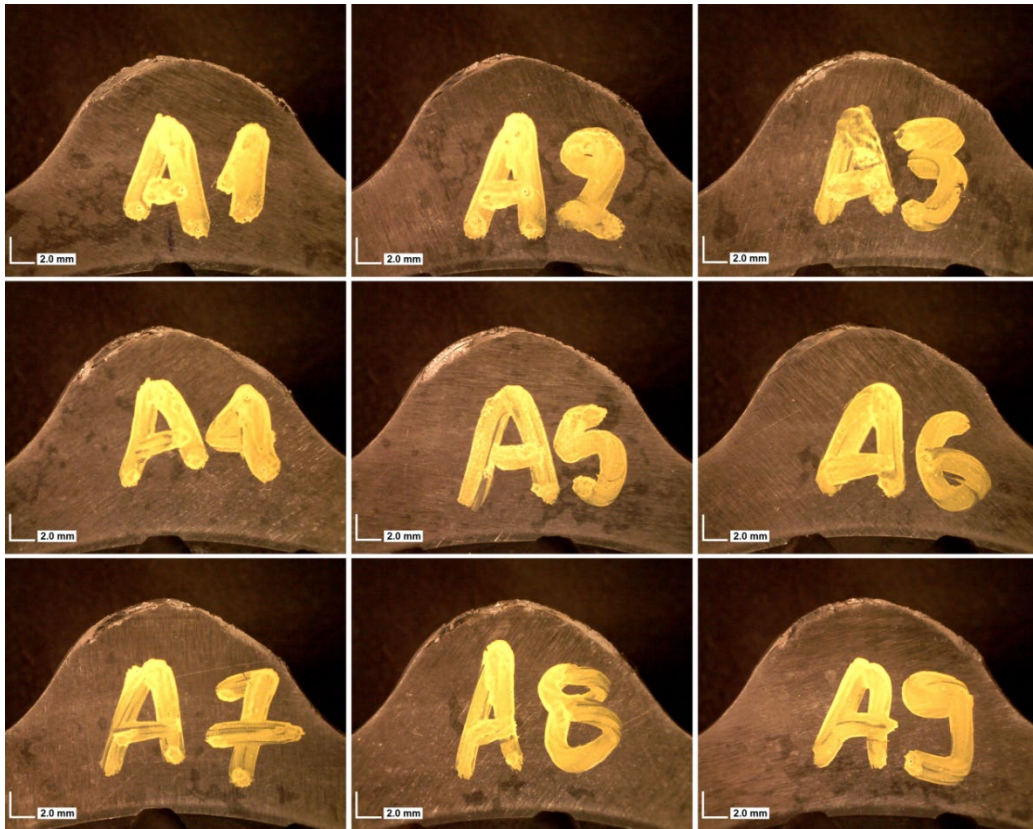
Στις αντίστοιχες περιοχές στην επιφάνεια B, δεν διακρίνονται μαυρισμένες αλλά μόνον γυαλισμένες περιοχές, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού η πλευρά αυτή εφάπτεται εξολοκλήρου στην πλάκα φθοράς. Στα όρια των οδοντώσεων διακρίνονται ρηγματώσεις (Εικόνα 5.27: σημεία 1) και εκλεπίσεις (chipping) (Εικόνα 5.27: σημεία 2). Ενώ από τα είδη των εκδορών που παρατηρήθηκαν στην προηγούμενη επιφάνεια μόνον οι τροχιακές (Εικόνα 5.27: σημεία 3) και οι διαγώνιες (Εικόνα 5.27: περιοχή 4) γραμμές φθοράς λαμβάνουν χώρα.



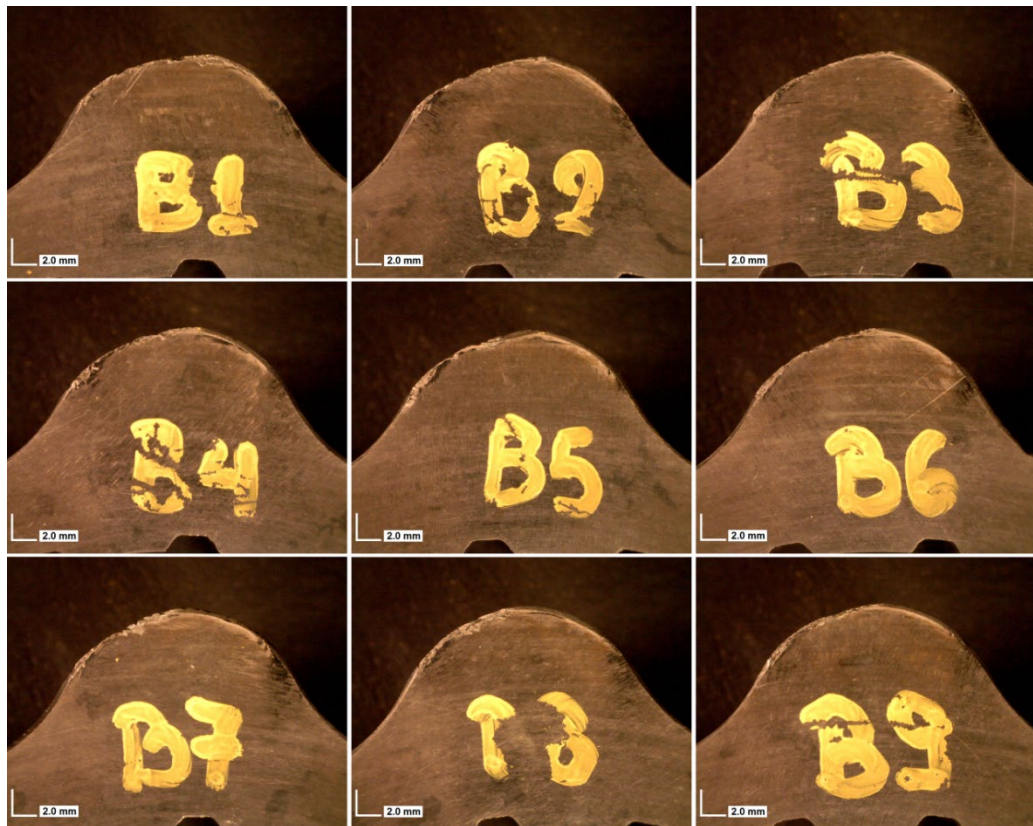
Εικόνα 5.27: Αλλοιώσεις επιφάνειας Β (προφίλ Β9).

Με βάση λοιπόν τις εικόνες 5.26 και 5.27 γίνεται αντιληπτό ότι η επιφάνεια Α χαρακτηρίζεται από εκτενέστερα σημάδια φθοράς συγκριτικά με την Β.

Στις εικόνες 5.28 και 5.29 που ακολουθούν παρουσιάζεται το μέγεθος της φθοράς και της αλλοίωσης της γεωμετρίας που έχει υποστεί το κάθε δόντι, από την προοπτική και των δύο επιφανειών (Α και Β). Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε στο στερεοσκόπιο σε μεγέθυνση 15x και με υψομετρική απόσταση φακού στα 110mm.



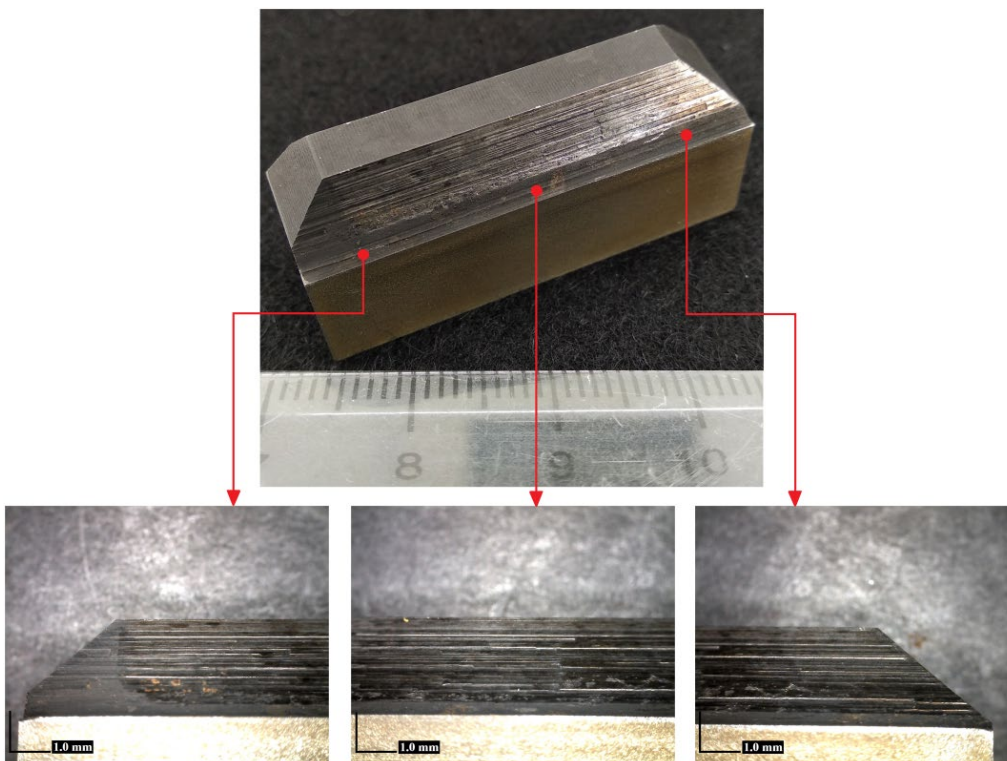
Εικόνα 5.28: Κάτοψη των οδοντώσεων της πλευράς Α (15x).



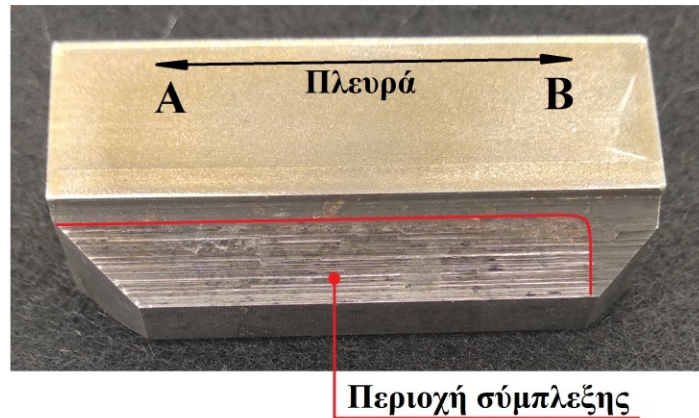
Εικόνα 5.29: Κάτοψη των οδοντώσεων της πλευράς Β (15x).

5.2.4 Επιθεώρηση εσωτερικής οδόντωσης

Η εσωτερική οδόντωση αποτελεί την πλήμνη του ρότορα, η οποία προσαρμόζεται στην κινητήρια άτρακτο. Οι οδοντώσεις και οι εγκοπές που απαρτίζουν την πλήμνη δεν παρουσιάζουν κάποιο είδος φθοράς, παρα μόνον ορισμένες περιοχές οξειδωσης. Οι περιοχές οξειδωσης δείχνουν να έχουν προκληθεί μετά την απομάκρυνση του εξαρτήματος από τον κινητήρα, κατά την έκθεση του στο φυσικό περιβάλλον. Ωστόσο, στις επιφάνειες που διέπουν τις οδοντώσεις και τις εγκοπές παρατηρούνται παράλληλες γραμμές ως αποτέλεσμα της μηχανουργικής κατεργασίας (Εικόνα 5.30). Από την υψομετρική απόσταση των γραμμών αυτών, μπορεί να εκτιμηθεί ο αριθμός των φάσεων κατεργασίας για την δημιουργία της οδόντωσης. Θα έπρεπε να υπάρχει στάδιο φινιρίσματος μετά την συγκεκριμένη κατεργασία, ώστε η τραχύτητα της επιφάνειας να είναι μικρότερη. Αυτό θα δημιουργήσει στιβαρότερη σύμπλεξη και απουσία κρουστικών φορτίσεων κατά την εκκίνηση της λειτουργίας του ρότορα. Στην εικόνα 5.31 διακρίνεται η γυαλισμένη περιοχή που παρουσιάζεται σε κάθε πλευρά της οδόντωσης, η οποία υποδηλώνει την περιοχή σύμπλεξης της πλήμνης με την άτρακτο εξόδου.



Εικόνα 5.30: Εκδορές μηχανουργικής κατεργασίας (30x).



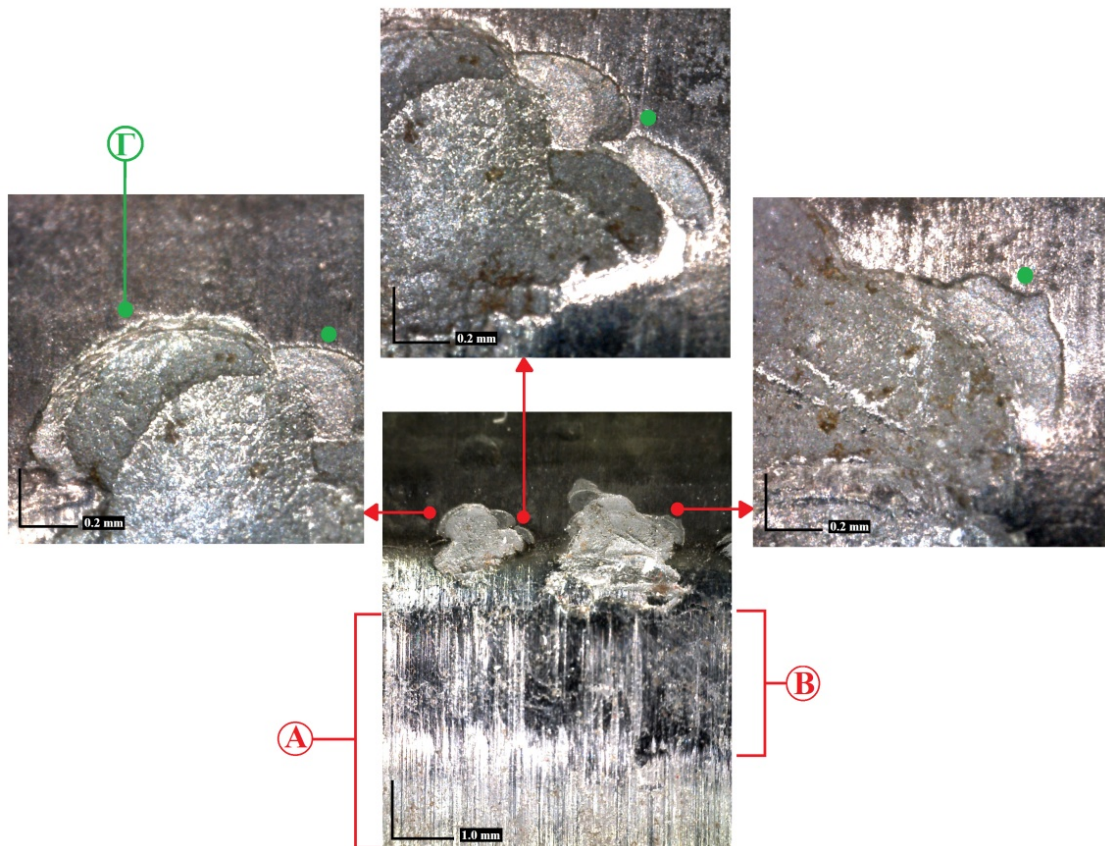
Εικόνα 5.31: Περιοχή σύμπλεξης της πλήμνης του ρότορα με την κινητήριο άτρακτο.

5.2.5 Συμπεράσματα μακροσκοπικού ελέγχου

- Από τις τέσσερις επιφάνειες που διέπουν τον ρότορα αυτή που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσοστό φθοράς είναι η περιοχή της εξωτερικής οδόντωσης. Το μοτίβο της φθοράς που παρουσιάζεται σε αυτή την περιοχή είναι επαναλήψιμο για κάθε δόντι. Το γεγονός ότι το μοτίβο δεν εναλλάσσεται υποδηλώνει ότι, παρόλη την ικανότητα του κινητήρα και για αμφίδρομη κίνηση, η φορά περιστροφής του εξαρτήματος γινόταν μόνο προς μία κατεύθυνση.
- Εξαιτίας της γεωμετρίας της οδόντωσης του ρότορα και της οδόντωσης του ενδιάμεσου οδοντωτού δαχτυλιδιού (θεωρητικό μέρος, Κεφ. 3) η φόρτιση είναι σε κάθε περίπτωση σημειακή. Έτσι η κατατομή του κάθε δοντιού καταπονείται σε συμπίεση επιφανείας.
- Επειδή, το είδος της φόρτισης που ασκεί το οδοντωτό δαχτυλίδι στον ρότορα επαναλαμβάνεται κυκλικά, η φόρτιση του συστήματος είναι δυναμική, εναλλασσόμενη. Στην περίπτωση αυτή έλαβαν χώρα μηχανισμοί παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου (repeated - cycle deformation mechanisms) [8], με αποτέλεσμα την προοδευτική ανάπτυξη των αλλοιώσεων που απεικονίζεται στα ξεφλουδίσματα και στις ρηγματώσεις στην περιοχή κρούσης (Εικόνα 5.32: Γ), αλλά και στις διαμήκεις ρηγματώσεις στην περιοχή συμπίεσης (Εικόνα 5.34: Α).
- Ωστόσο, η κίνηση του ενός δοντιού επί του άλλου χαρακτηρίζεται από τους μηχανισμούς παραμόρφωσης μονού κύκλου (single - cycle deformation mechanisms) και συγκεκριμένα από τους μηχανισμούς φθοράς λόγω εκτριβής (abrasive wear mechanisms) [8]. Οι καταστάσεις φθοράς από εκτριβή που διακρίνονται στην περιοχή της ολίσθησης πραγματοποιούνται όταν τα σκληρά σωματίδια εκτριβής εξαναγκάζονται να κινηθούν κατά μήκος της οδόντωσης, έως

την περιοχή της μετάβασης. Τα σωματίδια εκτριβής προέρχονται κατά κύριο λόγο από τα ξεφλουδίσματα στην περιοχή της κρούσης. Στο ίδιο είδος φθοράς θα κατέληγε το σύστημα, εάν η θερμική κατεργασία της εναζώτωσης δεν ήταν επαρκής, κάτι που θα ελεγχθεί μέσω οπτικής μικροσκοπίας.

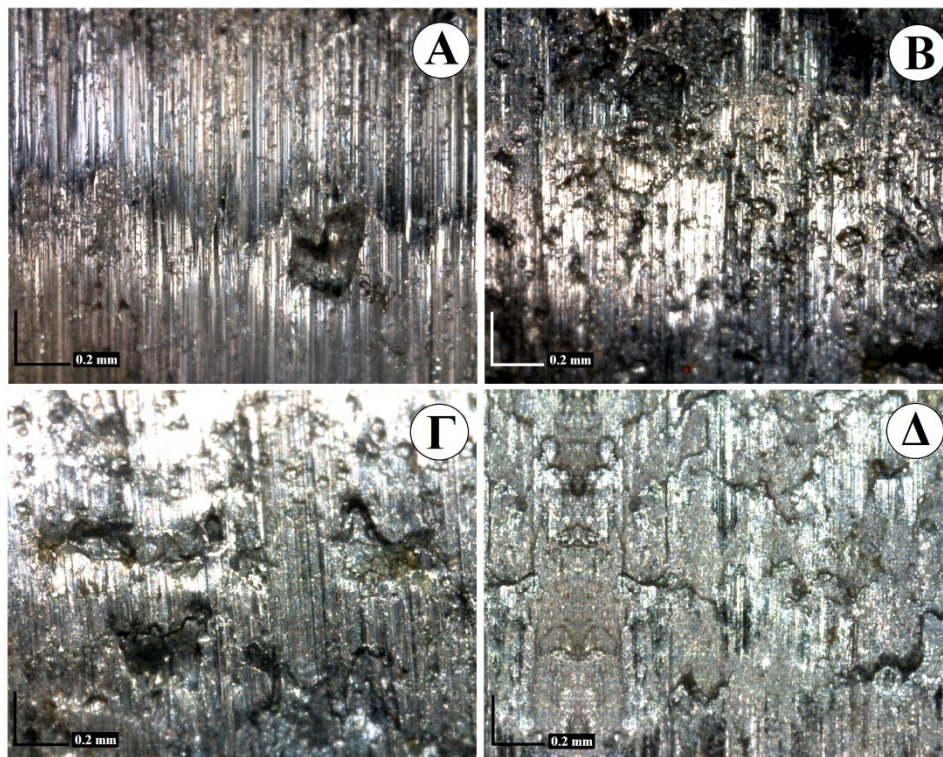
- Η επιφάνεια θραύσης που συναντάται σε κάθε ξεφλούδισμα στην περιοχή της κρούσης τεκμηριώνει την ψαθυρή φύση των αποκολλήσεων. Τα ξεφλουδίσματα και οι ρηγματώσεις περίξ αυτών υποδεικνύουν την ψαθυρότητα του εναζωτωμένου στρώματος. Τα ψαθυρά ξεφλουδίσματα είναι αποτέλεσμα της αποκόλλησης υλικού υπό την μορφή νιφάδων και της συνένωσης των ρηγματώσεων που προκύπτουν κατά την κρούση. Τα ξεφλουδίσματα χαρακτηρίζονται ως τύπου flaking (Εικόνα 5.32: Γ) [7].



Εικόνα 5.32: Περιοχή κρούσης στο Δ2 δόντι. Όπου (A): Έναρξη περιοχής ολίσθησης, (B): Επηρεασμένη περιοχή από την κρούση και (Γ): Ψαθυρές αποκολλήσεις τύπου flaking.

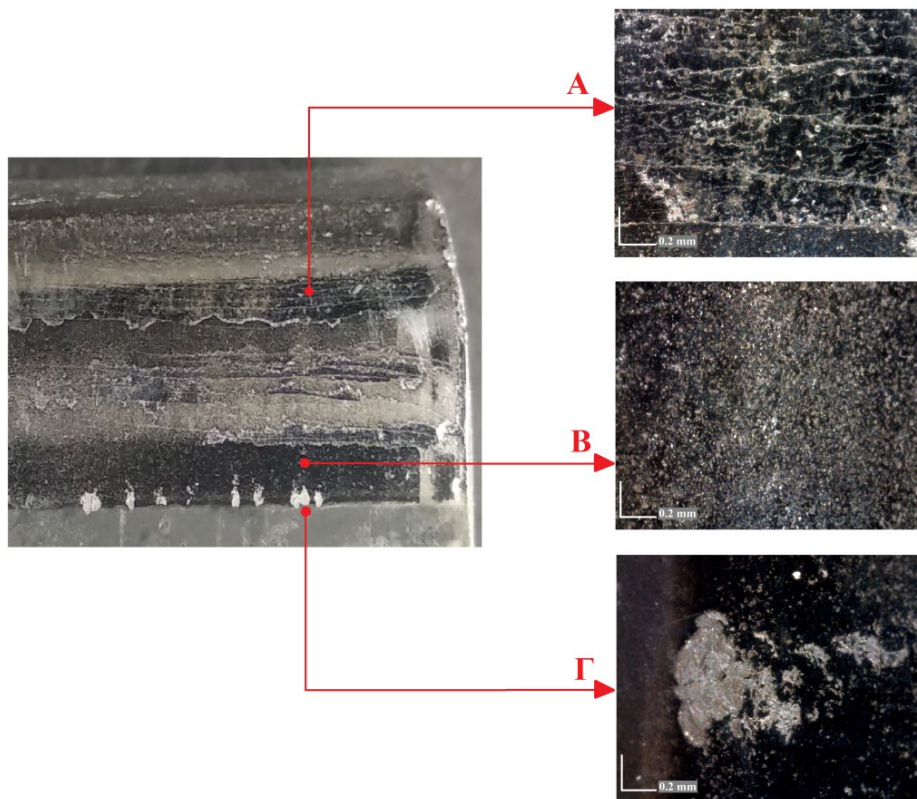
- Στην περιοχή της ολίσθησης κυρίως στην έναρξη της περιοχής και εν συνεχεία στην επηρεασμένη περιοχή της κρούσης (Εικόνα 5.32: σημείο B) διακρίνονται έντονες αμυχές κατά τη φορά της κίνησης (Εικόνα 5.33: περιοχή A). Η κατάσταση της ολίσθησης σε αυτή την περίπτωση χαρακτηρίζεται ως scoring [7].

- Αυξάνοντας τον φωτισμό του μικροσκοπίου στην ίδια περιοχή εντοπίζονται μικρές απολεπίσεις υλικού (spalling) (Εικόνα 5.33: περιοχή Β) [7]. Οι αποκολλήσεις αυτού του είδους προκύπτουν κατά κύριο λόγο κατά την ύπαρξη μηχανισμών παραμόρφωσης επαναλαμβανόμενου κύκλου. Συγκεκριμένα σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζονται οι μηχανισμοί επιφανειακής κόπωσης.
- Στη συνέχεια εντοπίζονται περιοχές μεγαλύτερων απολεπίσεων (spalling) (Εικόνα 5.33: περιοχή Γ) και έντονων εκδορών (Εικόνα 5.33: περιοχή Δ) πολύ μεγαλύτερου πλάτους συγκριτικά με της προηγούμενες έντονες αμυχές, οι οποίες είναι το αποτέλεσμα της εξαναγκασμένης ολίσθησης των σωματιδίων εκτριβής [8].
- Η περιοχή της ολίσθησης διαφέρει από τις άλλες τρεις περιοχές φθοράς, διότι δεν παρουσιάζει ψαθυρές αποκολλήσεις αλλά πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας της σχετικής κίνησης των επιφανειών που συμπλέκονται. Για το λόγο αυτό το στρώμα της εναζώτωσης συμπεριφέρεται διαφορετικά σε αυτό το είδος επιφανειακής φόρτισης.



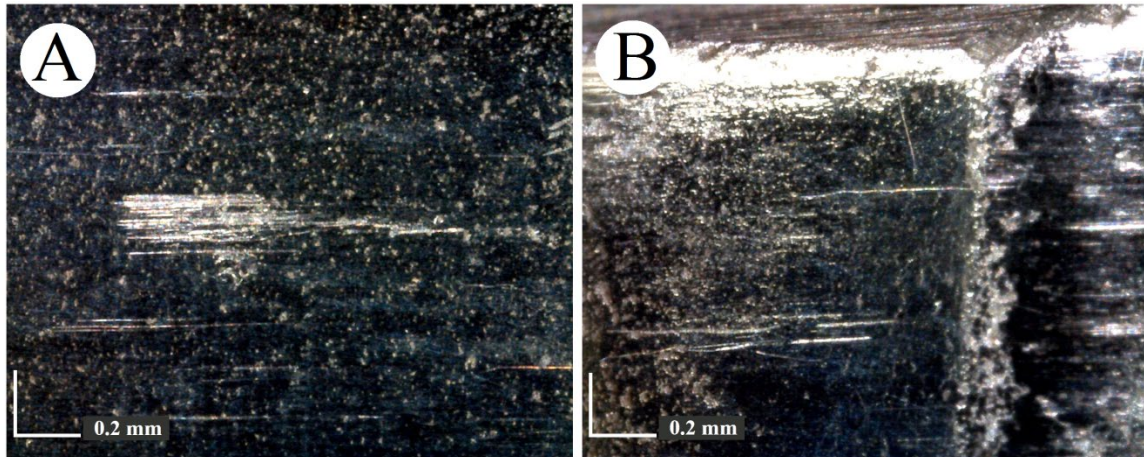
Εικόνα 5.33: Οι καταστάσεις φθοράς που διακρίνονται στην περιοχή της ολίσθησης. Όπου (Α): Scoring, (Β, Γ): Spalling, (Δ): Φθορά λόγω σωματιδίων εκτριβής.

- Η περιοχή της συμπίεσης χαρακτηρίζεται από την αποφλοιώση του επιφανειακού στρώματος (Εικόνα 5.34), μέσω της συνένωσης των διαμηκών σχεδόν παράλληλων μεταξύ τους ρηγματώσεων (Εικόνα 5.34: Α) και από τις εκλεπίσεις (Εικόνα 5.34: Β, Γ). Οι εκλεπίσεις αυτές είναι πολύ μικρότερης κλίμακας, τόσο ως προς το βάθος όσο και ως προς την έκταση τους, συγκριτικά με τις εκλεπίσεις της περιοχής κρούσης.
- Για το λόγο ότι η αποφλοιώση της επιφάνειας παρουσιάζει πολύ μικρό βάθος, πιθανόν η απομάκρυνση του υλικού να αποτελεί μόνο το λευκό στρώμα της εναζώτωσης. Αυτό πρόκειται να διερευνηθεί κατά την μελέτη με οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο.
- Οι ρηγματώσεις εμφανίζονται κατά κύριο λόγο αμέσως μετά την μεταβατική περιοχή (Εικόνα 5.34: Α). Οι εκλεπίσεις στην αρχή της περιοχής συμπίεσης (Εικόνα 5.34: Β) εντοπίζονται μόνο με την χρήση του στερεοσκοπίου και συναντώνται κυρίως από την μέση περίπου της περιοχής συμπίεσης έως τη βάση του δοντιού. Αντίθετα, εκλεπίσεις παρατηρούμενες μακροσκοπικά (Εικόνα 5.34: Γ) διακρίνονται στο τέλος της περιοχής.



Εικόνα 5.34: Παρουσίαση της ψαθυρότητας του στρώματος εναζώτωσης στην περιοχή της συμπίεσης (230x).

- Τα προϊόντα εκτριβής των επιφανειών φθοράς μεταφέρονται κατά την κίνηση των οδοντωτών τροχών από περιοχή σε περιοχή, προσκρούοντας στο πέρας της περιοχής της συμπίεσης (Εικόνα 5.34: Γ). Τα ίχνη από την μετακίνηση των σωματιδίων εκτριβής γίνονται αντιληπτά από τις γραμμές εκτριβής που εντοπίζονται σε ορισμένα σημεία στην περιοχή της συμπίεσης (Εικόνα 5.35).



Εικόνα 5.35: Δημιουργία ψαθυρών εκλεπίσεων στο πέρας της περιοχής της συμπίεσης (230x).

Η γεωμετρία της σύμπλεξης αφορά την «κακή σύμπλεξη» του οδοντωτού ενδιάμεσου δαχτυλιδιού με τον εξεταζόμενο ρότορα και μπορεί να σχετίζεται είτε με την διαδικασία της κατεργασίας, σε συνδυασμό με τις πολύ σφιχτές ανοχές σύμπλεξης είτε με την υπερφόρτιση του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, η τεκμηρίωση της κακής σύμπλεξης ενισχύεται από την ανομοιόμορφη φθορά που συναντάται από την επιφάνεια A προς την επιφάνεια B και από την ύπαρξη πλαστικής παραμόρφωσης στην πλευρά B.

Η αστοχία λόγω της θερμοχημικής διεργασίας σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του υλικού βάσης αναφέρονται συνήθως σε δύο περιπτώσεις. Η μία περίπτωση οφείλεται στην ύπαρξη μικρού πάχους εναζωτωμένου στρώματος, το οποίο δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στην φόρτιση. Η δεύτερη περίπτωση οφείλεται στην διαφορά σκληρότητας μεταξύ της εναζωτωμένης επιφάνειας και του υλικού βάσης σε τέτοιο βαθμό, ώστε ο πυρήνας να μην μπορεί να υποστηρίξει την καταπονούμενη εναζωτωμένη επιφάνεια (φαινόμενο "glass on snow").

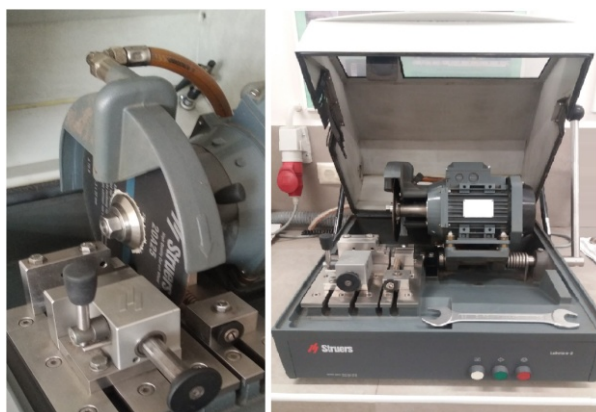
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

6.1 Εξοπλισμός μικροσκοπικού ελέγχου

Το μεγαλύτερο μέρος της πειραματικής διαδικασίας διεξήχθη στο εργαστήριο του Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών, του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την μικροσκοπική ανάλυση αποτελείται από τα παρακάτω μηχανήματα:

- το δισκοτόμο Struers Labotom - 3, με αριθμό μοντέλου: 05326146 και σειριακό αριθμό: 5321698.



Εικόνα 6.1: Δισκοτόμος Struers Labotom - 3.

- τη συσκευή εγκιβωτισμού Struers CitoPress - 1, με αριθμό μοντέλου: 05776127 και σειριακό αριθμό: 5770313.



Εικόνα 6.2: Συσκευή εγκιβωτισμού Struers CitoPress - 1.

- τη μηχανή λείανσης και στίλβωσης PRESI, τύπου: MECAPOL P 262.



Εικόνα 6.3: Μηχανή λείανσης και στίλβωσης PRESI MECAPOL P 262.

- το μικροσκληρόμετρο Shimadzu, με αριθμό μοντέλου: 341-64278, τύπου: M και με σειριακό αριθμό: 30096586.



Εικόνα 6.4: Μικροσκληρόμετρο Shimadzu.

- το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων φακών Zeiss Axio, με τύπο: Vert.A1 και σειριακό αριθμό: 3848001221.



Εικόνα 6.5: Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Zeiss Axio Vert.A1.

- το μηχάνημα καθαρισμού με υπερήχους της James Products, μοντέλο: SONIC 3MX.



Εικόνα 6.6: Μηχάνημα καθαρισμού με υπερήχους SONIC 3MX

Ο πρόσθετος εξοπλισμός που χρειάστηκε κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε σε εξωτερικά εργαστήρια και εργασιακούς χώρους ιδιωτικών εταιρειών. Τα μηχανήματα αυτά είναι τα εξής:

- η ηλεκτροδιάβρωση MAKINO U3, τύπου: WIRE και με σειριακό αριθμό: W140394. Η ηλεκτροδιάβρωση αποτελεί μέρος του εξοπλισμού της Ν. ΜΠΑΖΙΓΟΣ Α.Β.Ε.Ε.



Εικόνα 6.7: Ηλεκτροδιάβρωση MAKINO U3.

- ο φασματογράφος ατομικής εκπομπής GNR Metal Lab 75 - 80J AES. Η συσκευή αποτελεί μέρος του εργαστηριακού εξοπλισμού της SPECTRUMLABS A.E.



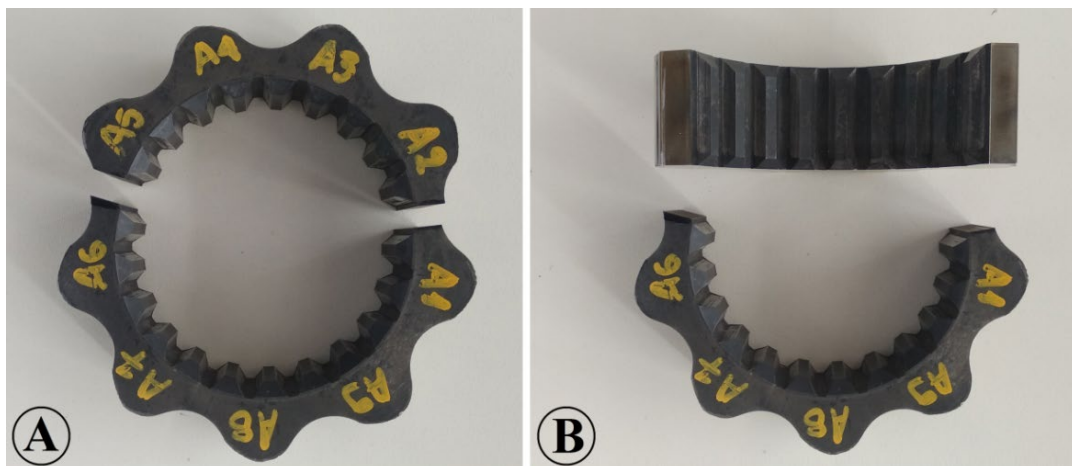
Εικόνα 6.8: Φασματογράφος εκπομπής ατόμων GNR Metal Lab 75 - 80J AES.

6.2 Προετοιμασία δοκιμών

Η προετοιμασία των δοκιμών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της μικροσκοπικής ανάλυσης. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την διαδικασία είναι: κοπή, εγκιβωτισμός, λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Το δοκίμιο προέκυψε από τα τρία δόντια που εξετάστηκαν κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο και από μία εγκοπή. Από τα τρία δόντια θα εξεταστεί το καταπονημένο στρώμα της εναζώτωσης, ενώ από την εγκοπή θα ελεγχθεί το εναζωτωμένο μη καταπονημένο στρώμα.

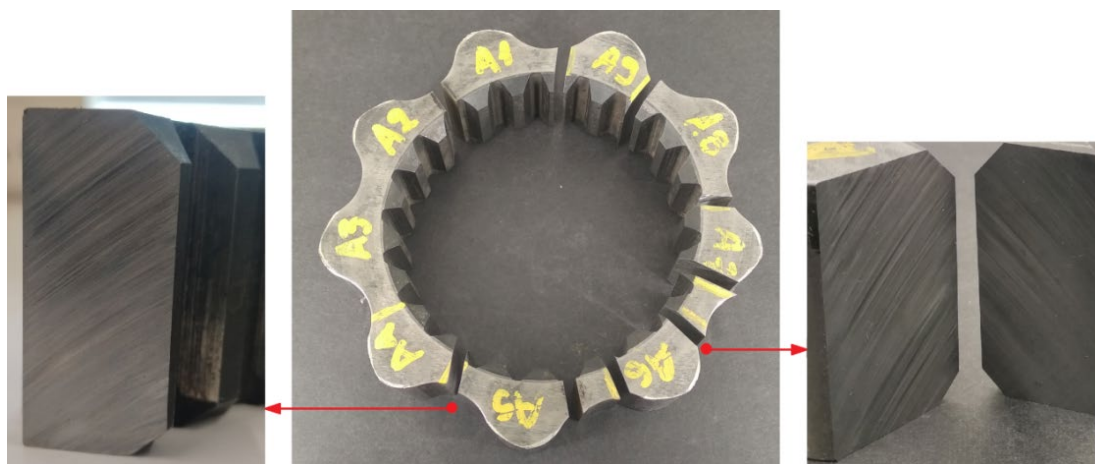
Κοπή

Σκοπός της κοπής είναι η απομόνωση κατάλληλων επιφανειών, από τις οποίες θα αποδοθεί η καλύτερη δυνατή εικόνα για την διερεύνηση των αιτιών αστοχίας. Εξαιτίας της γεωμετρίας του εξαρτήματος και των διαστάσεων του συστήματος συγκράτησης του επιτραπέζιου δισκοπρίονου, δεν ήταν δυνατή η ασφαλής κοπή του. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε κοπή με την τεχνική της ηλεκτροδιάβρωσης (Εικόνα 6.7). Επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος κοπής, καθώς ήταν η πιο ασφαλής και άμεση. Με την τεχνική της ηλεκτροδιάβρωσης θα μπορούσαν να απομονωθούν κατευθείαν και με ακρίβεια τα δόντια και η εγκοπή. Επειδή, όμως, με την ηλεκτροδιάβρωση αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχει ο κίνδυνος επηρεασμού της δομής του υλικού πέριξ της περιοχής κοπής. Εξαιτίας αυτού πραγματοποιήθηκε μόνον ο διαχωρισμός του ρότορα σε δύο μέρη, ώστε στη συνέχεια να είναι δυνατή η συγκράτηση και η κοπή του στον εργαστηριακό δισκοτόμο. Η κοπή πραγματοποιήθηκε στις περιοχές των εγκοπών E1-2 και E5-6 (Εικόνα 6.9).



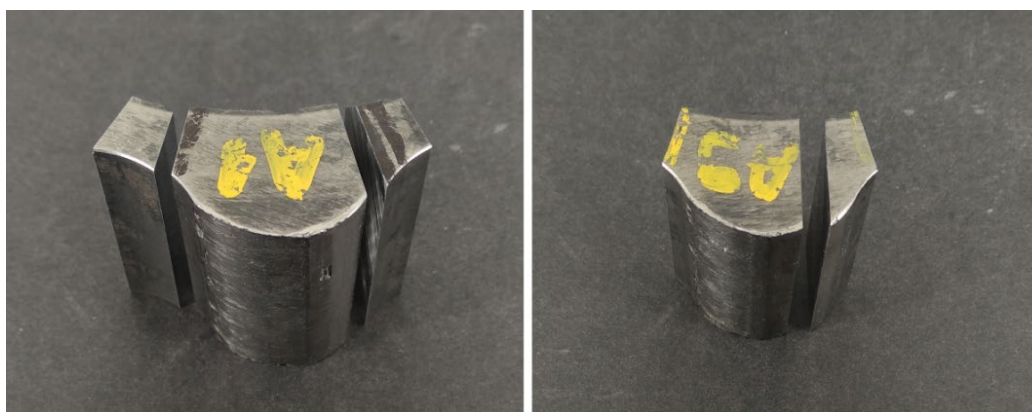
Εικόνα 6.9: (A) Αρχική τομή εξαρτήματος, (B) Επιφάνεια κοπής ηλεκτροδιάβρωσης.

Κατά την κοπή του εξαρτήματος στον δισκοτόμο (Εικόνα 6.1) χρησιμοποιήθηκε δίσκος οξειδίων του αργιλίου Struers 20A25, διαστάσεων 250mm x 1.5mm x 32mm. Ο συγκεκριμένος δίσκος είναι κατάλληλος για κοπές μαλακών σιδηρούχων μετάλλων, χαλύβδινων σωλήνων και μικρών τεμαχίων σκληρότητας 80 - 400 HV. Οι κοπές απομόνωσης των δοντιών εμφανίζονται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Αναπαράσταση των κοπών που πραγματοποιήθηκαν και των επιφανειών κοπής.

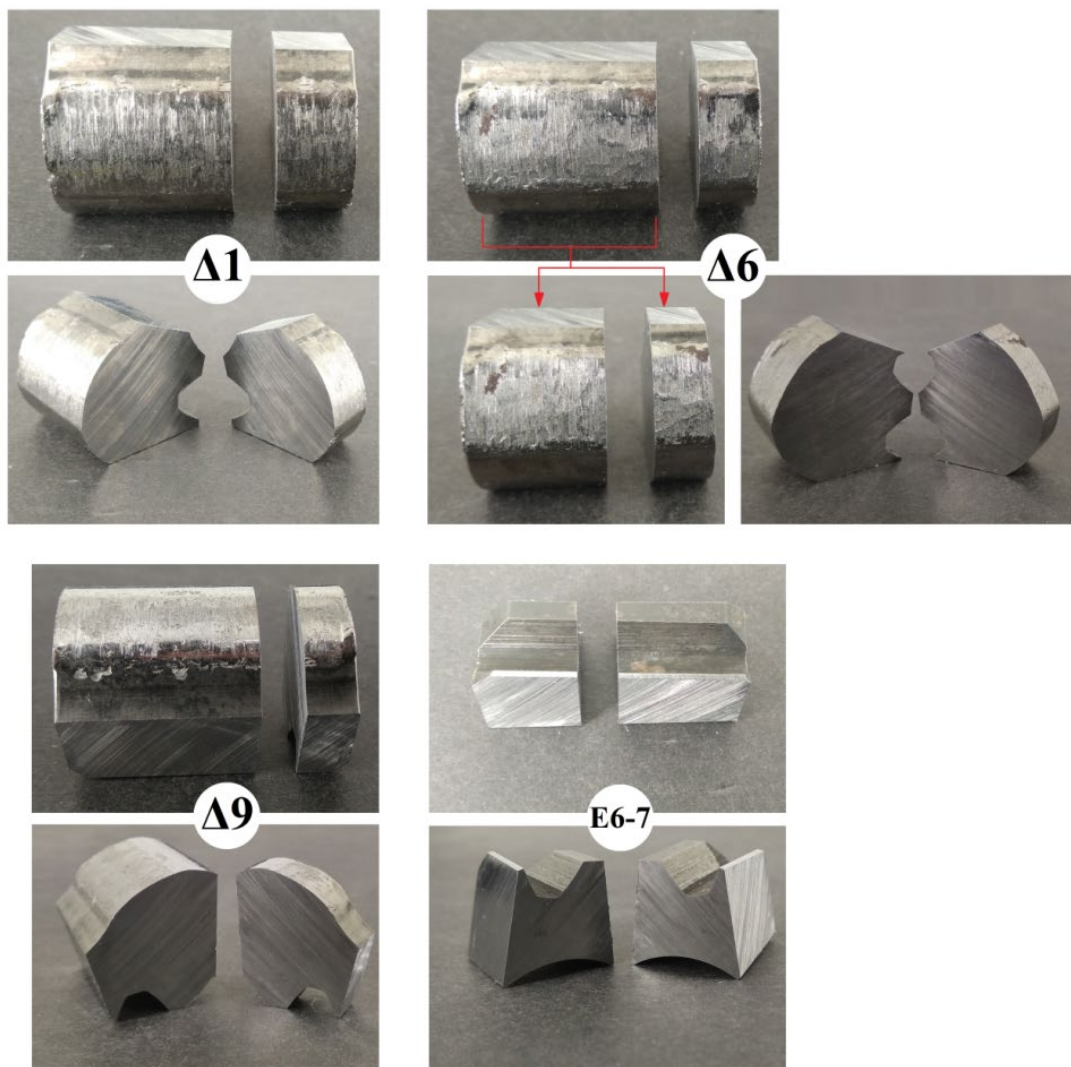
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν επιπλέον κοπές, στα δόντια Δ1 και Δ6, ώστε τα δοκίμια που θα προκύψουν από αυτά να χωράνε, χωρίς να τραυματίζουν, τον θάλαμο του εγκιβωτισμού, διαμέτρου 30 mm. Το δόντι Δ6 δεν χρειαζόταν περαιτέρω κόψιμο. Οι επιπλέον κοπές παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 6.11).



Εικόνα 6.11: Επιπλέον κοπές στα δόντια από τα οποία θα προκύψουν τα δοκίμια.

Από τις δημιουργημένες εγκοπές επιλέχθηκε η Ε6-7, η οποία αποτελούσε και την μεγαλύτερη σε μέγεθος. Το τελικό στάδιο της κοπής αφορά την εγκάρσια τομή των Δ1, Δ6, Δ9 και Ε6-7, με στόχο την απομόνωση των τμημάτων που θα αποτελέσουν τα δοκίμια της μικροσκοπικής ανάλυσης (Εικόνα 6.12). Πρώτα όμως πραγματοποιήθηκε μία δοκιμαστική κοπή στο δόντι Δ7, ώστε να εξακριβωθεί ότι ο

επιλεγμένος τρόπος κοπής δεν θα προκαλέσει κάποια περεταίρω αποκόλληση του ψαθυρού εναζωτωμένου στρώματος. Η κοπή του υλικού πραγματοποιήθηκε από την πλευρά της εξωτερικής οδόντωσης.



Εικόνα 6.12: Τελικό στάδιο κοπής δοκιμίων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, οι κομμένες επιφάνειες του υλικού, αμέσως μετά την υλοποίηση της κοπής παρουσίαζαν παραμένοντα μαγνητισμό, ο οποίος όμως εξασθενούσε μετά από λίγα λεπτά. Αυτό οφείλεται στον παραμένοντα μαγνητισμό που είχε το τεμάχιο, ο οποίος μετά τον διαχωρισμό λόγω της κοπής θα πρέπει να αποκτήσει δύο νέους πόλους σε κάθε απότμημα.

Εγκιβωτισμός

Σκοπός του εγκιβωτισμού είναι η διεύρυνση της επιφάνειας συγκράτησης του δοκιμίου, αλλά και της επιφάνειας λείανσης. Με αυτό το τρόπο διευκολύνεται η συγκράτηση του δοκιμίου και μειώνεται ο κίνδυνος της καμπύλωσης ακμών και της διαμόρφωσης ολόκληρης της επιφάνειας του δοκιμίου σε κεκλιμένη.

Κατά την διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εγκιβωτισμού της εικόνας 6.2. Από υλικά έγινε χρήση σκληρής ρητίνης Struers DuroFast με κωδικό: RESIF και κωδικό καταλόγου: 40100044, μαλακής ρητίνης: Struers MultiFast με κωδικό: RESRU και κωδικό καταλόγου: 40100027, και αντικολλητικής πούδρας Struers Antistick με κωδικό: FASTI και κωδικό καταλόγου: 40300043 (Εικόνα 6.13).



Εικόνα 6.13: Υλικά εγκιβωτισμού.

Η αντικολλητική πούδρα εναποτίθεται στο πλατώ του θαλάμου (Εικόνα 6.14: B) και στον πείρο συμπίεσης (Εικόνα 6.14: A). Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η συγκόλληση της ρητίνης πάνω στις επιφάνειες.



Εικόνα 6.14: Περιοχές εφαρμογής της αντικολλητικής πούδρας.

Η τοποθέτηση του δοκιμίου επί του πλατώ γίνεται με την εξεταζόμενη επιφάνεια να «κοιτάζει» προς τα κάτω. Στη συνέχεια το πλατό κατεβαίνει, έως ένα προκαθορισμένο σημείο, εντός του θαλάμου εγκιβώτισης. Με τη χρήση των δοσομετρητών και του χωνιού προστίθενται εντός του θαλάμου οι δύο ρητίνες. Η δοσολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι: 10ml σκληρής ρητίνης (1 κτ. μικρού δοσομετρητή) και 20ml μαλακής ρητίνης (1 κτ. μεγάλου δοσομετρητή). Εντός του θαλάμου εναποτίθεται ομοιόμορφα πρώτα η σκληρή και στη συνέχεια η μαλακή ρητίνη. Σκοπός της σκληρής ρητίνης είναι η συγκράτηση των ακμών, ενώ η μαλακή ρητίνη χρησιμοποιείται ως υπόβαθρο. Στη συνέχεια, η κεφαλή σφραγίζει τον θάλαμο του εγκιβωτισμού, με τον πείρο να συμπιέζει την ρητίνη. Η διαδικασία του εγκιβωτισμού αποτελείται από δύο στάδια, από την θέρμανση και από την ψύξη. Οι συνθήκες εγκιβωτισμού ρυθμίζονται κάθε φορά από τον χειριστή του μηχανήματος και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ρητίνης. Η τήξη της ρητίνης πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία 180°C, υπό εφαρμογή πίεσης στα 250bar, για χρονικό διάστημα ίσο με 3min. Η ψύξη της ρητίνης πραγματοποιήθηκε υπό τον ισχυρό καταωνισμό νερού για 2min στα τοιχώματα του θαλάμου εγκιβώτισης. Ο συνολικός χρόνος εγκιβωτισμού προκύπτει από το άθροισμα των δύο αυτών σταδίων και είναι ίσος με 5min. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με το άνοιγμα της κεφαλής, το ανέβασμα του πλατώ και την εύκολη απομάκρυνση του εγκιβωτισμένου δοκιμίου. Τα εγκιβωτισμένα δοκίμια παρουσιάζονται στην κάτωθι εικόνα (Εικόνα 6.15).



Εικόνα 6.15: Εγκιβωτισμένα δοκίμια Δ1, Δ6, Δ9 και E6-7.

Λείανση

Σκοπός της λείανσης είναι η εξομάλυνση της επιφανειακής τραχύτητας του δοκιμίου. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με την συσκευή λείανσης της εικόνας 6.3. Κατά την λείανση χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά της metkon και της Presi, με διάμετρο 250mm και με αρίθμηση τραχύτητας: P180, P240, P320, P400, P600, P800, P1000, P1200, P2400. Τα λειαντικά χαρτιά αποτελούνταν από καρβίδια του πυριτίου, πλην του P1200 που ήταν από οξείδια του αργιλίου. Η περιστροφή του δίσκου λείανσης ήταν ρυθμισμένη στα 220rpm και η παροχή του νερού ήταν καθόλη τη διαδικασία συνεχόμενη. Με κάθε αλλαγή λειαντικού χαρτιού η νέα θέση λείανσης του δοκιμίου διαθέτει κάθετη τροχιά σε σχέση με την κατεύθυνση των λειασμένων γραμμών της προηγούμενης.

Στίλβωση

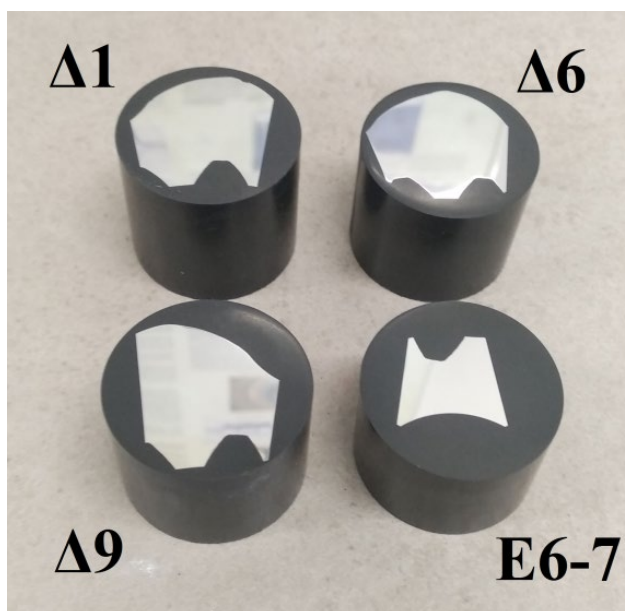
Σκοπός της στίλβωσης είναι η εξαφάνιση των ιχνών λείανσης. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με την ίδια λειαντική συσκευή. Κατά την λείανση χρησιμοποιήθηκαν στίλβωτικά πανιά της Presi, τύπου PAD - MAG, διαμέτρου 250mm και με αρίθμηση τραχύτητας: 6μm, 3μm, 1μm, 0.25μm. Χρησιμοποιήθηκε, επίσης, αιώρημα διαμαντιού τύπου spray της metkon με 6μm, το αιώρημα διαμαντιού της Struers DiaDuo-2 με 3μm, το αιώρημα αλουμίνας της Struers με κωδικό: ALONE και κωδικό καταλόγου: 40700043 με 1μm και το αιώρημα αλουμίνας της Struers με κωδικό: ALTRE και κωδικό καταλόγου: 40700044 με 0.3μm (Εικόνα 6.16).



Εικόνα 6.16: Αναλώσιμα υλικά στίλβωσης (αριστερά) και παρουσίαση της λειαντικής μηχανής πριν την έναρξη της στίλβωσης (δεξιά).

Η διαδικασία της στίλβωσης ολοκληρώθηκε σε δύο στάδια. Αρχικά τα δοκίμια στίλβώθηκαν από 6μm έως 1μm, ώστε να πραγματοποιηθεί η μικροσκληρομέτρηση του προφίλ εναζωτώσεως τους. Το τελευταίο στάδιο της στίλβωσης πραγματοποιήθηκε λίγο πριν από τη χημική προσβολή.

Οι συνθήκες λειτουργίας της διαδικασίας τροποποιούνταν ανά στάδιο στίλβωσης. Στα 6μm οι στροφές ήταν ρυθμισμένες στα 180rpm και πραγματοποιήθηκαν δύο πάσα στίλβωσης, σε χρόνο 1min30sec. Στα 3μm οι στροφές ήταν ρυθμισμένες στα 180rpm και πραγματοποιήθηκαν δύο πάσα στίλβωσης σε χρόνο 1min30sec. Στο 1μm οι στροφές ήταν ρυθμισμένες στα 150rpm και πραγματοποιήθηκαν δύο πάσα στίλβωσης, το ένα σε χρόνο 1min30sec και το άλλο σε 45sec. Στα 0.25μm οι στροφές ήταν ρυθμισμένες στα 150rpm και πραγματοποιήθηκε ένα μόνο πάσο στίλβωσης, σε χρόνο 1min30sec. Να σημειωθεί ότι κάθε πάσο στίλβωσης ήταν κάθετο στο προηγούμενο. Με την ολοκλήρωση κάθε σταδίου στίλβωσης ακολουθούσε καθαρισμός της επιφάνειας με ισοπροπυλική αλκοόλη και το παράλληλο «σκούπισμα» με βαμβάκι. Τα υπολείμματα από την ισοπροπυλική αλκοόλη εξατμίζονταν με την εφαρμογή θερμού αέρα επί της επιφάνειας και την ταυτόχρονη χρήση βαμβακιού. Στην εικόνα 6.17 παρουσιάζεται η κατοπτρική στίλβωμένη επιφάνεια των δοκιμίων, στα 0.25μm.

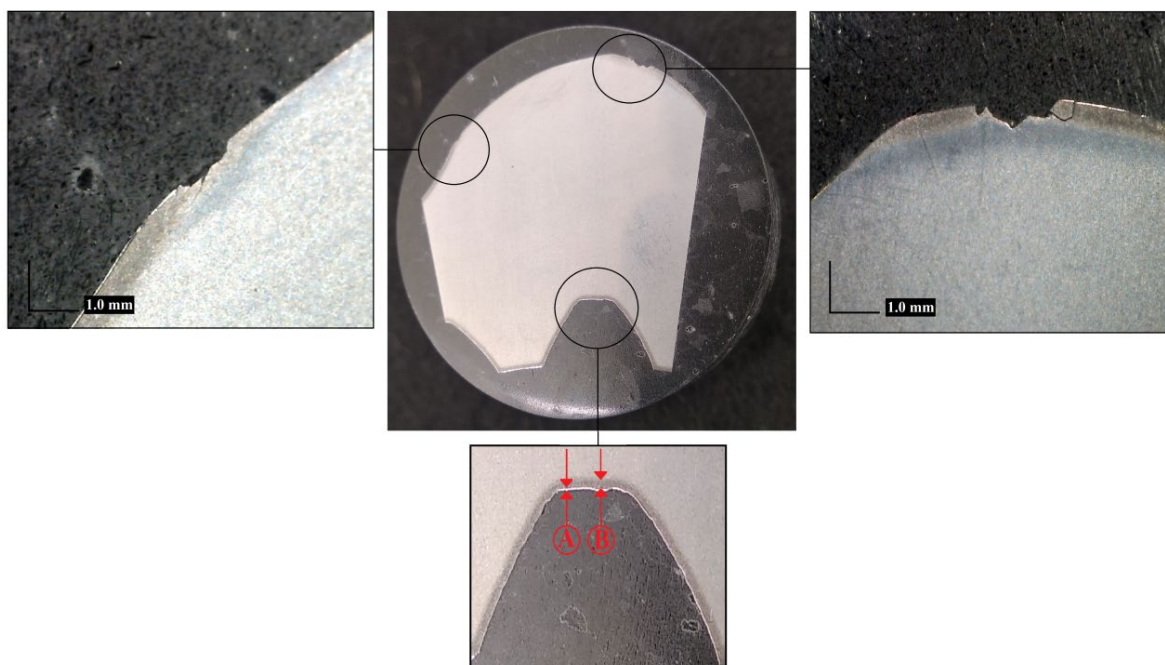


Εικόνα 6.17: Παρουσίαση στίλβωμένων επιφανειών στα 0.25μm.

Χημική προσβολή

Σκοπός της χημικής προσβολής είναι η διάβρωση της επιφανείας και η εμφάνιση της μικροδομής του υλικού. Ως χημικό αντιδραστήριο χρησιμοποιήθηκε Nitral 3% (HNO_3). Μετά το τελευταίο στάδιο της στίλβωσης και πριν από τη χημική προσβολή, κάθε δοκίμιο καθαριζόταν επιπλέον με τη χρήση υπερήχων για 3min. Η συσκευή καθαρισμού με υπερήχους που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 6.6. Ο καθαρισμός αυτός πραγματοποιήθηκε για την πλήρη εξάλειψη των υπολειμμάτων από τα αιωρήματα. Εν συνεχεία το υγρό των υπερήχων εξατμίζεται από την επιφάνεια του δοκιμίου και πάλι υπό την εφαρμογή θερμού αέρα επί της επιφάνειας και την ταυτόχρονη χρήση βαμβακιού. Υπό αυτή την διαδικασία η προσβολή των επιφανειών των τεσσάρων δοκιμίων παρουσιάστηκε μεταξύ του διαστήματος 47 - 59min.

Με το πέρας της χημικής προσβολής παρατηρείται δια γυμνού οφθαλμού, ότι στην προσβεβλημένη μάτ αποχρώσεως επιφάνεια, αποκαλύπτεται το εναζωτωμένο στρώμα. Στην εικόνα 6.18 παρουσιάζεται το εναζωτωμένο στρώμα που διακρίνεται δια γυμνού οφθαλμού, αλλά και μέσω της χρήσεως του εργαστηριακού στερεοσκοπίου σε μεγέθυνση 40x.



Εικόνα 6.18: Προσβεβλημένη επιφάνεια του δοκιμίου Δ1. Εμφάνιση εναζωτωμένου στρώματος. (A): Λευκή ζώνη, (B): Ζώνη διάχυσης.

6.3 Χημική ανάλυση υλικού

Βασικό στάδιο κάθε ανάλυσης αστοχίας αποτελεί η εξακρίβωση του υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Με αυτόν τον τρόπο αποσαφηνίζεται εάν έχει χρησιμοποιηθεί ή όχι το προσχεδιασμένο υλικό. Η ταυτοποίηση αυτή πραγματοποιείται μέσα από την ποσοτική και ποιοτική αναγνώριση της χημικής σύστασης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως χημική ανάλυση.

Η τεχνική που εφαρμόστηκε για την εξακρίβωση της χημικής σύστασης του εξαρτήματος είναι η φασματοσκοπία ατομικής εκπομπής (AES). Η συσκευή φασματοσκοπίας που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 6.8. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε εξαιτίας της υψηλής διακριτικής ικανότητας που παρουσιάζει. Η αρχή λειτουργίας αυτού του είδους φασματοσκοπίας στηρίζεται στην εξέταση των μηκών κύματος των εκλυόμενων φωτονίων, από την διέγερση των ατόμων του υλικού κατά την μετάβασή τους από την υψηλή στην πρότερη τους χαμηλή ενεργειακή κατάσταση. Η διέγερση των ατόμων επιτυγχάνεται διαμέσω της τοπικής καύσης της εξεταζόμενης περιοχής [75].



Εικόνα 6.19: Αποτυπώματα της φασματοσκοπίας AES στα δύο τμήματα του δοντιού Δ7.

Η φασματοσκοπία εφαρμόστηκε στο απομονωμένο δόντι Δ7, όπου είχε πραγματοποιηθεί η δοκιμαστική κοπή. Η διαδικασία έλαβε χώρα στην κομμένη επιφάνεια και των δύο τμημάτων του δοντιού (Εικόνα 6.19), ώστε να προκύψει μία όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της χημικής σύστασης του πυρήνα. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η πραγματική τιμή (μέση τιμή) των κραματικών στοιχείων, που προέκυψαν από τη χημική ανάλυση των δύο τμημάτων του δοντιού.

Πίνακας 6.1: Χημική σύσταση του υλικού βάσης

Κραματικό στοιχείο	C	Si	Mn	P	S
Περιεκτικότητα (%)	0.325	0.2605	0.545	0.012	0.0255
Κραματικό στοιχείο	Cr	Ni	Mo	V	
Περιεκτικότητα (%)	2.56	0.173	0.2395	0.1485	

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζεται η τυπική χημική σύσταση του χαμηλά κραματωμένου χάλυβα 31CrMoV9 (1.8519), με βάση το πρότυπο DIN EN 10085 [76]. Σύμφωνα με την συλλογή των ιστορικών δεδομένων που παρουσιάστηκε στο τέταρτο κεφάλαιο, ο συγκεκριμένος κραματωμένος χάλυβας αποτελεί το υλικό βάσης του εξεταζόμενου εξαρτήματος.

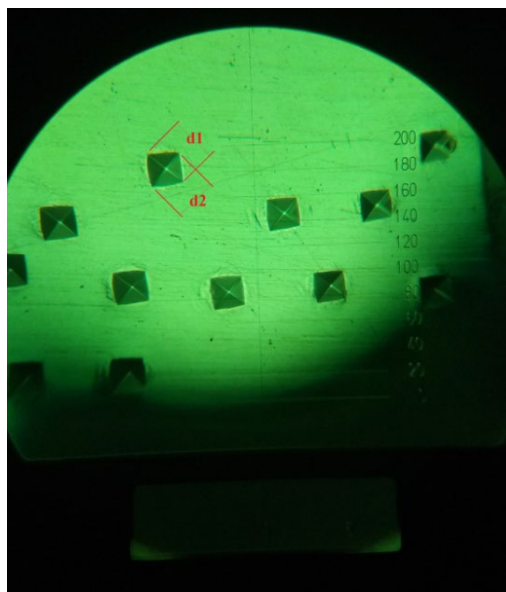
Πίνακας 6.2: Τυπική χημική σύσταση του χαμηλά κραματωμένου χάλυβα 31CrMoV9 κατά DIN EN 10085.

Κραματικό στοιχείο	C	Si	Mn	P
Περιεκτικότητα (%)	0.27 - 0.34	≤0.40	0.40 - 0.70	≤0.025
Κραματικό στοιχείο	S	Cr	Mo	V
Περιεκτικότητα (%)	≤0.035	2.30 - 2.70	0.15 - 0.25	0.10 - 0.20

Παρατηρώντας τα στοιχεία που προέκυψαν από τη χημική ανάλυση του υλικού κατασκευής του εξαρτήματος (Πίνακας 6.1) και συγκρίνοντας τα με τα κύρια κραματικά στοιχεία που απαρτίζουν το υλικό που θεωρητικά έχει χρησιμοποιηθεί (Πίνακας 6.2), γίνεται αντιληπτό ότι το υλικό είναι το αρχικά δηλωθέν. Από την στιγμή που το υλικό είναι το ορθός επιλεγμένο και το είδος αυτής της αστοχίας αποτελεί, σύμφωνα πάντα με τον έλληνα αντιπρόσωπο της AVS Rotators, μεμονωμένο περιστατικό, δεν κρίνεται ως απαραίτητη η τροποποίηση του υλικού βάσης.

6.4 Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίων

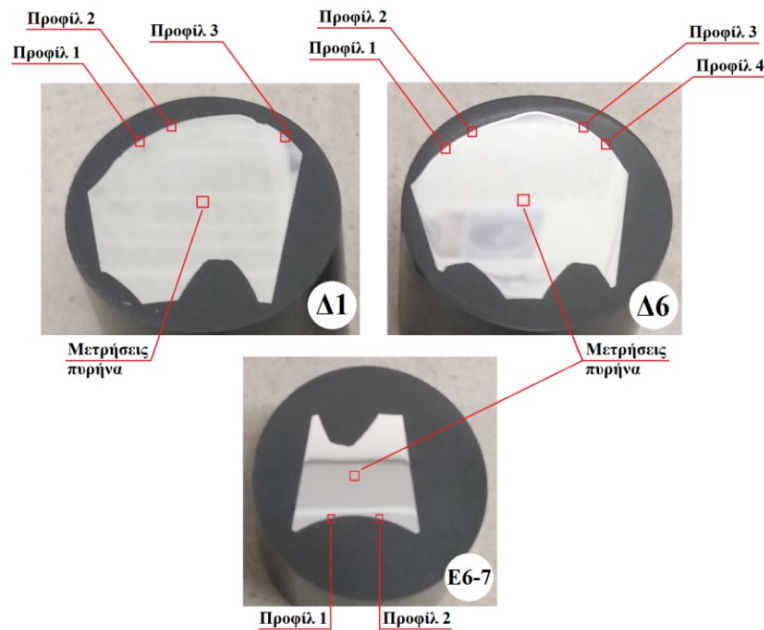
Εξαιτίας του μικρού βάθους του στρώματος εναζωτώσεως οι συμβατικές τεχνικές σκληρομέτρησης δεν μπορούν να εφαρμοστούν. Για τον λόγο αυτό διενεργήθηκε η μέθοδος της μικροσκληρομέτρησης σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία του προτύπου προδιαγραφών «E384 - 17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials» [77], του οργανισμού τυποποίησης ASTM. Η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε υπό φόρτιση 200gr, για 15sec, με τη χρήση διεισδυτή Vickers. Στην κάτωθι εικόνα παρουσιάζεται το αποτύπωμα του διεισδυτή, όπως αυτό διακρίνεται από τον φακό του οργάνου (Εικόνα 6.20).



Εικόνα 6.20: Παρουσίαση αποτυπωμάτων διεισδυτή Vickers, όπου $d1$ και $d2$ οι διαγώνιοι του αποτυπώματος.

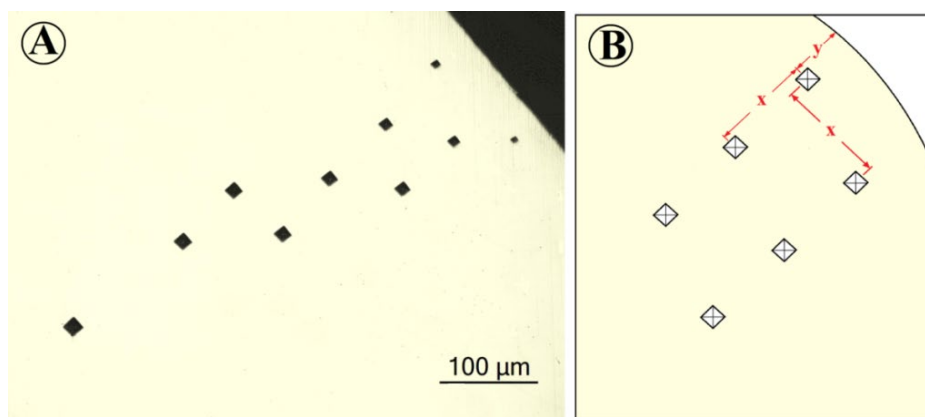
Μέσω της μικροσκληρομέτρησης ελέγχθηκε η κατανομή της σκληρότητας στο φθαρμένο και στο μη καταπονημένο προφίλ της εναζωτώσεως (Εικόνα 6.21). Από τα τέσσερα δοκίμια μικροσκληρομετρήθηκαν μόνο τα Δ1, Δ6 και Ε6-7. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια από την περιοχή των δοντιών και όχι ένα, όπως συνέβη για την περιοχή της εγκοπής, οφείλεται στον έλεγχο της επαναληψιμότητας του προφίλ σκληρότητας της φθαρμένης επιφάνειας. Το τρίτο δοκίμιο Δ9 δεν μικροσκληρομετρήθηκε, εφόσον δεν υπήρξαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στις ληφθέντες μετρήσεις των δοκιμίων Δ1 και Δ6. Στο δοκίμιο Δ1 πραγματοποιήθηκαν τρία προφίλ μικροσκληρομέτρησης, δύο στην περιοχή της ολίσθησης και μία στην περιοχή της συμπίεσης. Στο δοκίμιο Δ6 πραγματοποιήθηκαν τέσσερα προφίλ μικροσκληρομέτρησης, δύο στην περιοχή της ολίσθησης και δύο στην περιοχή της συμπίεσης. Στο δοκίμιο Ε6-7 πραγματοποιήθηκαν δύο προφίλ μικροσκληρομέτρησης

και τα δύο στην περιοχή της εγκοπής, η οποία αποτελεί και την μη καταπονημένη περιοχή. Σε κάθε δοκίμιο (πλην του Δ9) πάρθηκαν και πέντε μετρήσεις στον πυρήνα του εξαρτήματος (περιοχή άνευ επηρεασμού από την εναζώτωση).



Εικόνα 6.21: Παρουσίαση των περιοχών λήψης των μικροσκληρομετρήσεων.

Το μοτίβο λήψης των μετρήσεων που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 6.22, όπου x η προτεινόμενη απόσταση μεταξύ κάθε αποτυπώματος μέτρησης, σύμφωνα με το άνωθεν εγχειρίδιο και y η απόσταση του πρώτου αποτυπώματος από την επιφάνεια περάτωσης της οδόντωσης. Η απόσταση y λήφθηκε με γνώμονα το μικροσκοπικό μέγεθος του στρώματος της εναζώτωσης, σε συνδυασμό με το μέγεθος του αποτυπώματος του διεισδυτή, έτσι ώστε η μέτρηση να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιφάνεια και να αποδώσει μία ικανοποιητική προσεγγιστική στην τιμή σκληρότητας της επιφάνειας του εναζωτωμένου στρώματος.



Εικόνα 6.22: (Α) Παρουσίαση των αποτυπωμάτων με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου, προ της προσβολής και (Β) Σχεδιασμός μοτίβου μικροσκληρομέτρησης.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των μέσων όρων των διαγωνίων των αποτυπωμάτων σε τιμές σκληρότητας Vickers. Οι τιμές αυτές προκύπτουν μέσα από τη χρήση του μαθηματικού τύπου 6.1, όπου HV: η σκληρότητα σε Vickers, P: η φόρτιση σε gr και \bar{d} : ο μέσος όρος των διαγωνίων σε μm . Ενώ η στήλη με τις διορθωμένες τιμές σκληρότητας απορρέει από την καμπύλη διόρθωσης που προέκυψε από την έμμεση επαλήθευση του μικροσκληρομέτρου (Παράρτημα Π3).

$$HV = 1854.4 \times P/\bar{d}^2 \quad (6.1)$$

Δοκίμιο Δ1

Στους πίνακες 6.3 και 6.4 αναγράφονται οι μετρήσεις από τα προφίλ 1 και 2 της περιοχής της ολίσθησης. Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του προφίλ 3 από την περιοχή της συμπίεσης. Στον πίνακα 6.6 παρουσιάζονται οι μετρήσεις στον πυρήνα του υλικού. Τα αποτελέσματα από τις μικροσκληρομετρήσεις των προφίλ του εναζωτωμένου στρώματος παρουσιάζονται γραφικά στην εικόνα 6.23.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 1, περιοχή ολίσθησης/δοκίμιο Δ1.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
35	29,6	30,8	30,20	406,6	425,6
80	32,3	33,4	32,85	343,7	364,5
120	33,6	34,2	33,90	322,7	344,1
150	34,3	35,5	34,90	304,5	326,4
205	35,7	35,8	35,75	290,2	312,5
245	35,7	36,0	35,85	288,6	310,9
280	36,4	35,7	36,05	285,4	307,8
320	36,8	36,0	36,40	279,9	302,5
365	36,3	36,4	36,35	280,7	303,3
500	35,8	36,5	36,15	283,8	306,3

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 2, περιοχή ολίσθησης/δοκίμιο Δ1.

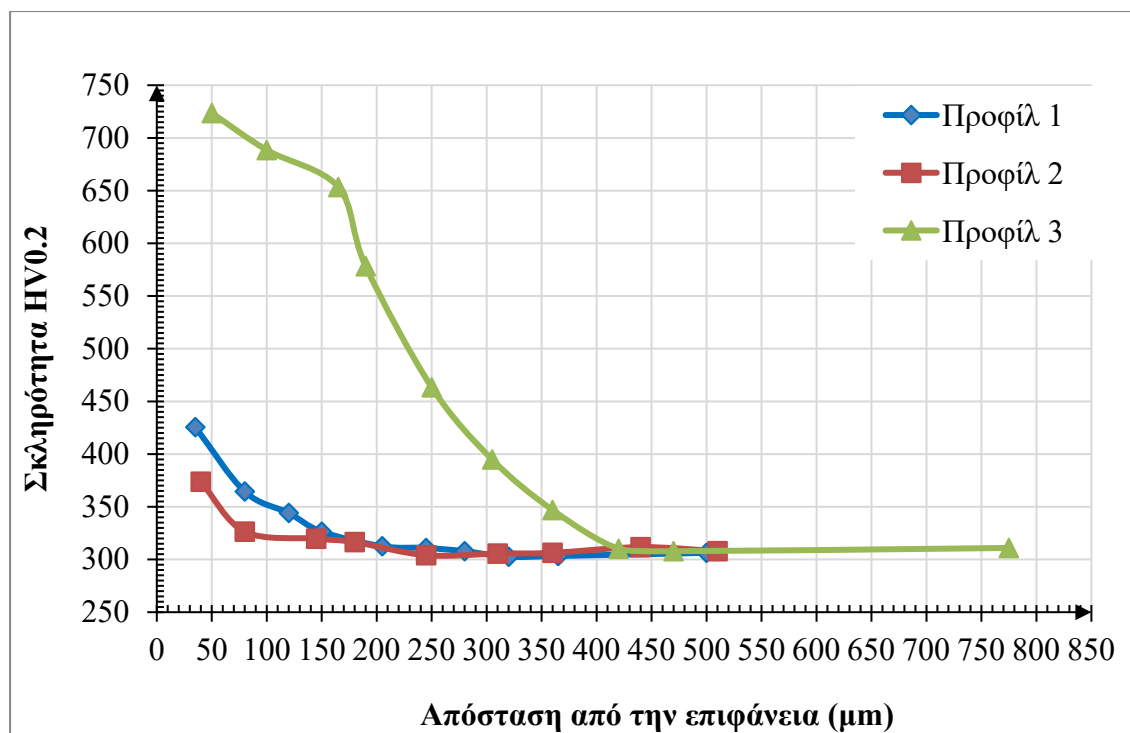
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
40	32,1	32,7	32,40	353,3	373,8
80	34,8	35,0	34,90	304,5	326,4
145	35,4	35,2	35,30	297,6	319,7
180	35,8	35,2	35,50	294,3	316,5
245	36,2	36,4	36,30	281,5	304,0
310	36,4	36,0	36,20	283,0	305,6
360	36,4	35,9	36,15	283,8	306,3
440	35,5	36,1	35,80	289,4	311,7
510	36,0	36,1	36,05	285,4	307,8

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 3, περιοχή συμπίεσης/δοκίμιο Δ1.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
50	23,1	22,5	22,80	713,5	723,6
100	23,4	23,4	23,40	677,3	688,5
165	24,3	23,8	24,05	641,2	653,4
190	26,2	25,1	25,65	563,7	578,2
250	29,2	28,5	28,85	445,6	463,4
305	31,7	31,2	31,45	375,0	394,9
360	33,7	33,8	33,75	325,6	346,9
420	36,2	35,6	35,90	287,8	310,2
470	36,5	35,6	36,05	285,4	307,8
775	36,3	35,4	35,85	288,6	310,9

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης πυρήνα/δοκίμιο Δ1.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
-	35,6	35,7	35,65	291,8	314,1
-	34,8	35,5	35,15	300,2	322,2
-	35,6	36,4	36,00	286,2	308,6
-	36,3	36,4	36,35	280,7	303,3
-	35,8	36,4	36,10	284,6	307,1



Εικόνα 6.23: Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της σκληρότητας του εναζωτωμένου στρώματος για το δοκίμιο Δ1.

Δοκίμιο Δ6

Στους πίνακες 6.7 και 6.8 αναγράφονται οι μετρήσεις από τα προφίλ 1 και 2 της περιοχής της ολίσθησης. Στους πίνακες 6.9 και 6.10 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των προφίλ 3 και 4 της περιοχής συμπίεσης. Στον πίνακα 6.11 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του πυρήνα του εξαρτήματος. Τα αποτελέσματα από τις μικροσκληρομετρήσεις των προφίλ του εναζωτωμένου στρώματος παρουσιάζονται γραφικά στην εικόνα 6.24.

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 1, περιοχή ολίσθησης/δοκίμιο Δ6.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
40	32,7	32,4	32,55	350,1	370,7
100	35,4	35,0	35,20	299,3	321,4
120	34,7	35,8	35,25	298,5	320,6
190	35,8	36,6	36,20	283,0	305,6
250	36,8	36,7	36,75	274,6	297,4
310	37,5	37,5	37,50	263,7	286,8
410	37,2	36,7	36,95	271,6	294,5
520	36,5	36,6	36,55	277,6	300,3

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 2, περιοχή ολίσθησης/δοκίμιο Δ6.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
40	32,7	32,4	32,55	350,1	370,7
100	35,4	35,0	35,20	299,3	321,4
120	34,7	35,8	35,25	298,5	320,6
190	35,8	36,6	36,20	283,0	305,6
250	36,8	36,7	36,75	274,6	297,4
310	37,5	37,5	37,50	263,7	286,8
410	37,2	36,7	36,95	271,6	294,5
520	36,5	36,6	36,55	277,6	300,3

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 3, περιοχή συμπίεσης/δοκίμιο Δ6.

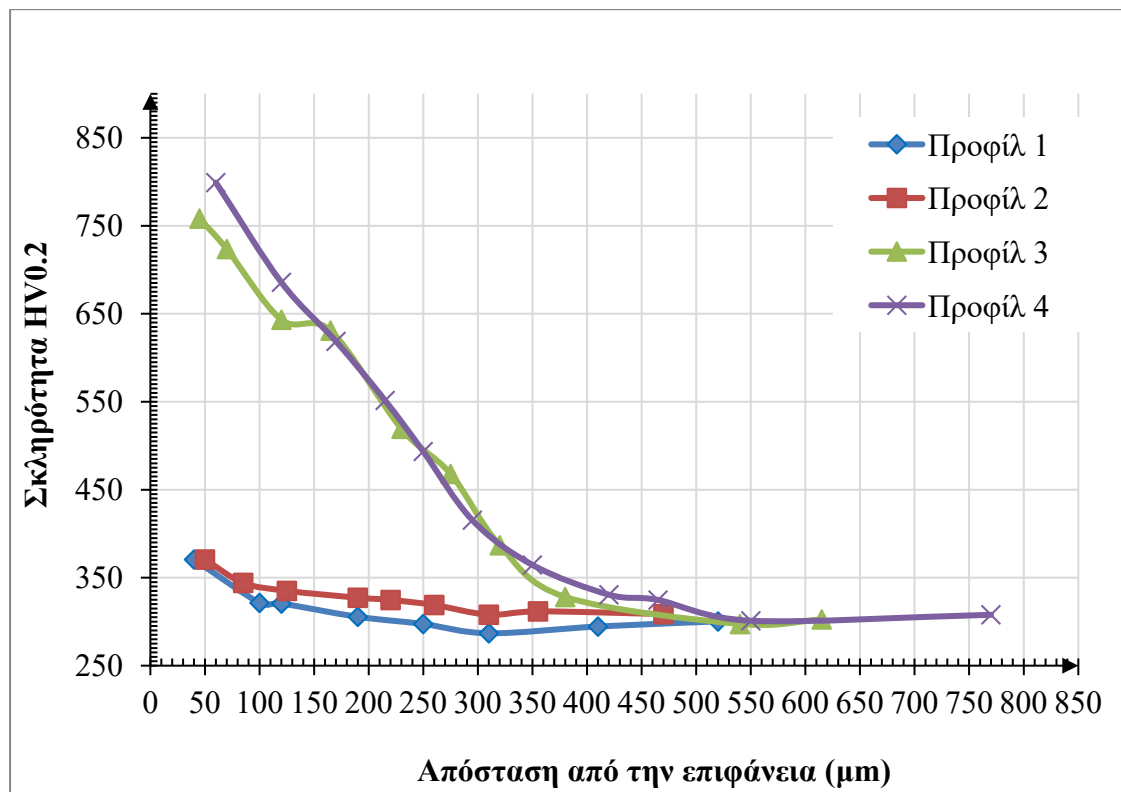
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
45	22,7	21,8	22,25	749,2	758,3
70	23,4	22,2	22,80	713,5	723,6
120	24,5	24,0	24,25	630,7	643,2
165	24,8	24,2	24,50	617,9	630,8
230	27,6	26,7	27,15	503,1	519,3
275	29,0	28,4	28,70	450,3	468,0
320	31,7	31,9	31,80	366,8	386,9
380	34,8	34,8	34,80	306,2	328,1
540	36,7	36,8	36,75	274,6	297,4
615	36,7	36,1	36,40	279,9	302,5

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 4, περιοχή συμπίεσης/δοκίμιο Δ6.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
60	22,0	21,3	21,65	791,3	799,2
120	24,1	22,8	23,45	674,4	685,7
170	24,9	24,6	24,75	605,5	618,7
215	26,3	26,3	26,30	536,2	551,4
250	27,9	27,9	27,90	476,5	493,4
295	30,7	30,5	30,60	396,1	415,4
350	32,6	33,1	32,85	343,7	364,5
420	35,2	34,1	34,65	308,9	330,7
465	35,0	35,0	35,00	302,8	324,7
550	36,6	36,4	36,50	278,4	301,1
770	36,3	35,8	36,05	285,4	307,8

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης πυρήνα/δοκίμιο Δ6.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
-	36,8	36,5	36,65	276,1	298,8
-	36,3	36,6	36,45	279,2	301,8
-	36,5	36,6	36,55	277,6	300,3
-	36,2	36,3	36,25	282,2	304,8
-	36,4	35,4	35,90	287,8	310,2



Εικόνα 6.24: Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της σκληρότητας του εναζωτωμένου στρώματος για το δοκίμιο Δ6.

Δοκίμιο Ε6-7

Οι πίνακες 6.12 και 6.13 αντιστοιχούν στα προφίλ μικροσκληρομέτρησης 1 και 2 της μη καταπονημένης περιοχής της εγκοπής. Στον πίνακα 6.14 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της καρδιάς του υλικού. Τα αποτελέσματα από τις μικροσκληρομετρήσεις των δύο προφίλ του εναζωτωμένου στρώματος παρουσιάζονται γραφικά στην εικόνα 6.25.

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 1, εγκοπή/δοκίμιο Ε6-7.

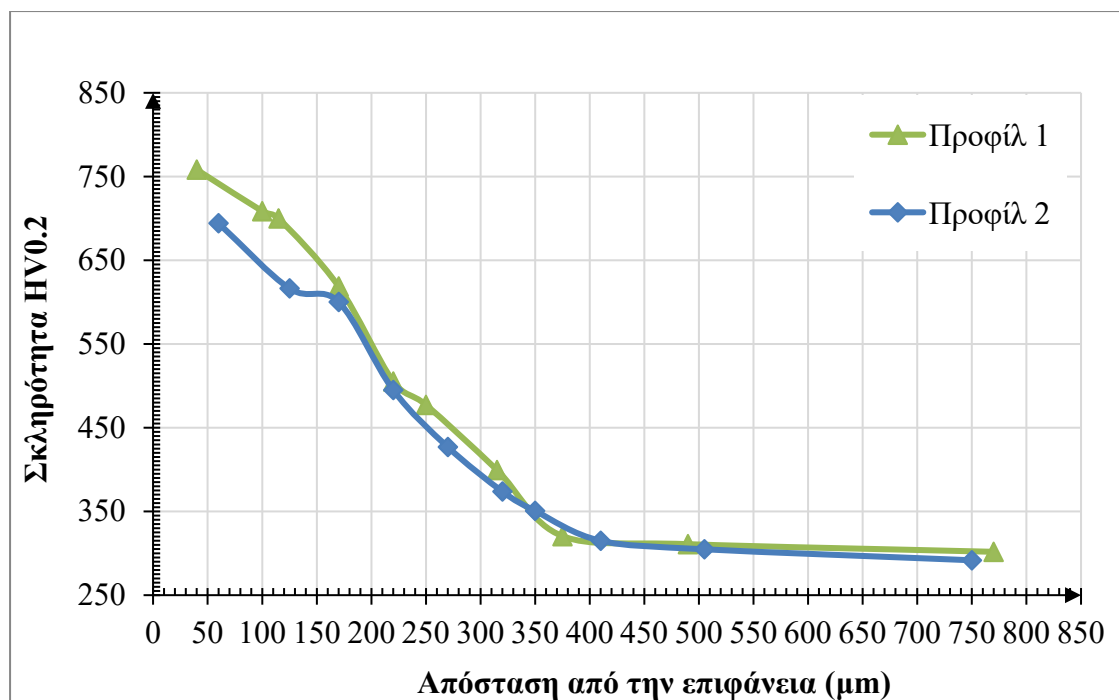
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
40	22,7	21,8	22,25	749,2	758,3
100	22,7	23,4	23,05	698,1	708,6
115	23,7	22,7	23,20	689,1	699,9
170	25,2	24,3	24,75	605,5	618,7
220	28,2	26,9	27,55	488,6	505,3
250	28,8	28,0	28,40	459,8	477,3
315	31,7	30,8	31,25	379,8	399,5
375	35,8	34,7	35,25	298,5	320,6
490	36,8	34,9	35,85	288,6	310,9
770	37,3	35,6	36,45	279,2	301,8

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης προφίλ 2, εγκοπή/δοκίμιο Ε6-7.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
60	23,8	22,8	23,30	683,2	694,2
125	25,3	24,3	24,80	603,0	616,3
170	25,6	24,7	25,15	586,4	600,1
220	28,3	27,4	27,85	478,2	495,1
270	30,2	30,1	30,15	408,0	426,9
320	33,0	31,8	32,40	353,3	373,8
350	34,2	32,9	33,55	329,5	350,7
410	36,4	34,8	35,60	292,6	314,9
505	37,0	35,5	36,25	282,2	304,8
750	38,5	35,8	37,15	268,7	291,7

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης πυρήνα/δοκίμιο Ε6-7.

Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	dM.O. (μm)	HV0.2	HV0.2 (Διορθωμένο)
-	37,0	35,6	36,30	281,5	304,0
-	37,4	36,2	36,80	273,9	296,7
-	37,5	37,2	37,35	265,9	288,9
-	37,2	36,8	37,00	270,9	293,8
-	36,7	35,4	36,05	285,4	307,8



Εικόνα 6.25: Γραφική αναπαράσταση της κατανομής της σκληρότητας του εναζωτωμένου στρώματος για το δοκίμιο E6-7.

Από τον μέσο όρο των πρώτων και πιο κοντινών μικροσκληρομετρήσεων στην κατατομή της οδόντωσης (40 - 60μm), των προφίλ 3 και 4 των δοκιμίων Δ1 και Δ6 και των προφίλ 1 και 2 του δοκιμίου E6-7, προκύπτει ότι η σκληρότητα της εναζωτωμένης επιφάνειας αντιστοιχεί περίπου στα 750 HV. Αντίστοιχα από τον μέσο όρο των μικροσκληρομετρήσεων στο κέντρο των δοκιμίων Δ1, Δ6 και E6-7 προκύπτει ότι η σκληρότητα του μη εμποτισμένου με άζωτο υλικού βάσης, είναι περίπου στα 300 HV.

Θεωρητικά το βάθος του εναζωτωμένου στρώματος περιγράφεται ως η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια έως το σημείο όπου η σκληρότητα είναι 50HV υψηλότερη της σκληρότητας του πυρήνα του υλικού. Σύμφωνα, λοιπόν, με τους πίνακες των προφίλ 3 και 4 των δοκιμίων Δ1 και Δ6 και των προφίλ 1 και 2 του δοκιμίου E6-7, το βάθος του στρώματος της εναζώτωσης (λευκή ζώνη και ζώνη διαχύσεως) αντιστοιχεί περίπου στα 320μm. Μέσα από την παρατήρηση όλων των πινάκων των προφίλ των δοκιμίων, γίνεται αντιληπτό ότι το βάθος της ζώνης μετάβασης αντιστοιχεί περίπου στα 60μm.

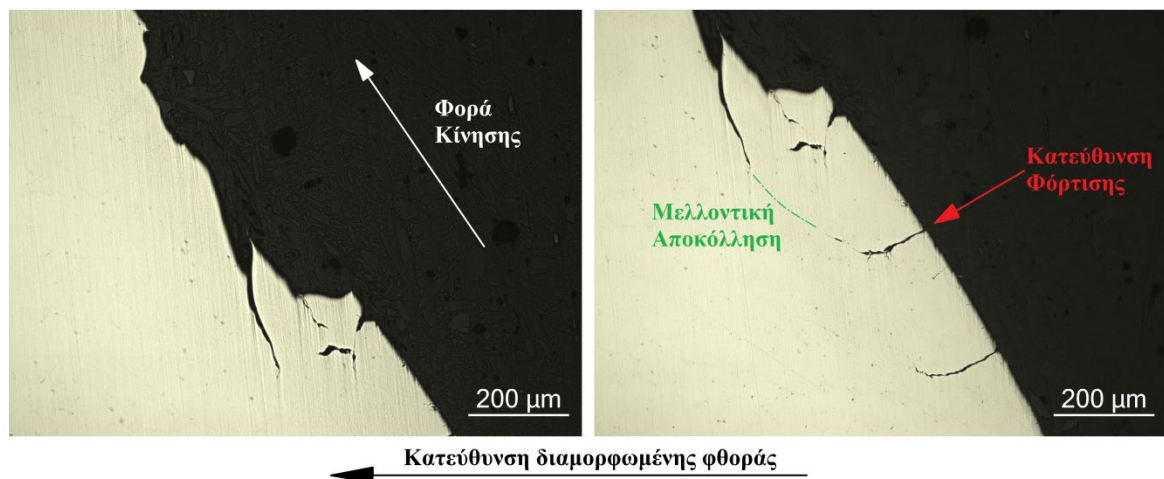
Τέλος, τόσο από τους πίνακες των προφίλ 1 και 2 των δοκιμίων Δ1 και Δ6 όσο και από τα εικονιζόμενα διαγράμματα των εικόνων 6.22 και 6.23 διακρίνεται ότι στην περιοχή ολίσθησης κάθε δοντιού τόσο η λευκή ζώνη όσο και η ζώνη διαχύσεως έχουν αποκολληθεί πλήρως.

6.5 Οπτική μικροσκοπία δοκιμίων

Η διαδικασία της οπτικής μικροσκοπίας πραγματοποιήθηκε υπό τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου ανεστραμμένων φακών Zeiss Axio Vert.1 (Εικόνα 6.5). Η διαδικασία αυτή διακρίνεται σε δύο φάσεις: στην μελέτη των εξεταζόμενων επιφανειών φθοράς πριν και μετά τη χημική προσβολή.

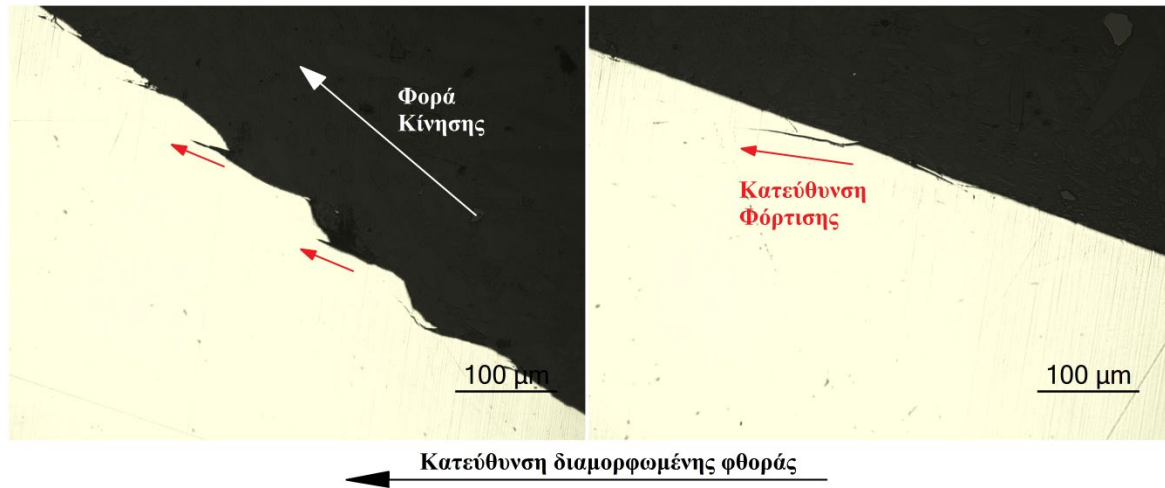
Κατά την οπτική μικροσκοπία, προ της διεργασίας της χημικής προσβολής, εξετάστηκαν ορισμένες περιοχές φθοράς, στην μεγέθυνση 200x και 100x. Οι κάτωθι εικόνες παρουσιάζουν τις τέσσερις περιοχές φθοράς που διακρίνονται επί της καμπυλότητας του δοκιμίου Δ1.

Στην περιοχή της κρούσης, (Εικόνα 6.26) διακρίνονται εκλεπίσεις και κάθετες στην καμπυλότητα της οδόντωσης ρωγμές, οι οποίες δημιουργούνται κατά την αρχή της σύμπλεξης. Οι ρωγμές αυτές είναι οι αντίστοιχες μικρορηγματώσεις που εντοπίστηκαν πλησίον των εκλεπίσεων κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο στην περιοχή αυτή. Από την κατεύθυνση των ρωγμών γίνεται αντιληπτό ότι οι κύριες εφαρμοζόμενες τάσεις είναι ορθές. Η υπόγεια συνένωση των ρηγματώσεων έχει ως αποτέλεσμα την αποκόλληση υλικού και την δημιουργία ξεφλουδισμάτων (flaking). Σύμφωνα με την κλίμακα του μικροσκοπίου που αναγράφεται στο κάτω μέρος κάθε εικόνας, παρατηρείται ότι το βάθος διάδοσης των ρωγμών κυμαίνεται περίπου στα 200 μm . Με βάση τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης η διάδοση των ρωγμών περιορίζεται στην ψαθυρή ζώνη της διαχύσεως.



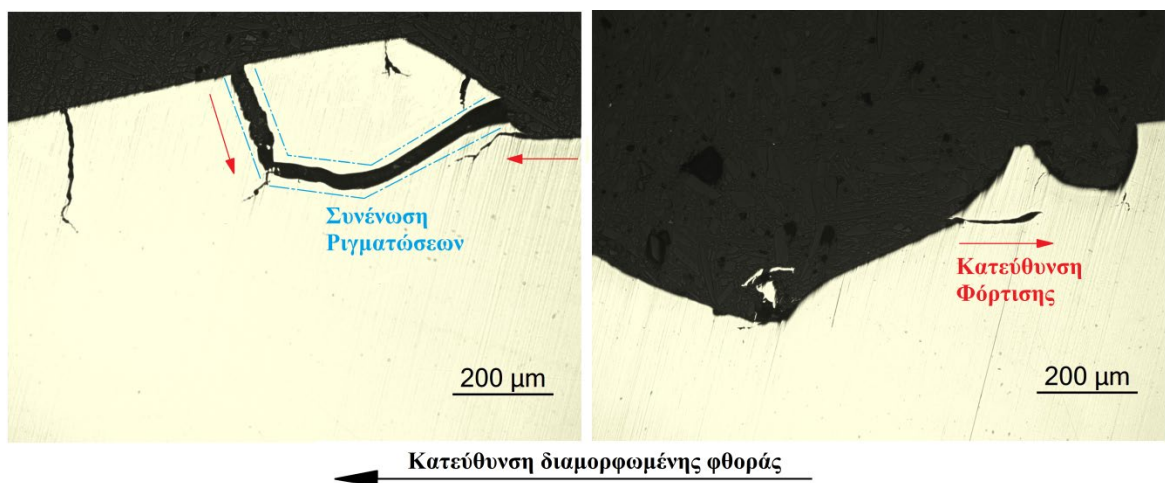
Εικόνα 6.26: Μορφολογία της περιοχής της κρούσης (100x, δοκίμιο Δ1).

Στην περιοχή της ολίσθησης, (Εικόνα 6.27) οι μικρορηγματώσεις δεν διαδίδονται κάθετα, αλλά εκτείνονται εντός της ζώνης διαχύσεως με προσανατολισμό σχεδόν παράλληλο της καμπυλότητας της οδόντωσης. Λαμβανομένου υπόψιν ότι η περιοχή παρουσιάζει εκτενή φθορά λόγω εκτριβής (γνωστό από τον μακροσκοπικό έλεγχο), το υλικό αποκολλήθηκε εξαιτίας της εφαρμογής ισχυρών διατμητικών τάσεων επι της επιφάνειας.



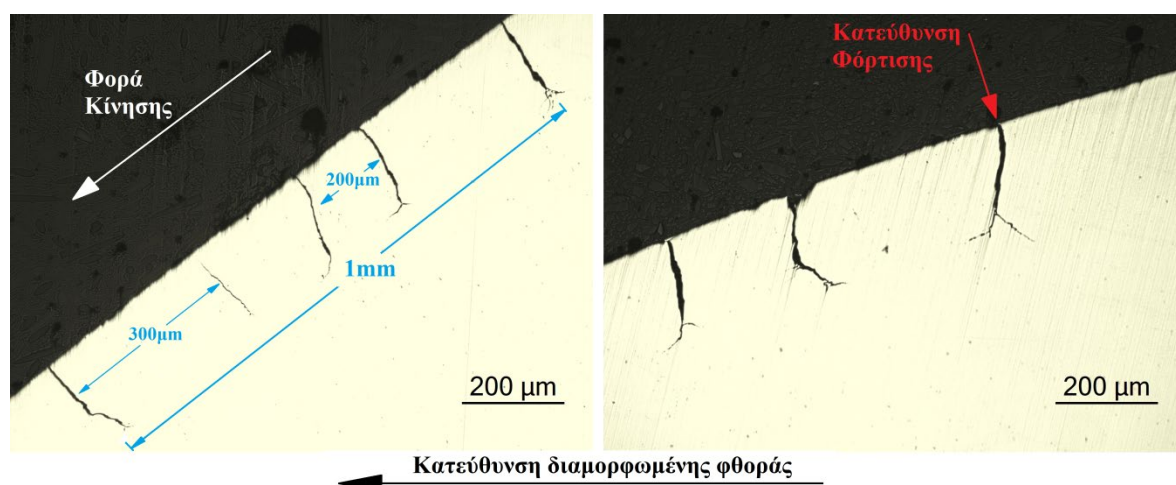
Εικόνα 6.27: Μορφολογία της περιοχής της ολίσθησης (100x, δοκίμιο Δ1).

Η περιοχή της μετάβασης, (Εικόνα 6.28) αποτελεί μία σύνθετη σε φόρτιση περιοχή, στην οποία εμφανίζονται ορθές και διατμητικές τάσεις. Στην περιοχή αυτή διακρίνονται αποκολλήσεις υλικού, οι οποίες οφείλονται στη συνένωση των δημιουργούμενων ρηγματώσεων, κυρίως όμως από την επιβολή των ορθών τάσεων.



Εικόνα 6.28: Μορφολογία της περιοχής μετάβασης (100x, δοκίμιο Δ1).

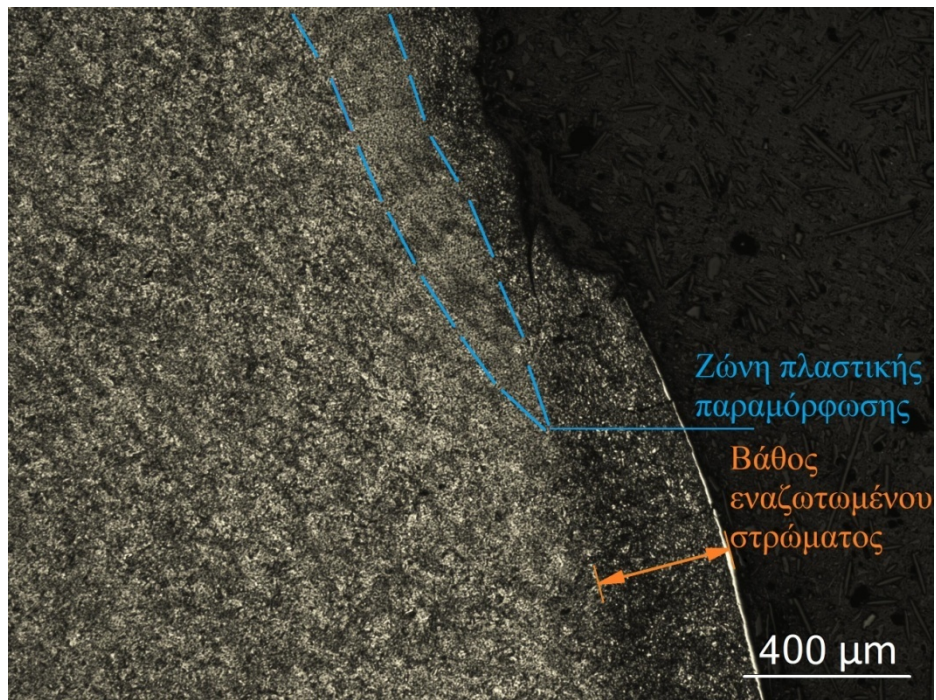
Στην περιοχή της συμπίεσης, (Εικόνα 6.29) διακρίνονται κάθετες ως προς την καμπυλότητα της οδόντωσης ρωγμές, ομοιογενούς βάθους λίγο μεγαλύτερου των 200 μm . Οι ρωγμές αυτές αναφέρονται στις διαμήκεις ρηγματώσεις που παρατηρήθηκαν, σχεδόν καθόλη την έκταση της περιοχής, κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο. Η εξέλιξη των ρηγματώσεων καταλήγει σε δευτερεύουσα δίκτυα ρωγμών, τα οποία εξελίσσονται εντός της ψαθυρής ζώνης διαχύσεως, περίπου 120 μm μακριά από την νοητή διεπιφάνεια οριοθέτησης της ζώνης διάχυσης και της ζώνης μετάβασης (με βάση τις μικροσκληρομετρήσεις). Σύμφωνα με τις μικροσκληρομετρήσεις στα προφίλ 3 και 4 της περιοχής της συμπίεσης, η σκληρότητα σε απόσταση 200 μm από την επιφάνεια ισούται περίπου με 600HV. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από μεγάλη πυκνότητα ρηγματώσεων. Συγκεκριμένα σε μήκος περίπου ίσο του 1mm (1000 μm) εντοπίζονται πέντε ρηγματώσεις. Η μέση απόσταση μεταξύ των ρωγμών κυμαίνεται περίπου από 200 έως 300 μm .



Εικόνα 6.29: Μορφολογία της περιοχής της συμπίεσης (100x, δοκίμιο Δ1).

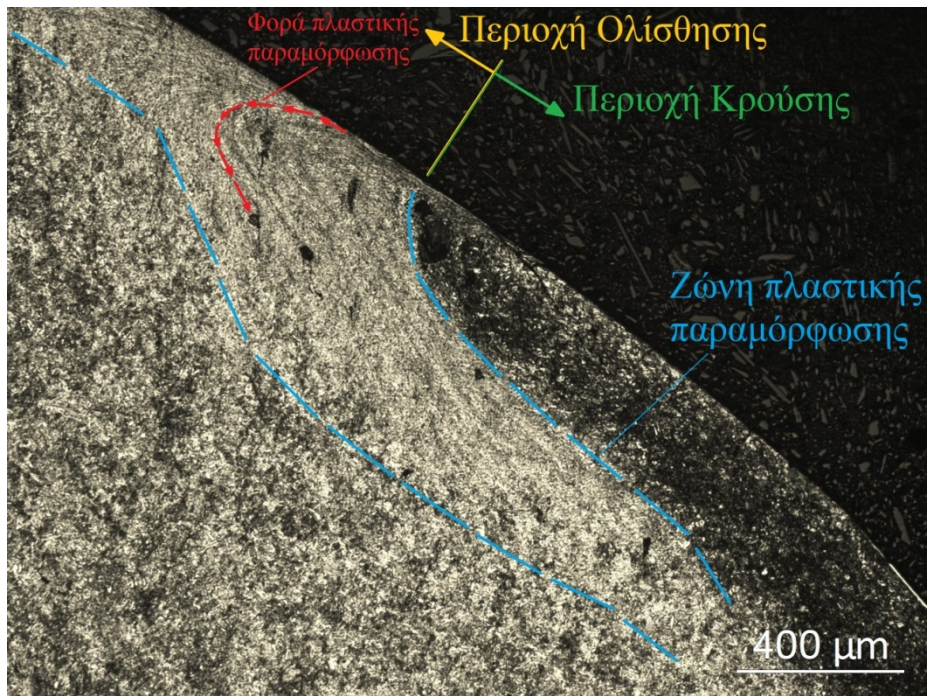
Κατά την οπτική μικροσκοπία, αμέσως μετά τη διαδικασία της χημικής προσβολής, ελέγχθηκε η μικροδομή και η κατάσταση του εναζωτωμένου στρώματος, καθώς επίσης και η μικροδομή του υλικού βάσης.

Στην εικόνα 6.30 παρουσιάζεται η κατάσταση του εναζωτωμένου στρώματος στην περιοχή της κρούσης. Το βάθος του ξεφλουδίσματος φτάνει περίπου τα 200 μm . Επομένως, η αποκόλληση που έχει προκύψει δεν ξεπερνάει τη ζώνη διαχύσεως. Εξαιτίας της κρούσης, ακριβώς κάτω από την περιοχή του ξεφλουδίσματος παρατηρείται μία διαμορφωμένη ζώνη παραμόρφωσης.

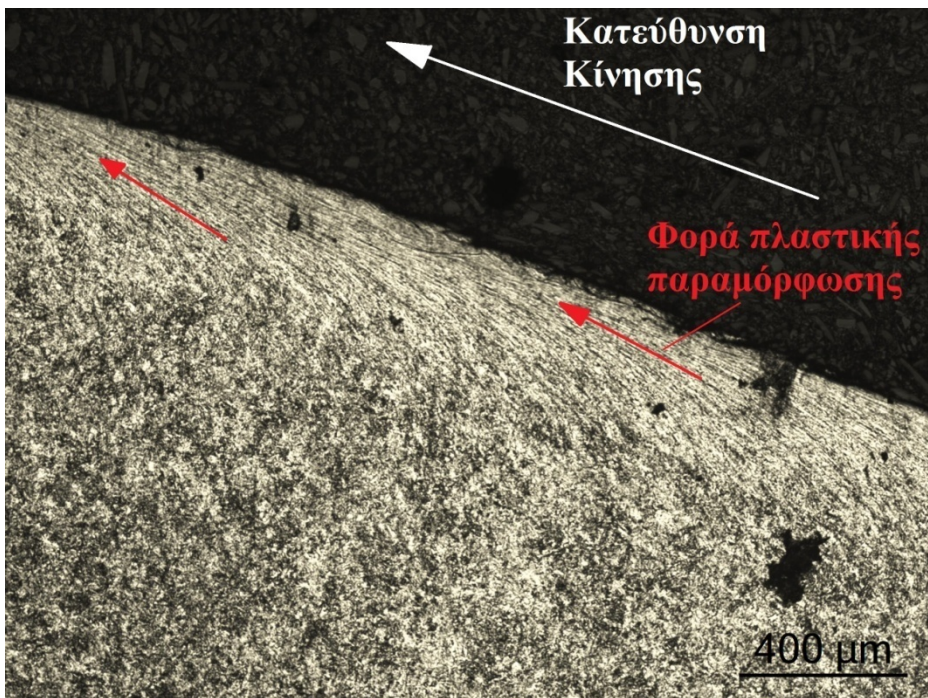


Εικόνα 6.30: Η κατάσταση του εναζωμένου στρώματος στην περιοχή της κρούσης (δοκίμιο Δ1).

Στην εικόνα 6.31 παρουσιάζεται η κατάσταση του εναζωμένου στρώματος στο σημείο που ολοκληρώνεται η περιοχή της κρούσης και αρχίζει η περιοχή της ολίσθησης. Στην εικόνα 6.32 παρουσιάζεται η κατάσταση του εναζωμένου στρώματος κατά μήκος της περιοχής της ολίσθησης. Γίνεται αντιληπτό ότι το στρώμα της εναζώτωσης έχει αποκολληθεί πλήρως σε αυτήν την περιοχή, αφήνοντας εκτεθειμένο το μη εμποτισμένο υλικό. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από πλαστική παραμόρφωση και από φθορά λόγω εκτριβής.



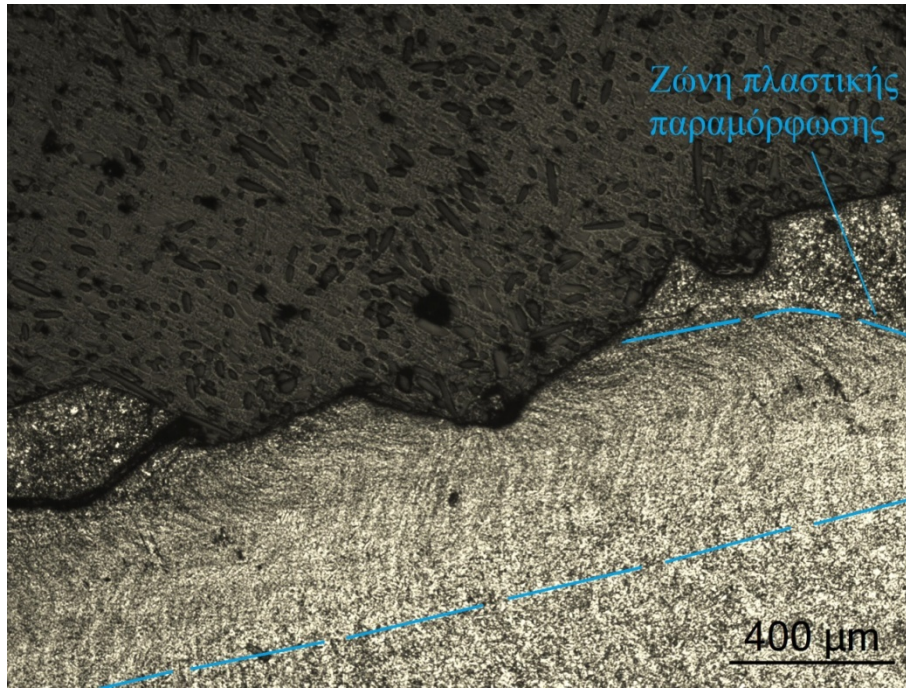
Εικόνα 6.31: Το σημείο έναρξης της περιοχής ολίσθησεως (50x, δοκίμιο Δ6).



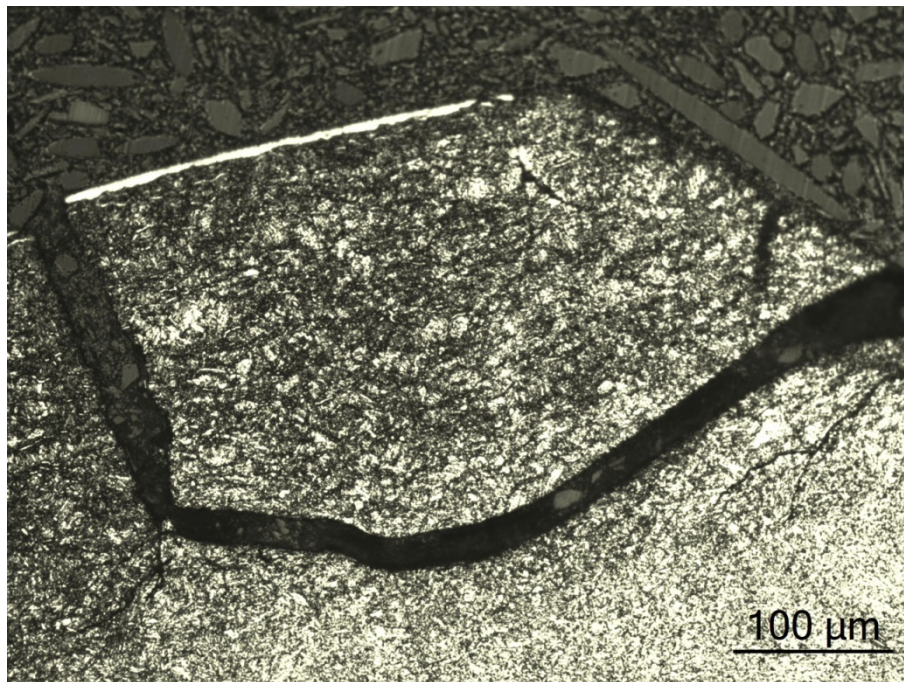
Εικόνα 6.32: Το πλήρως αποκολλημένο στρώμα εναζώτωσης στην περιοχή ολίσθησης (50x, δοκίμιο Δ6).

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η κατάσταση του εναζωτωμένου στρώματος στην περιοχή της μετάβασης. Για την μελέτη αυτής της περιοχής παρουσιάζονται δύο καταστάσεις, μία με αποκόλληση υλικού και μία χωρίς αποκόλληση. Η εικόνα 6.33 αναφέρεται στην περιοχή μετάβασης του δοκιμίου Δ1, όπου το βάθος της παρουσιαζόμενης αποκόλλησης ξεπερνάει το βάθος του

εναζωτωμένου στρώματος. Στην περιοχή κάτω από την αποκόλληση διακρίνεται και πάλι μία ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης, της οποίας όμως η φορά είναι ανομοιογενής. Στην εικόνα 6.34 διακρίνεται το έτοιμο προς αποκόλληση τμήμα του εναζωτωμένου στρώματος, εξαιτίας της συνένωσης των ρηγματώσεων.

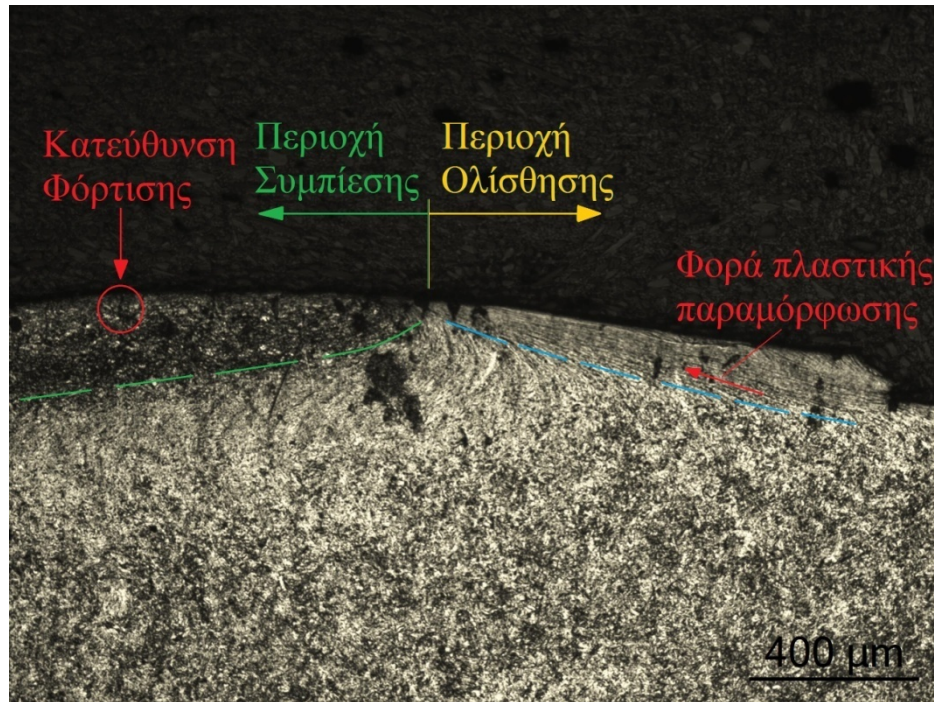


Εικόνα 6.33: Ανομοιογενής πλαστική παραμόρφωση στην μεταβατική περιοχή (50x, δοκίμιο Δ1).



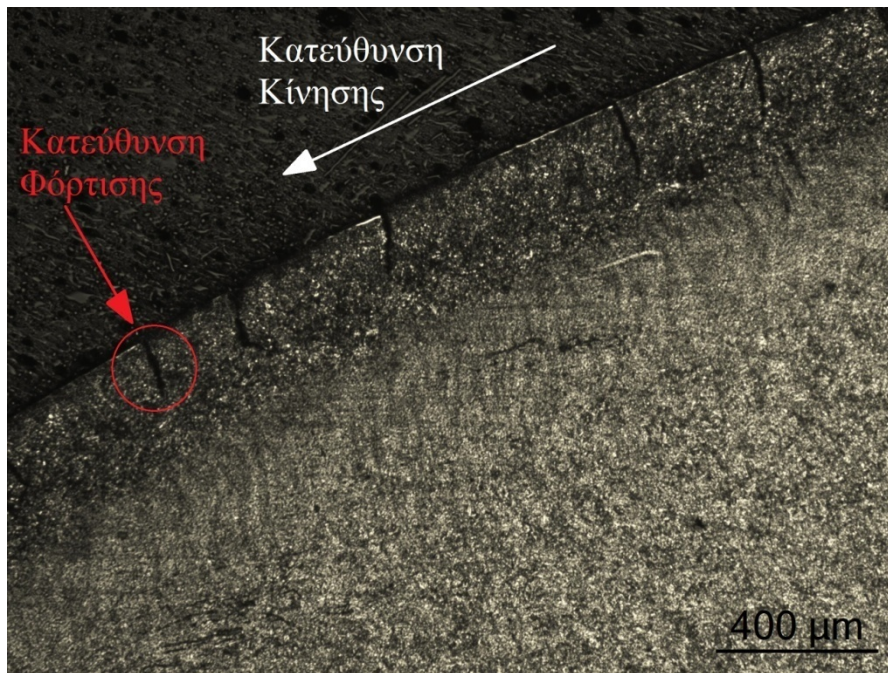
Εικόνα 6.34: Συνένωση ρηγματώσεων στην μεταβατική περιοχή (200x, δοκίμιο Δ1).

Η εικόνα 6.35 παρουσιάζει την περιοχή μετάβασης του δοκιμίου Δ6. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, η περιοχή αυτή δεν χαρακτηρίζεται από την απομάκρυνση τμήματος υλικού. Η περιοχή αυτή, όπως ορθά διαπιστώθηκε και προηγουμένως αποτελεί μία σύνθετη περιοχή καταπόνησης, στην οποία συγκεντρώνονται μεγάλης πυκνότητας και μέτρου εφαρμοζόμενες θλιπτικές τάσεις.

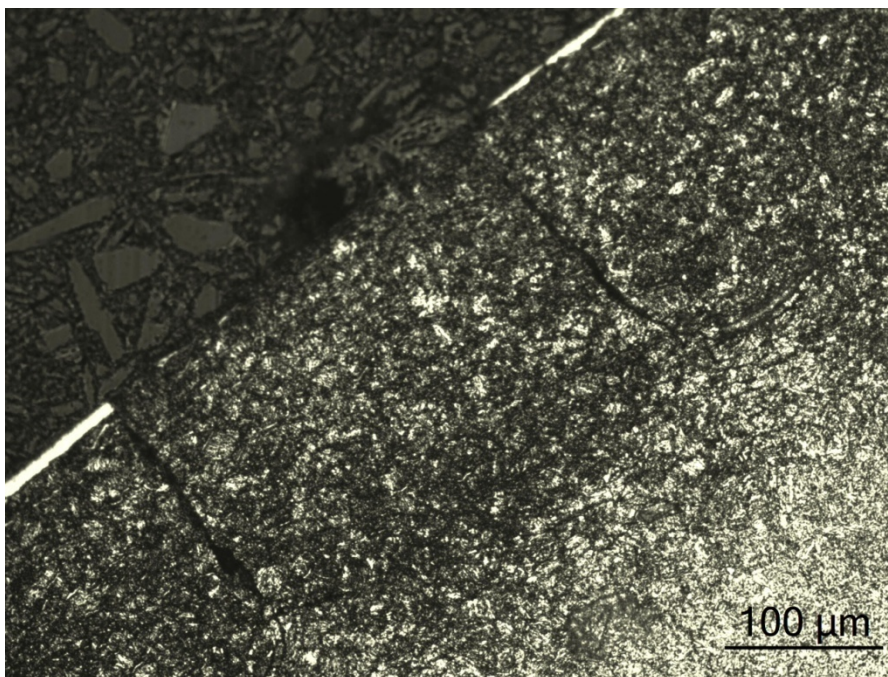


Εικόνα 6.35: Επίκεντρο μεταβατικής περιοχής (50x, δοκίμιο Δ6).

Στην εικόνα 6.36 παρουσιάζεται η κατάσταση του εναζωτωμένου στρώματος στην περιοχή της συμπίεσης. Σε αυτή την περιοχή εκτός από την πυκνότητα των ρηγματώσεων, διακρίνεται η σχεδόν ολοκληρωτική αποκόλληση της λευκής ζώνης. Λαμβανομένου υπόψιν της απολέπισης (spalling 20-100μm) του επιφανειακού στρώματος που παρατηρήθηκε κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο και της αποκόλλησης της λευκής ζώνης ενδιάμεσα των δύο ρηγματώσεων στην εικόνα 6.37, γίνεται αντιληπτό ότι η απολέπιση που διακρίνεται με την χρήση του στερεοσκοπίου αφορά την απομάκρυνση της λευκής ζώνης.

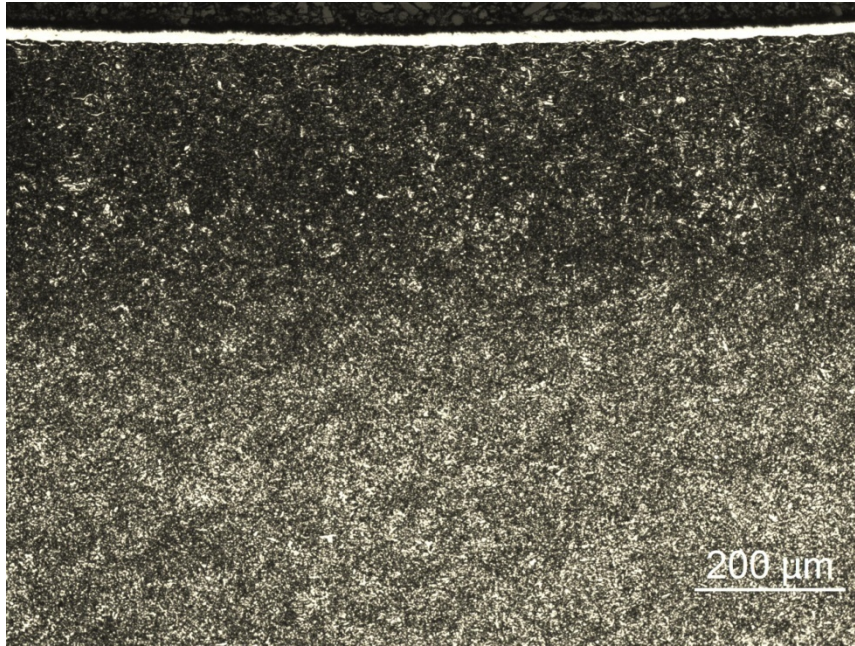


Εικόνα 6.36: Πυκνότητα ρηγματώσεων στην περιοχή της συμπίεσης (50x, δοκίμιο Δ1).



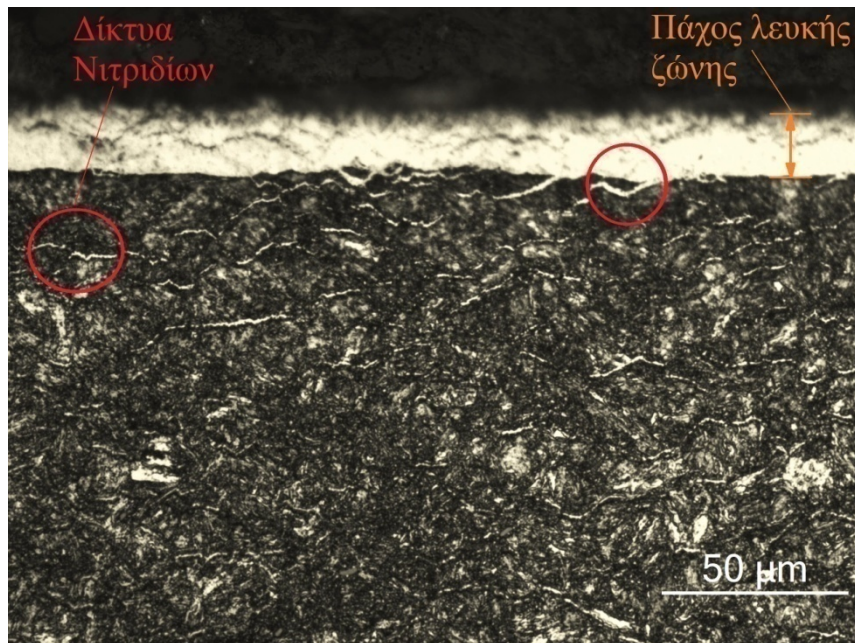
Εικόνα 6.37: Αποκόλληση της λευκής ζώνης στην περιοχή της συμπίεσης (200x, δοκίμιο Δ1).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατάσταση του εναζωτωμένου στρώματος στην μη καταπονημένη περιοχή του δοκιμίου E6-7 (Εικόνα 6.38). Στην περιοχή των οδοντώσεων το μη καταπονημένο στρώμα εναζώτωσης εντοπίζονται στην έναρξη και στο πέρας του κάθε δοντιού, δηλαδή, λίγο πριν από την περιοχή της κρούσης και λίγο μετά την περιοχή της συμπίεσης. Σε αυτές τις περιοχές και υπό μεγέθυνση 100x δεν διακρίνεται κάποια ανωμαλία στο εναζωτωμένο στρώμα.



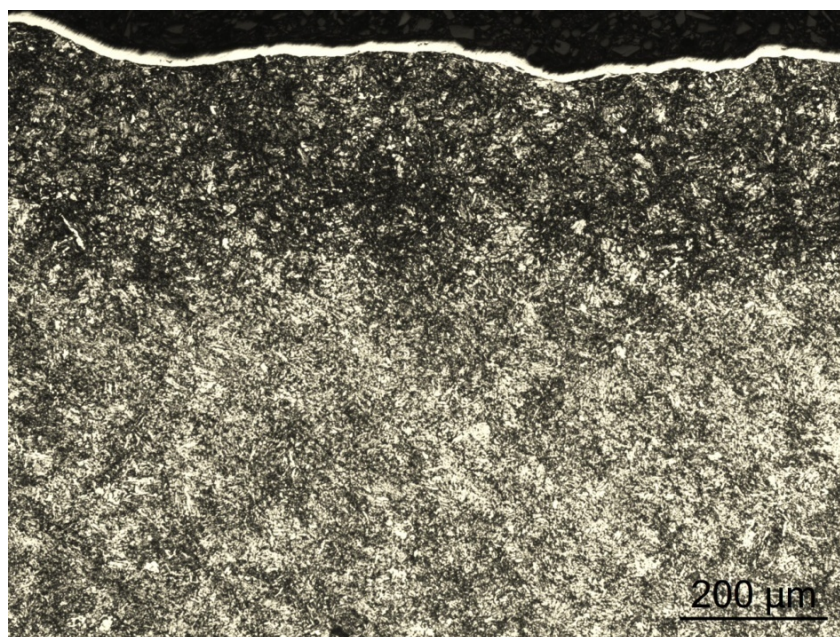
Εικόνα 6.38: Μη καταπονημένη περιοχή της εγκοπής, προφίλ μικροσκληρομέτρησης I (100x, δοκίμιο E6-7).

Στις κάτωθι εικόνες ελέγχεται η μικροδομή του εναζωτωμένου στρώματος. Αυξάνοντας τη μεγέθυνση στην 500x είναι πλέον δυνατή η προσέγγιση του πάχους της λευκής ζώνης. Με βάση την κλίμακα του μικροσκοπίου, το βάθος της λευκής ζώνης υπολογίζεται περίπου στα 17 μm. Σε αυτό το στάδιο μεγέθυνσης γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη δικτύων από νιτρίδια (Εικόνα 6.39).

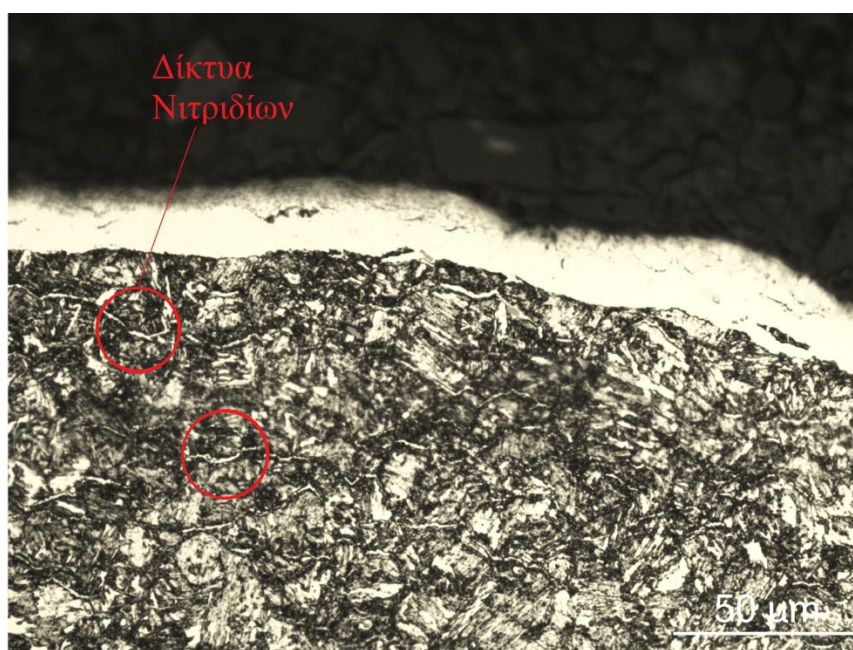


Εικόνα 6.39: Ύπαρξη δικτύων από νιτρίδια, περιοχή εγκοπής (500x, δοκίμιο E6-7).

Η κατάσταση του μη καταπονημένου εναζωτωμένου στρώματος εξετάστηκε και από την πλευρά της πλήμνης. Η επιφάνεια αυτή χαρακτηρίζεται από ανομοιομορφία (μη φινιρισμένη επιφάνεια), η οποία οφείλεται στην ύπαρξη των εκδορών από την μηχανουργική κατεργασία, που εντοπίστηκαν κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο (Εικόνα 6.40). Αυξάνοντας την μεγέθυνση στην 500x γίνεται και πάλι αντιληπτή η ύπαρξη δικτυωμάτων από νιτρίδια (Εικόνα 6.41).

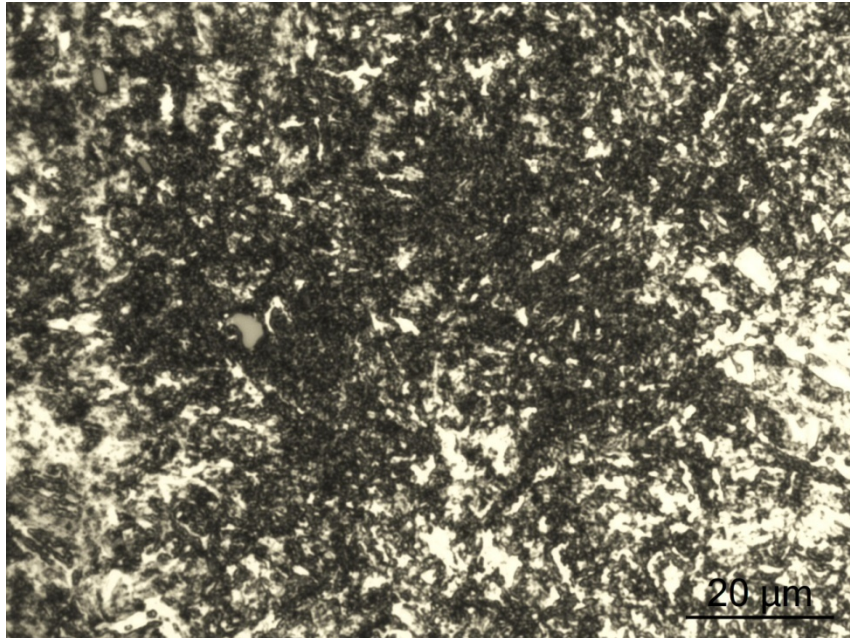


Εικόνα 6.40: Μη καταπονημένο εναζωτωμένο στρώμα στη περιοχή της πλήμνης (100x, δοκίμιο E6-7).



Εικόνα 6.41: Ύπαρξη δικτύων από νιτρίδια, περιοχή πλήμνης (500x, δοκίμιο E6-7).

Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 6.42), σε μεγέθυνση 1000x παρουσιάζεται η μικροδομή του υλικού βάσης του εξαρτήματος. Παρατηρώντας την μικροδομή του μη εμποτισμένου με άζωτο πυρήνα του υλικού, διακρίνεται η χαρακτηριστική δομή του επαναφερμένου μαρτενσίτη.



Εικόνα 6.42: Μικροδομή του υλικού βάσης (1000x, δοκίμιο Δ9).

6.6 Συμπεράσματα μικροσκοπικού ελέγχου

Μικροσκληρομέτρηση

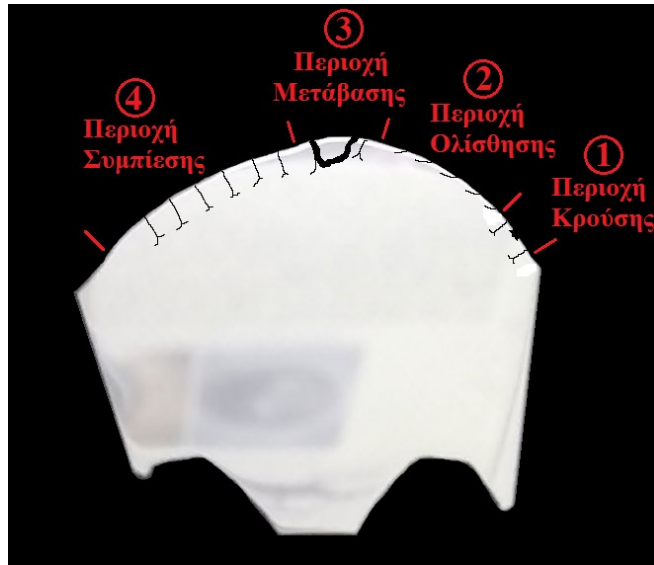
Σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN 10085 η σκληρότητα επιφανείας του ελαφρά κραματωμένου χάλυβα 31CrMoV9 (1.8519) αναμένεται να αγγίζει τα 800HV. Επομένως, η μέγιστη σκληρότητα επιφανείας 750HV που εντοπίστηκε στα δοκίμια ελέγχου θεωρείται φυσιολογική [76].

Η ζώνη διαχύσεως του εξαρτήματος εκτείνεται περίπου έως τα 320μm. Το βάθος αυτό θεωρείται ικανοποιητικό για μία επιτυχημένη διεργασία εναζώτωσης (χρόνος παραμονής 8h), διότι δεν είναι ούτε πολύ επιφανειακό ούτε ξεπερνάει το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εναζώτωσης του 1mm [3]. Παράλληλα, η ομοιόμορφη κατανομή της σκληρότητας που παρατηρείται υποδεικνύει την ομαλή μετάβαση των επιπέδων σκληρότητας από την επιφάνεια προς τον πυρήνα του εξαρτήματος.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, τα επίπεδα σκληρότητας σε επιφάνεια και σε καρδιά, το βάθος και η κατανομή της σκληρότητας, τεκμηριώνουν την επιτυχημένη διεξαγωγή της διεργασίας της εναζωτώσεως του εξαρτήματος. Αυτό οδηγεί στην απόκλιση της θερμοχημικής διεργασίας από τα αίτια της αστοχίας.

Οπτική μικροσκοπία

Από την ολοκλήρωση της διαδικασίας της οπτικής μικροσκοπίας τεκμηριώνεται η μορφολογία και το είδος της καταπόνησης σε κάθε περιοχή φθοράς (Εικόνα 6.43). Η περιοχή της κρούσης χαρακτηρίζεται από αποκολλήσεις υλικού τύπου flaking, οι οποίες προκύπτουν από την σχετική κίνηση (κρούση) των δύο οδοντωτών τροχών κατά την αρχή της σύμπλεξης. Σε αυτή την περιοχή ασκούνται ορθές τάσεις. Η περιοχή ολίσθησης χαρακτηρίζεται από πλαστική παραμόρφωση και από έντονη φθορά εκτριβής. Σε αυτή την περιοχή ασκούνται διατμητικές τάσεις. Η περιοχή μετάβασης χαρακτηρίζεται από αποκολλήσεις υλικού, ως αποτέλεσμα της συνένωσης των ρηγματώσεων και από ανομοιογενή πλαστική παραμόρφωση. Σε αυτή την περιοχή ασκούνται διατμητικές και ορθές τάσεις. Η περιοχή συμπίεσης χαρακτηρίζεται από πυκνότητα ρηγματώσεων και από την αποκόλληση της λευκής ζώνης. Σε αυτή την περιοχή ασκούνται ορθές τάσεις.



Εικόνα 6.43: Αναπαράσταση της καταπονημένης μορφολογίας των περιοχών φθοράς.

Όσον αφορά την κατάσταση του εναζωτωμένου στρώματος, μπορεί το πάχος της λευκής ζώνης ($d < 25\mu\text{m}$), το βάθος της ζώνης διαχύσεως ($d < 1\text{mm}$) και η μικροδομή του εναζωτωμένου στρώματος να κρίνονται αποδεκτά, ωστόσο, η ύπαρξη των δικτύων του νιτριδίου προσδίδει στην επιφάνεια ιδιαίτερα ψαθυρό χαρακτήρα. Τα δίκτυα είναι ιδιαίτερα ψαθυρά, διότι αποτελούν υπερκορεσμένες περιοχές σε άζωτο. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, ότι η υψηλή ψαθυρότητα του εναζωτωμένου στρώματος οφείλεται στην ύπαρξη των δικτυωμάτων των νιτριδίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα εργασία αφορά την ανάλυση αστοχίας οδοντωτού στροφείου υδραυλικού περιστροφέα, μέρους μηχανημάτων ανύψωσης. Πραγματοποιήθηκαν μακροσκοπικοί (οπτική επιθεώρηση, στερεοσκοπία), μικροσκοπικοί (οπτική μικροσκοπία), μη καταστροφικοί (χημική ανάλυση) και καταστροφικοί (μικροσκληρομετρήσεις) έλεγχοι.

Κατά την οπτική επιθεώρηση και τη χρήση στερεοσκοπίου στην κατατομή των δοντιών, παρατηρήθηκαν τέσσερις (4) διακριτές περιοχές: η περιοχή της κρούσης, η περιοχή της ολίσθησης, η περιοχή της μετάβασης και η περιοχή της συμπίεσης.

Μέσω της οπτικής μικροσκοπίας εντοπίστηκε η κύρια φόρτιση σε κάθε μία περιοχή, αλλά και τα αποτελέσματά της σε μικροσκοπικό επίπεδο (Πίνακας 7.1).

Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα μικροσκοπικής ανάλυσης.

Περιοχή Κρούσης		Περιοχή Ολίσθησης	
Κύρια Φόρτιση	Τρόπος Αστοχίας	Κύρια Φόρτιση	Τρόπος Αστοχίας
Ορθές τάσεις	Ξεφλούδισμα	Διατμητικές τάσεις	Πλαστική παραμόρφωση
	Ρηγματώσεις		
	Πλαστική παραμόρφωση		
Περιοχή Μετάβασης		Περιοχή Συμπίεσης	
Κύρια Φόρτιση	Τρόπος Αστοχίας	Κύρια Φόρτιση	Τρόπος Αστοχίας
Συνδυασμένη τάση	Ξεφλούδισμα	Ορθές τάσεις	Ρηγματώσεις
	Ρηγματώσεις		
	Πλαστική παραμόρφωση		

Οι ρηγματώσεις και οι πλαστικές παραμορφώσεις που παρουσιάζονται σχεδόν σε όλες τις περιοχές υποδεικνύουν την ψαθυρότητα του στρώματος της εναζώτωσης, αλλά και ταυτόχρονα την κακή σύμπλεξη του ρότορα με το ενδιάμεσο οδοντωτό δαχτυλίδι. Η κύρια αιτία της αστοχίας θα πρέπει να αναζητηθεί είτε ως προς την καταλληλότητα και φύση του στρώματος είτε ως προς τη σύμπλεξη των δύο εξαρτημάτων.

Με βάση τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης και της οπτικής μικροσκοπίας, η διαδικασία της εναζώτωσης διενεργήθηκε φυσιολογικά με βάση το βάθος και τη σκληρότητα του στρώματος.

Η χημική ανάλυση ταυτοποίησε το υλικό με αυτό που έχει δηλώσει ότι χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής. Λαμβανομένου υπόψιν την μη ύπαρξη άλλων αστοχιών, το υλικό κρίνεται αποδεκτό.

Κατά τον οπτικό έλεγχο αλλά και κατά την οπτική μικροσκοπία διαπιστώθηκε πολύ κακή επιφάνεια μετά την μηχανουργική κατεργασία της πλήμνης του ρότορα. Αυτή η ποιότητα επιφανείας δυσχεραίνει την σύμπλεξη ατράκτου - ρότορα, επηρεάζοντας τις ανοχές λειτουργίας μεταξύ των δύο οδοντωτών τροχών. Εξαιτίας των πολύ κλειστών ανοχών του συστήματος, η διαστασιακή ανοχή που δημιουργείται οδηγεί σε συνολικά λανθασμένα σημεία επαφής μεταξύ των δύο εξαρτημάτων καθ' όλη την επιφάνεια σύμπλεξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πλαστικών παραμορφώσεων και αποκολλήσεων υλικού.

Προτείνεται η προσθήκη στο φασεολόγιο κατασκευής του ρότορα, φάσεων φινιρίσματος και στην περιοχή της πλήμνης. Θα πρέπει να δοθεί πολύ μεγάλη σημασία στις ανοχές μεταξύ πλήμνης και άξονα, ώστε να εξασφαλιστεί μια σύμπλεξη χωρίς τη δυνατότητα έστω και μικρής σχετικής κίνησης μεταξύ τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π1 Οργανισμοί τυποποίησης και ελέγχου ποιότητας

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π1.1) παρουσιάζονται ορισμένοι από τους οργανισμούς τυποποίησης και ελέγχου ποιότητας που υπάρχουν ανά τον κόσμο, σε συνδυασμό με τα προθέματα των προτύπων που χρησιμοποιούνται και ασχολούνται με την κατηγοριοποίηση των χαλύβων και των κραμάτων τους.

Πίνακας Π1.1: Οργανισμοί τυποποίησης και τα αντίστοιχα προθέματα των επιμέρους προτύπων τους [78].

Χώρα	Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης και Ποιοτικού Ελέγχου	Προθέματα Προτύπων	Παραδείγματα Ονομασιών Προτύπων
Αργεντινή	Instituto Argentino de Normalization y Certification - IRAM	IRAM, COPANT, IAS	IRAM W210, IRAM 12 L
Αυστραλία	Standards Australia - SA (παλιό), SA (νέο)	AS, AS/NZS	AS 1446 X1320H, AS/NZS 1594 HK10B55
Αυστρία	Osterreichisches Normungsinstitut - ON (Austrian Standard Institute)	ONORM, ONORMEN	ONORM M3108
Βέλγιο	Institut Belge de Normalisation - IBN (Belgian Standardization Institute - BIN)	BE, NBN	NBN 253-06
Βουλγαρία	Bulgarian Institute for Standardization - BDS	BDS	BDS 9801
Γαλλία	Accociation Francaise de Normalization - AFNOR	AFNOR	AFNOR NF A36-205/2
Γερμανία	Deutsches Institut fur Normung - DIN	DIN, DIN EN, TGL	DIN EN 10025, TGL 39672
Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής	American Society for Testing and Materials - ASTM	ASTM	ASTM A534 (2004)
	SAE, International (Society of Automotive Engineers) - SAE	AMS, SAE	AMS 5501, SAE J125
	Steel Founders' Society of America - SFSA	CF, CB, CA	CF-3MA
	Unified numbering system - UNS	UNS	UNS S38
Ηνωμένο Βασίλειο της Μεγάλης Βρετανίας	British Standard Institution - BSI	BS EN	BS 970/1 (1983), BS EN 10139 (2005)
Ιαπωνία	Japanese Industrial Standards Committee - JISC	JIS	JIS E5402-1 (1998)

Ινδία	Bureau of Indian Standards - BIS	IS	IS 1570/2/1 (2004)
Ιταλία	Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI	UNI	UNI 5598
Ισπανία	Asociacion Espanola de Normalisation - AENOR	UNE-EN, PNE-preEN	UNE 36015 (1960)
Καναδάς	CSA International - CSA	CSA	CSA G40.21 (1998)
Κίνα	Standardization Administration of China - SAC	GB, JB, YB	GB 4357 (1987)
Κορέα (Νότια)	Korean Standards Association - KS	KS D	KS D 3698 (2001)
Μεξικό	Dirección General de Normas - DGN	NMX, NOM	NMX-B-301
Νορβηγία	Norges Stadardiseringsforbund - NSF	NS	NS13101
Ολλανδία	Nederlands Normalisatie Instituut - NEN	NEN	NEN 6002-C GSmp55
Ουγγαρία	Magyar Szabvanyugyi Testulet - MSZT	MSZ, MSZ ISO, MSZ EN	MSZ 4213 (1985)
Πολωνία	Polski Komitet Normalizacyjny - PKN (Polish Committee for Standardization)	PN-H	PN-H-84032
Ρουμανία	Romanian Standards Association - ASRO	STAS	STAS 795 (1992)
Ρωσία	Euro-Asian Council for Standardization - GOST	GOST	GOST 1050 (1974)
Σουηδία	Swedish Standards Institute - SIS	SIS, SS	SS141770, SIS 141142 (1975)
Τουρκία	Turkish Standards Institution - TSE	TS	TS 924 (1971)
Τσεχία	Cesky Normalizacni Institute - CNI (Czech Standards Institute)	CSN	CSN 416343
Φινλανδία	Suomen Standardisoimisliito - SFS	SFS	SFS 600 (1981)
Ευρωπαϊκή Ένωση	Comité européen de normalisation- CEN	EN	EN 10027
Παγκόσμια Κοινότητα	International Organization for Standardization - ISO	ISO	ISO 16120-4 (2004)

Π2 Πρόσθετα σύμβολα για προϊόντα χάλυβα κατά EN

Πίνακας Π2.1: Πρόσθετα σύμβολα για χάλυβες ειδικών απαιτήσεων [43, Πίνακας:, σελ. 118].

Πρόσθετα Σύμβολα	Ερμηνεία Συμβόλων
+C	Χάλυβας χονδρόκοκκος
+F	Χάλυβας λεπτόκοκκος
+H	Με ειδική σκληρότητα
+Z ₁₅	Ελάχιστη συστολή θραύσης κάθετα στην επιφάνεια 15%
+Z ₂₅	Ελάχιστη συστολή θραύσης κάθετα στην επιφάνεια 25%
+Z ₃₅	Ελάχιστη συστολή θραύσης κάθετα στην επιφάνεια 35%

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 118, Πίνακας Α



Πίνακας Π2.2: Πρόσθετα σύμβολα για χάλυβες, ως προς την κατάσταση επεξεργασίας τους [43, Πίνακας:, σελ. 118].

Πρόσθετα Σύμβολα	Ερμηνεία Συμβόλων
+A	Ανοπτημένος μαλακός
+AC	Ανοπτημένος για την επίτευξη σφαιρικών καρβιδίων
+AT	Ανοπτημένος με διάλυμα
+C	Σκληρυμένος εν ψυχρώ
+C _{nnn}	Σκληρυμένος εν ψυχρώ σε ελάχιστη αντοχή εφελκυσμού nnn (N/mm ²)
+CR	Ελασμένος εν ψυχρώ
+HC	Θερμό-ψυχρό-μορφοποιημένο
+LC	Με ελαφρύ ψυχρή τελική έλαση ή ολκή
+M	Θερμομηχανικά διαμορφωμένος
+N	Εξομαλυμένος ή διαμορφωμένος εξομαλυμένος
+NT	Εξομαλυμένος και επαναφερμένος
+Q	Βαφή (σκλήρυνση)
+QA	Βαφή στον αέρα
+QO	Βαφή στο λάδι
+QT	Επιβελτιωμένο (επαναφορά)
+QW	Βαφή στο νερό
+S	Κατεργασμένος για διάτμηση εν ψυχρώ
+SR	Με αποτατική ανόπτηση
+T	Επαναφερμένος
+U	Ακατέργαστο

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 116, Πίνακας Β



Πίνακας Π2.3: Πρόσθετα σύμβολα για χάλυβες, ως προς το είδος της επιμετάλλωσης τους [43, Πίνακας:, σελ. 118].

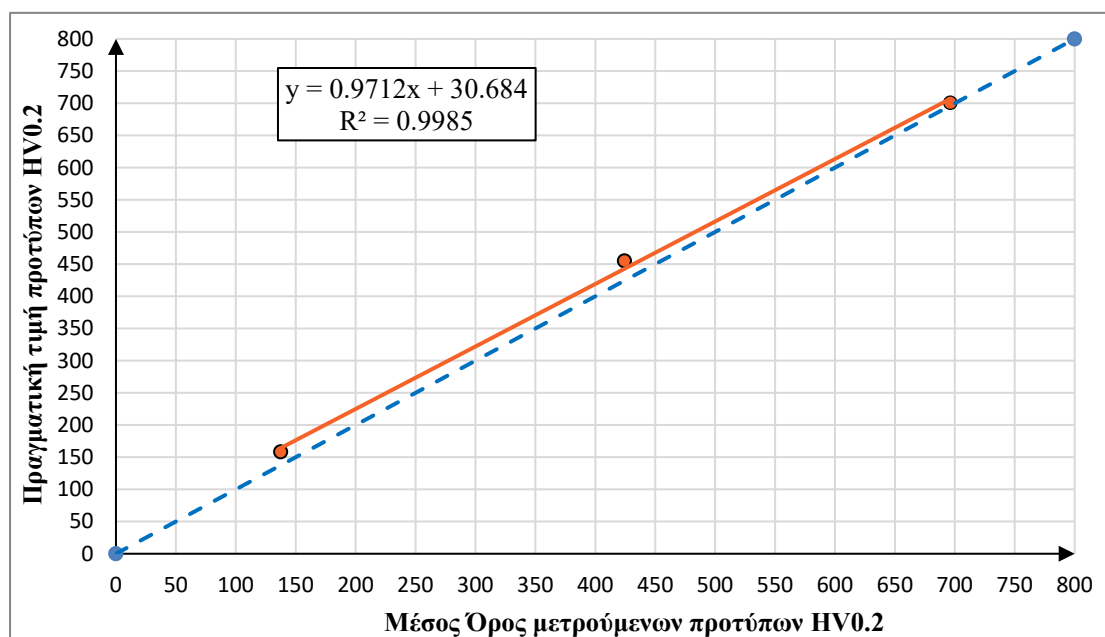
Πρόσθετα Σύμβολα	Ερμηνεία Συμβόλων
+A	Αλουμίνιο με φωτιά
+AR	Επιμετάλλωση με κυλίνδριση αλουμινίου
+AS	Επενδεδυμένο με κράμα Al-Si
+AZ	Επενδεδυμένο με κράμα Al-Zn
+CE	Ηλεκτρολυτική ειδική επιχρωμίωση
+CU	Επένδυση χαλκού
+IC	Ανόργανη επικάλυψη
+OC	Οργανική επικάλυψη (επίστρωμα σπειρών)
+S	Επικασσιτερωμένο με φωτιά
+SE	Ηλεκτρολυτικά επικασσιτερωμένο
+T	Εξευγενισμός με βύθιση σε τήγμα με κράμα Pb-Sn
+TE	Ηλεκτρολυτικά με επικάλυψη κράματος Pb-Sn
+Z	Επιψευδαργυρωμένο με φωτιά
+ZA	Επικάλυψη με κράμα Zn-Al
+ZE	Ηλεκτρολυτικά επιψευδαργυρωμένο
+ZF	Επιψευδαργύρωση με γαλβανική απόπτωση
+ZN	Επικάλυψη με κράμα Zn-Ni

© ΙΩΝ/ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ - Γ. & Σ. ΠΑΡΙΚΟΥ & ΣΙΑ Ε.Ε., Τεχνική Ατζέντα ΒΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 1η Ελληνική Έκδοση, Σελίδα: 118, Πίνακας C



Π3 Καμπύλη διόρθωσης μικροσκληρομέτρου

Η παρακάτω καμπύλη προκύπτει από την έμμεση επαλήθευση του μικροσκληρομέτρου (Εικόνα 6.4), που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας του Δραγάση Α., (2019), Επιρροή της ενανθράκωσης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα DIN 15CrNi6 [79].



Εικόνα Π3.1: Καμπύλη βαθμονόμησης του μικροσκληρομέτρου Shimadzu.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Συλλογικό έργο, (1986), ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention, 9^η Έκδοση, Εκδόσεις ASM International, Ohio
- [2] Callister W., (2015), Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- [3] Χαϊδεμενόπουλος Γ., (2020), Φυσική Μεταλλουργία, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- [4] Γαλιώτης Κ., (2016), Β2. Μηχανικές Ιδιότητες Μεταλλικών, Κεραμικών και Πολυμερών Υλικών, <https://docplayer.gr/41554632-Mihaniki-ton-ylikon-2016.html> (ημερομηνία προσπέλασης 2 Ιουνίου 2020)
- [5] Παπαγεωργίου Δ., Συζήτηση: Οι Τύποι Αστοχίας
- [6] Φουντουκίδης Ε., (2009), Εργαστηριακές Ασκήσεις Χημικής και Περιβαλλοντικής Τεχνολογίας, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Πουκαμισάς
- [7] Συλλογικό έργο, (1992), ASM Handbook Volume 18: Friction Lubrication and Wear Technology, Εκδόσεις ASM International, Ohio
- [8] Bayer R., (2001), Wear Analysis for Engineers, Εκδόσεις HNB, New York
- [9] Ding Y. & Rieger N., (2003), Spalling Formation Mechanism for Gears, https://www.researchgate.net/publication/222191455_Spalling_formation_mechanism_for_gears (ημερομηνία προσπέλασης 19 Μαρτίου 2020)
- [10] Zaretsky E., (2012), How to Determine Bearing System Life, <https://www.machinerylubrication.com/Read/29228/bearing-system-life> (ημερομηνία προσπέλασης 1 Αυγούστου 2020)
- [11] Χρυσουλάκης Γ. & Παντελής Δ., (2008), Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
- [12] Aero Marine Interior, INC., NDT, <https://aeromarineinterior.com/non-destructive-testing/> (ημερομηνία προσπέλασης 4 Αυγούστου 2020)
- [13] Mistras Group, Magnetic Particle (MT) Inspection Services, <https://www.mistrasgroup.com/how-we-help/field-inspections/traditional-ndt/magnetic-particle/> (ημερομηνία προσπέλασης 4 Αυγούστου 2020) & Wanders, Magnetpulverprüfung MT, <http://www.wanders-tqs.de/magnetpulverpruefung-mt.html> (ημερομηνία προσπέλασης 4 Αυγούστου 2020)

- [14] Lingtec Co., Fluorescent Penetrant Testing (FPI), <https://lingtec.co/dye-penetrant-testing/fluorescent-penetrant-testing-fpi/> (ημερομηνία προσπέλασης 4 Αυγούστου 2020)
- [15] Pye D., (2016), Troubleshooting the Nitriding Process, <https://www.industrialheating.com/articles/92993-troubleshooting-the-nitriding-process> (ημερομηνία προσπέλασης 4 Αυγούστου 2020)
- [16] Pye D., (2016), Troubleshooting the Nitriding Process (part 2), <https://www.industrialheating.com/articles/93138-troubleshooting-the-nitriding-process-part-2> (ημερομηνία προσπέλασης 4 Αυγούστου 2020)
- [17] Ptable, <https://www.ptable.com/?lang=el> (ημερομηνία προσπέλασης 10 Ιανουαρίου 2020)
- [18] Fischer U., (Αυγερινός Ι. & Ψαλίδα Π., μετάφραση), (2010), Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών, 2^η Έκδοση, Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις
- [19] Μπεάζη - Κατσιώτη Μ., (2015), Κεφάλαιο 3 : Κρυσταλλογραφία, <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3474> (ημερομηνία προσπέλασης 10 Ιανουαρίου 2020)
- [20] Τριανταφυλλίδης Γ., (2016), Μεταλλογνωσία, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- [21] OLYMPUS Co.: GX53 Inverted Microscope – Metallurgy Inspection Process, <https://www.olympusims.com/en/resources/slideshare/infographic-gx53-inverted-microscope-metallurgy-inspection-process/> (ημερομηνία προσπέλασης 14 Ιανουαρίου 2020) & Struers Co.: Metallic Grain Structures and Their Microscopic Analysis, Εικόνα 11, <https://www.struers.com/en/Knowledge/Materials/Metallic-grain-structures#preparation> (ημερομηνία προσπέλασης 14 Ιανουαρίου 2020)
- [22] Askeland D. & Fulay P., (2008), Essential of Materials Science and Engineering, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Cengage Learning, USA
- [23] Callister W. & Rethwisch D., (2007), Materials Science and Engineering an Introduction, 7^η Έκδοση, Εκδόσεις John Wiley & Sons Inc, USA
- [24] Girao H., (2018), Pressure – Induced Disorder in Bulk and Nanometric SnO₂, https://www.researchgate.net/publication/330823450_Pressure-induced_disorder_in_bulk_and_nanometric_SnO2 (ημερομηνία προσπέλασης 14 Ιανουαρίου 2019) &

- TecScience, Determination of Microstructure and Phase Fractions, <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/eisen-kohlenstoff-diagramm/bestimmung-der-gefugeanteile-und-phasenanteile/> (ημερομηνία προσπέλασης 14 Ιανουαρίου 2019)
- [25] Σουρελής Ι., (1997), Θερμικές Κατεργασίες Μετάλλων, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα
- [26] Μέντρεα Κ., (2016), Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος «Ελεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών», 7^η Έκδοση
- [27] Dorrenberg Edelstahl GmbH, Datasheet 1.8519, http://www.doerrenberg.com.sg/fileadmin/template/doerrenberg/stahl/DatenblaetterEng/1.8519_en.pdf (ημερομηνία προσπέλασης 19 Μαρτίου 2020)
- [28] Maschinenbau-Wissen.de, Oberflächenhärten - Laserstrahlhärten, <http://www.maschinenbauwissen.de/skript3/werkstofftechnik/behandlung/372-laserstrahlhaerten> (ημερομηνία προσπέλασης 19 Μαρτίου 2020)
- [29] Συλλογικό έργο, (2017), Advances in Science and Technology Research Journal: Low Pressure Carburizing in a Large - Chamber Device for High - Performance and Precision Thermal Treatment of Parts of Mechanical Gear, <http://www.astrj.com/Low-pressure-carburizing-in-a-large-chamber-device-for-high-performance-and-precision-thermal-treatment-of-parts-of-mechanical-gear,67676,0,2.html> (ημερομηνία προσπέλασης 19 Μαρτίου 2020)
- [30] Eurolls S.p.a., Nitriding Heat Treatments, https://www.eurolls.com/advanced-technologies/public/download/EUROLLS-NITRIDING_HEAT_TREATMENT.pdf (ημερομηνία προσπέλασης 2 Φεβρουαρίου 2020)
- [31] Συλλογικό έργο, (1991), ASM Handbook Volume 4: Heat Treating, Εκδόσεις ASM International, Ohio
- [32] Pye D., (2003), Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, Εκδόσεις ASM International
- [33] Pye D., (2013), Nitride Networking, <https://www.industrialheating.com/blogs/14-industrial-heating-experts-speak-blog/post/90865-nitride-networking> (ημερομηνία προσπέλασης 15 Μαρτίου 2020)

- [34] Pye D., Nitriding, Process Methods and Metallurgy, <https://themonty.com/nitriding-process-methods-and-metallurgy/> (ημερομηνία προσπέλασης 22 Φεβρουαρίου 2020)
- [35] University of Miskolc North Hungarian Regional Distance Education Center, Nitriding, http://193.6.1.183/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/nitriding_introduction.htm (ημερομηνία προσπέλασης 19 Φεβρουαρίου 2020)
- [36] Herring D., (2020), An Overview of Nitriding - Technology and Tribological Benefits, <https://www.industrialheating.com/articles/95516-an-overview-of-nitriding---technology-and-tribological-benefits> (ημερομηνία προσπέλασης 6 Μαρτίου 2020)
- [37] Deutsche Edelstahlwerke, (2015), Nitriding Steel: Nitrodur, https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/063_DEW_Nitrodur_GB.pdf (ημερομηνία προσπέλασης 20 Φεβρουαρίου 2020)
- [38] Sylva N., Aliaj F. & Rama M., (2017), Hardness Curves for 31CrMoV9 Steel after Gas Nitriding, https://www.researchgate.net/publication/320320910_Hardness_Curves_for_31CrMoV9_Steel_after_Gas_Nitriding (ημερομηνία προσπέλασης 19 Φεβρουαρίου 2020)
- [39] Abdul - Hussein A., Nitriding of Aluminium - Containing Steels, (1984), <http://theses.whiterose.ac.uk/599/> (ημερομηνία προσπέλασης 19 Φεβρουαρίου 2020)
- [40] Umeda T., Miyabe K., (2014), Komatsu Technical Report: Development of Manufacturing Technology for Nitriding Processes Using Nitriding Potential Control, <https://home.komatsu/en/company/tech-innovation/report/pdf/167-E03.pdf> (ημερομηνία προσπέλασης 18 Απριλίου 2020)
- [41] Παπαγεωργίου Δ., Συζήτηση: Τετραεδρικές και Οκταεδρικές Κενές Θέσεις
- [42] Baranowska J., Szczecinski K. & Wysiecki M., Nitriding of High Chromium Steels, (1999), https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:31006887 (ημερομηνία προσπέλασης 15 Αυγούστου 2020)

- [43] Bringas J., (2004), Handbook of Comparative World Steel Standards, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις ASTM International
- [44] Συλλογικό έργο, (Ιωάννης Αυγερινός, μετάφραση), (2008), Τεχνική Ατζέντα Βασικής Μηχανολογίας, Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις
- [45] Πασπαλάς Κ., (2009), ΣΙΔΕΝΟΡ: Η Ευρωπαϊκή Τυποποίηση των Χαλύβων και Χυτοσιδήρων,
<http://www.smhbe.gr/images/downloads/Files/Tyropoisi%20Xalibon.pdf>
 (ημερομηνία προσπέλασης 24 Μαρτίου 2020)
- [46] Συλλογικό έργο, (1990), ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys, 10^η Έκδοση, Εκδόσεις ASM International, Ohio
- [47] Παπαγεωργίου Δ., Συζήτηση: Μαγνήτιση Ωστενιτικών Ανοξειδωτων Χαλύβων
- [48] Κορωνάκης Π., (2006), Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα
- [49] Παπανίκας Δ., (2012), Ρευστοδυναμικές Μηχανές, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Media Guru, Αθήνα
- [50] Parambath J., (2016), Industrial Hydraulic Systems: Theory and Practice, Εκδόσεις Universal Publishers
- [51] Κωστόπουλος Θ., (2009), Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
- [52] Ρούτουλας Α., (2008), Υδραυλικά - Πνευματικά Συστήματα: Εφαρμογές, Εκδόσεις Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα
- [53] Cey E., Hanania J., Stenhouse K. & Donev J., (2018), Energy education.ca,
<https://energyeducation.ca/encyclopedia/Waterwheel> (ημερομηνία προσπέλασης 3 Αυγούστου 2019)
- [54] Μπαλάρας Κ., Αργυρίου Α. & Καραγιάννης Φ., (2006), Συμβατικές & Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Εκδόσεις Τεκδοτική, Αθήνα
- [55] A Staff Report, (2014), Fundamentals of Hydraulic Motors,
<https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/hydraulic-pumps-motors/article/21884401/fundamentals-of-hydraulic-motors> (ημερομηνία προσπελάσεως 17 Αυγούστου 2020)

- [56] Rineer Hydraulics, (2009), Vane Crossing Vane Motor, <https://www.oemoffhighway.com/fluid-power/pumps-motors/hydraulic-motors/fluid-power-systems-components/hydraulic-motors/product/10058039/rineer-hydraulics-vane-crossing-vane-motor> (ημερομηνία προσπέλασης 12 Σεπτεμβρίου 2019)
- [57] Lee D., (2016), Gear Motors, <http://fasttobuy.blogspot.com/2016/09/gear-motors.html> (ημερομηνία προσπέλασης 12 Σεπτεμβρίου 2019)
- [58] Pump School, Gerotor Pumps, <http://www.pumpschool.com/principles/gerotor.php>, ημερομηνία προσπέλασης 12 Σεπτεμβρίου 2019
- [59] Faulhaber, Precision Dosing, <https://www.faulhaber.com/en/markets/environmental-safety/micro-annular-gear-pump/> (ημερομηνία προσπέλασης 25 Σεπτεμβρίου 2019)
- [60] Sauer Danfoss, Basic Motor Operating Principle, http://resource.jerei.com/11230/1306071800310_0.pdf (ημερομηνία προσπέλασης 28 Σεπτεμβρίου 2019)
- [61] Eaton, (2018), Low Speed, High Torque Motors, https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@hyd/documents/content/pll_1323.pdf (ημερομηνία προσπέλασης 17 Αυγούστου 2020)
- [62] Berendsen, (2017), Char-Lynn Orbital Motors Quick Reference Guide, https://www.berendsen.com.au/wp-content/uploads/2017/08/PB3701_FA3_char-lynn-catalogue-April17.pdf (ημερομηνία προσπέλασης 17 Αυγούστου 2020)
- [63] Ding H., Lu X. & Jiang B., (2006), A CFD Model for Orbital Gerotor Motor, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/15/6/062006/pdf> (ημερομηνία προσπέλασης 18 Σεπτεμβρίου 2019)
- [64] Debanshu R., Rathindranath M. & Prasanta K., (2019), Mechanics and FEM Estimation of Gaps Generated in Star - Ring Active Contacts of Orbit Motor During Operation, https://www.researchgate.net/publication/332288566_Mechanics_and_FEM_estimation_of_gaps_generated_in_star_ring_active_contacts_of_ORBIT_motor_during_operation (ημερομηνία προσπέλασης 18 Σεπτεμβρίου 2019)

- [65] Hydraulex Global, Orbital Motors, <http://www.orbitalmotors.net/> (ημερομηνία προσπέλασης 17 Αυγούστου 2020)
- [66] Sauer Danfoss, (2000), Hydraulic Motor Type OMS Series 3, <https://www.scribd.com/document/361331266/Danfoss-OMS-motor-pdf> (ημερομηνία προσπέλασης 18 Αυγούστου 2020)
- [67] Strmcnik E., Majdic F. & Kalin M., (2019), Influence of a Diamond - Like Carbon -Coated Mechanical Part on the Operation of an Orbital Hydraulic Motor in Water, https://www.researchgate.net/publication/332587267_Influence_of_a_Diamond_Like_Carbon_Coated_Mechanical_Part_on_the_Operation_of_an_Orbital_Hydraulic_Motor_in_Water (ημερομηνία προσπέλασης 20 Σεπτεμβρίου 2019)
- [68] AVS Rotators, Functionality (G-Rotor principle), <https://hydraulic-rotators.com/#gallery> (ημερομηνία προσπέλασης 20 Σεπτεμβρίου 2019)
- [69] Voulgari - Politou E., (2009), WO 2009/049879 A2: Hydraulic Motor in an Annular Ring Design with a Distributor Plate which is Integrated into the Rotor Housing, <https://patents.google.com/patent/WO2009049879A2/en?assignee=Alexander+Voulgaris&oq=Alexander+Voulgaris> (ημερομηνία προσπέλασης 20 Αυγούστου 2020)
- [70] Voulgaris A., (2012.),EP 2 647 793 B1: Hydraulikmotor, <https://patents.google.com/patent/EP2647793B1/en?assignee=Alexander+Voulgaris&oq=Alexander+Voulgaris> (ημερομηνία προσπέλασης 20 Αυγούστου 2020)
- [71] AVS Rotators, Data Sheets / Technical Data, <https://hydraulic-rotators.com/wp-content/uploads/Bagger/ARB%20200.pdf> (ημερομηνία προσπέλασης 20 Σεπτεμβρίου 2019)
- [72] Rotatoren – Baumatic AG, <https://baumatic.ch/portofolio-item/rsv-rotatoren/> (ημερομηνία προσπέλασης 20 Αυγούστου 2020)

- [73] Strmcnik E. & Majdic F., (2018), The Pressure and Efficiency Characteristic of Hydraulic Gerotor Motor with the Floating Outer Ring,
https://www.researchgate.net/publication/324925021_The_Pressure_and_Efficiency_Characteristic_of_Hydraulic_Gerotor_Motor_with_the_Floating_Outer_Ring/fulltext/5b3a76f34585150d23f1c991/The-Pressure-and-Efficiency-Characteristic-of-Hydraulic-Gerotor-Motor-with-the-Floating-Outer-Ring.pdf
(ημερομηνία προσπέλασης 20 Σεπτεμβρίου 2019)
- [74] Caslin, (2017), 5 Facts about Gerotor Hydraulic Motors,
<http://info.texasfinaldrive.com/shop-talk-blog/6-facts-about-gerotor-hydraulic-motors> (ημερομηνία προσπέλασης 31 Αυγούστου 2020)
- [75] GNR France, Metal Lab 75/80 V,
<http://www.gnrfrance.com/uk-index.html> (ημερομηνία προσπέλασης 20 Αυγούστου 2020)
- [76] DIN EN 10085: Nitriding steels - Technical delivery conditions, (2001)
- [77] E384 - 17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, (2017)
- [78] Cverna F., (2006), Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels, 5^η Έκδοση, Εκδόσεις ASM International, Ohio
- [79] Δραγάτσης Α., (2019), Επιρροή της ενανθράκωσης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα DIN 15CrNi6, Αθήνα