



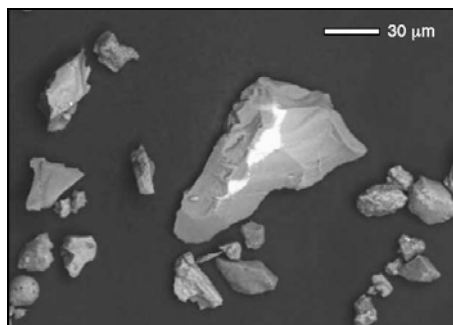
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική εργασία με θέμα:

«ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΤΡΙΜΜΑΤΩΝ ΦΘΟΡΑΣ»

Ηλίας Μαρινέλλης



Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος

Αθήνα, 2013

Ευχαριστίες...

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Μανωλάκο Δημήτριο, για την εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα.

Περιεχομένα

Ευχαριστίες.....	2
Περιεχόμενα.....	3
Περίληψη.....	4
Summary.....	5
1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Γενικά.....	6
1.2 Φθορά-Τύποι Φθοράς.....	7
1.1.1 Προσκολλησεως.....	9
1.1.2 Εκτριβής.....	12
1.1.3 Κόπωσης.....	15
1.1.4 Τριβοχημική	18
1.1.5 Μηχανικής Διάβρωσης.....	19
1.3 Αποτελέσματα της ρύπανσης.....	22
2. Μελέτη Αποβλίττων Φθοράς.....	23
2.1 Εμφάνιση-προέλευση σωματιδίων.....	30
2.2 Τύποι σωματιδίων.....	30
2.3 Ταξινόμηση σωματιδίων.....	35
2.4 Μέθοδοι ανίχνευσης.....	36
2.5 Ποσοτικός προσδιορισμός.....	38
2.6 Απαρίθμηση συντριμμάτων.....	41
2.7 Χημική ανίχνευση.....	43
3. Εφαρμογές.....	45
3.1 Πολιτικές.....	45
3.2 Στρατιωτικές.....	49
4. Γενικά Συμπεράσματα.....	51
5. Βιβλιογραφία.....	52

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παραμετρική εξέταση της μορφολογίας του αποβλίττου, με αντικειμενικό σκοπό την αναγνώριση, όπου είναι δυνατόν, του μηχανισμού φθοράς από τον οποίο έχει προκύψει το απόβλιττο, όπως επίσης και ο προσδιορισμός κάποιων ποσοτικών παραμέτρων του φαινομένου. Η μορφολογική εξέταση των αποβλίττων, όπως θα φανεί παρακάτω, βρίσκεται μερικά βήματα εμπρός από την απλή φερρογραφία, η οποία αποτελεί τη συνηθισμένη πρακτική στη βιομηχανία.

Summary

The purpose of this work is the parametric examination of the morphology of metallic wear debris, with the objective to identify, where possible, the mechanism of damage from which has emerged the metallic wear debris, as well as the determination of some quantitative parameters of the phenomenon. Morphological examination of metallic wear debris, as will be seen below, is a few steps ahead from the simple ferrografia, which is the usual practice in the industry.

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Από την Βιομηχανική Επανάσταση και την ανάπτυξη του ατμού και των Μ.Ε.Κ., η φθορά ήταν κάτι δεδομένο. Όταν η φθορά μηχανών και εργαλείων έγινε πρόβλημα, η ανάπτυξη υλικών που αντιστέκονταν στην φθορά, αλλά και η ίδια η μελέτη της φθοράς αυξήθηκε ραγδαία. Αυτήν την στιγμή έχουμε ένα μεγάλο όγκο πληροφοριών που έχει αναπτυχθεί από την εμπειρία και την επιστημονική έρευνα, ώστε να μπορούμε να σχεδιάσουμε πιο αξιόπιστες και οικονομικές μηχανές.

Η ανάλυση του αίματος στο ανθρώπινο σώμα είναι μία σημαντική τεχνική, εάν όχι η σπουδαιότερη, για να γίνεται η διάγνωση της κατάστασης ενός ανθρώπου. Ανάλογα, η ανάλυση των υγρών σε μία μηχανή είναι εξίσου σημαντική. Το υγρό είναι ένας φορέας. Μεταφέρει ισχύ και ύλη από το ένα μέρος στο άλλο. Ειδικά στα υδραυλικά συστήματα ισχύος, μεταφέρει ισχύ από εκεί που παράγεται, στη μηχανή που θα την καταναλώσει, ή είναι το λιπαντικό που παρεμβάλλεται ανάμεσα σε επιφάνειες. Επίσης μεταφέρει ανεπιθύμητα συντρίμματα, που διασκορπίζονται και πρέπει να απομακρυνθούν. Ταυτόχρονα μπορεί δυστυχώς να κάνει και το αντίθετο, μεταφέροντας στερεά σωματίδια (ρύπους) σε κρίσιμα εξαρτήματα. Μέσα στο υγρό βρίσκονται όλες τα στοιχεία για το τι έχει συμβεί, και το τι πρόκειται να συμβεί, λόγω της παρουσίας κάποιων σωματιδίων-ρυπαντών, που υπάρχουν μέσα στο σύστημα.

Αν και το λάδι αποτελεί την πλέον συνηθισμένη μορφή υγρού σε ένα σύστημα, δεν είναι τα μοναδικό υγρό. Υπάρχουν σημαντικοί λόγοι, όπως είναι το κόστος και η αντίσταση σε φωτιά (fire resistance), που καθιστούν απαραίτητη και την χρήση άλλων υγρών, όπως π.χ. φωσφατικοί εστέρες (ιδιαίτερα ακριβοί), είτε εναλλακτικά νερό και υγρά που βασίζονται στο νερό.

Η Ανάλυση Συντριμμάτων Φθοράς (Wear Debris Analysis) ή όπως αλλιώς ονομάζεται, Τριβολογική Ανάλυση αποτελεί μία εναλλακτική μέθοδο Προβλεπτικής Συντήρησης. Βασική αρχή της είναι ο έλεγχος κυρίως του ελαίου λίπανσης κινουμένων μερών των μηχανών. Περιλαμβάνει τόσο την ανάλυση των σχετικών μεταλλικών σωματιδίων που περιέχει (συντρίμματα) όσο και την ανάλυση του ίδιου του ελαίου λίπανσης.

Σωματίδια που ενδιαφέρουν είναι αυτά που περιέχονται σε έλαια, υδραυλικά υγρά, λιπαντικά, καύσιμα και άλλα υγρά όπως χημικά παράγωγα ακόμα και το νερό. Τα σωματίδια, ονομάζονται συνήθως στερεά σωματίδια (solid particles), αν και μπορεί να είναι ημιπορώδη ή κενά. Η προέλευση τους μπορεί να είναι, είτε από φθορά, όπως δηλώνεται με τον όρο συντρίμματα φθοράς (wear debris), είτε από ποικιλία εξωτερικών πηγών, που είναι ξένες προς την διαδικασία και γι' αυτό θεωρούνται ρύποι ή μολύνσεις (contaminants).

1.2 ΦΘΟΡΑ

Ορισμός

Φθορά (Wear) είναι η ανεπιθύμητη απομάκρυνση υλικού από την επιφάνεια επαφής ενός στερεού σώματος, λόγω μηχανικής επενέργειας ενός άλλου στερεού σώματος.

Με τον όρο μηχανισμός φθοράς, εννοούμε τα φαινόμενα-αιτίες τα οποία δρώντας αυτόνομα, παράλληλα ή απο κοινού έχουν σαν αποτέλεσμα τη φθορά μιας επιφάνειας.

Η φθορά προέρχεται κυρίως από το αποτέλεσμα της σχετικής τριβής μεταξύ δύο επιφανειών. Σωματίδια από φθορά λόγω κόπωσης μπορούν να προέλθουν από την επιφάνεια σαν νιφάδες (flakes), όπως είναι η περίπτωση εξαρτημάτων που κάμπτονται, ή σαν χοντρά σωματίδια (chunks) ή σφαίρες, από ρωγμές ή κρατήρες, που δημιουργούνται κάτω από την επιφάνεια. Επίσης και αυτά τα σωματίδια εμφανίζονται σε μεγάλες ποσότητες. Συντρίμματα από διάβρωση ή από σπηλαιώση προέρχονται επίσης από μία καταστροφή, που ξεκινάει στην επιφάνεια και κινείται εσωτερικά.

Μπορεί να μην είναι δυνατόν να σταματήσει η εξέλιξη της φθοράς, αλλά μπορεί να ανιχνευθεί και να προσδιοριστεί σε κάποιο βαθμό, ώστε να ληφθούν μέτρα πριν το εξάρτημα φθαρεί τελείως (wear out). Αυτό το γεγονός μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε, ιδιαίτερα όταν υπάρχει υπερβολική φθορά λόγω κάποιου λάθους στο σύστημα. Έτσι, η Τριβολογική Ανάλυση μπορεί να βοηθήσει στην βελτίωση της αξιοπιστίας, προσδιορίζοντας την παρουσία του σφάλματος.

Επισκόπηση της φθοράς μιας μηχανής

Η φθορά των μεταλλικών επιφανειών είναι μια σύνθετη διαδικασία, ακόμα και στο πιο απλό σύστημα το οποίο εξαρτάται από δυνάμεις, θερμοκρασίες, μεταλλουργικές δομές, τύπους χρησιμοποιούμενων λιπαντικών και το φυσικό περιβάλλον των επιφανειών. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φθοράς οι μεταλλικές επιφάνειες υπόκεινται σε πολλές επιδράσεις μαζί με τη χημική προσβολή και τη φυσική βλάβη ή τις κατασκευαστικές αλλαγές.

Οι μηχανές diesel είναι ένα περίπλοκο σύστημα με πολλές επιφάνειες φθοράς που μπορούν να απεικονιστούν σαν μια σειρά από μηχανισμούς φθοράς με δημιουργία σωματιδίων με ποικίλους ρυθμούς παραγωγής σωματιδίων.

Επιπρόσθετα, μη μεταλλικά σωματίδια μπορούν να προστεθούν σε αρκετές περιοχές σε ένα σύστημα. Η διαφοροποιημένη ύλη που περιέχεται στα προϊόντα που αποβάλλονται, μπορούν να απορροφηθούν στο φιλμ λαδιού σε κυλινδρικό τοίχωμα. Αυτά τα σωματίδια είναι πολύ ανθρακούχα αλλά μπορεί να περιέχουν και διάφορα οξέα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάφλεξης (καύσης). Οι ακαθαρσίες, κυρίως πυριτίας, μπορούν επίσης να προστεθούν στο σύστημα λαδιού μέσω του εισερχόμενου αέρα (ρεύμα αέρα). Οι ρυθμοί ροής της μάζας είναι φτιαγμένοι από μία απέραντη συλλογή μεγεθών και σχημάτων από μεταλλικά σωματίδια και γι' αυτό έχουν χαρακτηριστική κατανομή μεγέθους σωματιδίων για κάθε επιφάνεια

φθοράς. Θεωρητικά, ένα ομογενές μίγμα σωματιδίων από όλες τις επιφάνειες φθοράς δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της σταθερής κυκλοφορίας του λαδιού στο σύστημα. Αν θεωρηθούν δεδομένες οι συνθήκες, ο ρυθμός παραγωγής των προερχόμενων σωματιδίων είναι σταθερός με το χρόνο. Η συγκέντρωση των σωματιδίων φθοράς ενός δεδομένου στοιχείου, υπολογίζεται συχνά σε ppm που είναι ο λόγος της μάζας του υπολείμματος μετάλλου σε mg προς τη μάζα του λαδιού.

Στην ιδεατή περίπτωση μπορούμε να υποθέσουμε ότι η μέγιστη μάζα λαδιού και οι ποικίλοι ρυθμοί παραγωγής σωματιδίων είναι σταθεροί. Σε μια πραγματική μηχανή, εν τούτοις, είναι γνωστό ότι η κατανάλωση λαδιού (αφαίρεση σωματιδίων και λαδιού) και η προσθήκη λαδιού (υποθέτοντας χωρίς σωματίδια) έχουν σημαντικές συνέπειες στις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις. Τα σωματίδια επίσης έχουν την τάση να εγκαθίστανται ή να επιμεταλλώνονται είτε σαν ίζημα είτε σαν λασπώδη απόβλητα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας μηχανής ή κατά τη διάρκεια της ακινησίας της. Το σύστημα φιλτραρίσματος προφανώς έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη συγκέντρωση σωματιδίων. Λόγω των αυστηρών μηχανικών ανοχών των στοιχείων μηχανών και του γενικού μεγέθους παραγομένων σωματιδίων φθοράς, η αλληλεπίδραση των σωματιδίων στις επιφάνειες φθοράς μπορεί να προκαλέσουν πολύ επισπευσμένη και συχνά καταστροφική φθορά. Για αυτό το φιλτράρισμα του λαδιού έγινε μια αποδεκτή έννοια στις μηχανές diesel όπως και σε άλλες μηχανές. Πολλοί τύποι φίλτρων είναι διαθέσιμα σε εμπορικές σειρές, που περιλαμβάνουν από τα πιο απλά που αποκρίνουν μεγάλα σωματίδια, μέχρι τα πιο αποτελεσματικά που συγκρατούν μεγέθη της τάξεως του μm και κάτω και αρκετά συχνά και τα πρόσθετα των λαδιών. Η επιλογή του κατάλληλου φίλτρου είναι συνήθως περίπλοκη διαδικασία. Το γεγονός ότι τα μεγάλα σωματίδια απομακρύνονται είναι σημαντικό, καθώς τα σωματίδια διαστάσεων μεγαλύτερων των $5\mu\text{m}$ συμβάλουν στην κατανόηση της κατάστασης φθοράς και της διάγνωσης επικείμενης αστοχίας.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται τόσο στο να μη γίνονται αλλαγές στις μεταβλητές λειτουργίας, διότι αλλάζουν τη φύση της διαδικασίας φθοράς, όσο και στην ερμηνεία, ακόμα και στα πιο προσεκτικά ελεγχόμενα εργαστηριακά πειράματα, που έχουν να κάνουν με τα διάφορα φαινόμενα της φθοράς. Για αυτό οι μέθοδοι μέτρησης της φθοράς πρέπει να είναι ακριβείς και εξαιρετικά ευαίσθητες στις αλλαγές των συνθηκών φθοράς.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ

Υπάρχουν διαφορετικές μορφές για να περιγραφεί η φθορά. Σύμφωνα με τον Barwell [2] υπάρχουν δέκα τύποι φθοράς:

- *ατομική φθορά (atomic wear)*
- *φθορά συνάφειας /πρόσφυσης (adhesive wear)*
- *φθορά εκτριβής (abrasive wear)*
- *χημική διαβρωτική φθορά (corrosive wear)*
- *αποφλοιώση (pitting)*
- *εξέλκωση (scuffing/scoring)*
- *παλμική φθορά (fretting wear)*

- μηχανική διαβρωτική φθορά (*erosion*)
- ηλεκτρική αποφλοΐωση (*electrical pitting*)
- υγρή μηχανική διαβρωτική φθορά (*fluid erosion*)

Συνήθως συνυπάρχουν περισσότεροι του ενός τύπου φθοράς πράγμα που προκαλεί σύγχυση. Οι υφισταμένες κατατάξεις τύπων φθοράς χρησιμοποιούν διάφορα κριτήρια όπως :

- αιτία που προκαλεί την φθορά
- μορφή των ζημιών που έχουν προκληθεί
- τεχνολογικές συνέπειες της φθοράς

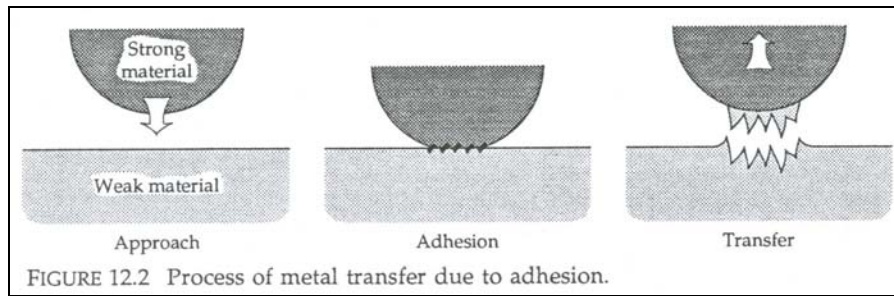
Αποτέλεσμα αυτής της υφισταμένης κατάστασης είναι η ύπαρξη ενός πλήθους όρων, που συνήθως ταυτίζονται μεταξύ τους ή δίνουν παραπλανητική εικόνα της υφισταμένης φθοράς.

Οι παραπάνω τύποι φθοράς αναλύονται στην συνέχεια κατά σειρά:

1.1.1 Φθορά προσκολλησεως (Adhesive Wear)

Τα περισσότερα στερεά όταν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους υπό κατάλληλες συνθήκες, συκολλώνται. Η προσκόλληση της μιας επιφάνειας στην άλλη ενισχύεται από την απουσία οξυγόνου ή άλλων στοιχείων στην διεπιφάνεια επαφής, καθώς και από την μικρή τραχύτητα των επιφανειών. Η συγκόλληση των υλικών οδηγεί σε δυσανάλογη αύξηση του συντελεστή τριβής με αποτέλεσμα την καταστροφή των επιφανειών ολίσθησης, ενώ η αύξηση του συντελεστή ολίσθησης ενδέχεται να αποτρέψει εντελώς την ολίσθηση μεταξύ των επιφανειών.

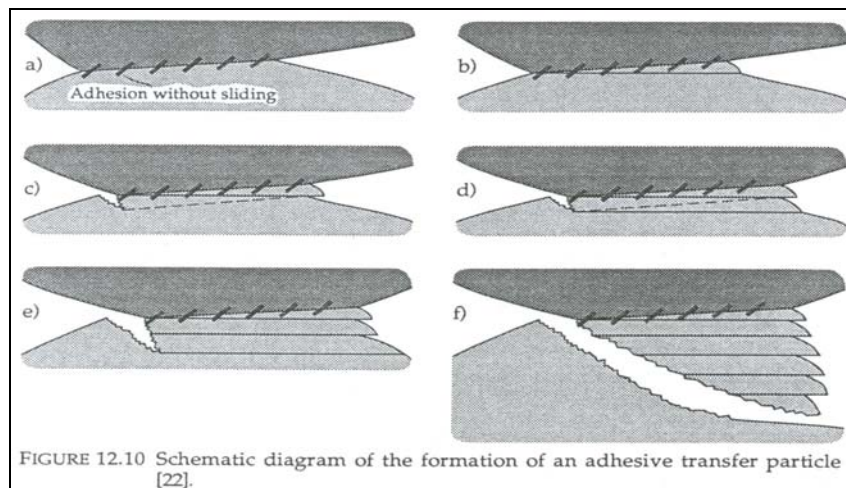
Από πειραματικές διατάξεις, οι οποίες λειτουργούν υπό κενό αφού ο ατμοσφαιρικός αέρας δεν ευνοεί την συσσωμάτωση των δυο επιφανειών, παρατηρήθηκε ότι όταν δυο μέταλλα έρχονται σε επαφή και ασκείται σε αυτά μια μικρή σχετικά δύναμη έχουμε συγκόλληση αυτών. Συγκεκριμένα απαιτείται δύναμη για τον αποχωρισμό των επιφανειών, η οποία μπορεί να είναι και είκοσι φορές μεγαλύτερη από την δύναμη η οποία ασκήθηκε αρχικά. Κατά τον διαχωρισμό των δυο σωμάτων τμήμα του πιο μαλακού υλικού αποσπάται και συμπαρασύρεται προσκολλημένο στο σκληρότερο.



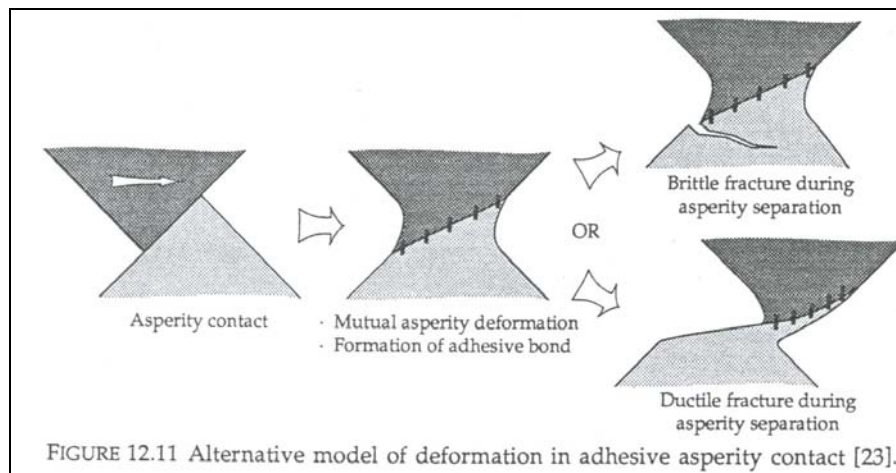
Σχήμα 1. Μεταφορά υλικού λόγω συνάφειας [3]

Η επικρατέστερη εξήγηση του φαινομένου είναι ότι όταν δυο επιφάνειες έρχονται σε επαφή έχουμε μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα μέταλλο στο άλλο. Τα ηλεκτρόνια στο κρυσταλλικό πλέγμα των μετάλλων είναι υπό την μορφή νέφους και έχουν την δυνατότητα κίνησης όταν η απόσταση μεταξύ των επιφανειών λάβει μια κρίσιμη τιμή, παρατηρείται η μεταφορά των ηλεκτρονίων από το υλικό με τα περισσότερα ηλεκτρόνια. Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσεται η δύναμη συνοχής μεταξύ των δυο επιφανειών, παρά την διαφορετική δομή των υλικών. Ο δεσμός που αναπτύσσεται, πολλές φορές ενισχύεται από χημικές αντιδράσεις μεταξύ των μετάλλων.

Ένας από τους κύριους μηχανισμούς φθοράς, ο οποίος κάνει την εμφάνισή του στα τριβوسυστήματα φθοράς συνάφειας, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Αρχικά οι δυο επιφάνειες συγκολλούνται στην περιοχή επαφής και στην συνέχεια, λόγω της σχετικής κίνησης τους, λεπτό φιλμ αποκολλάται από το μαλακότερο υλικό και προσκολλάται στο άλλο αφού ο δεσμός μεταξύ τους είναι ισχυρότερος του δεσμού συνοχής αυτού του μετάλλου. Η ίδια διεργασία μεταξύ των επιφανειών μπορεί να επαναλαμβάνεται συνεχώς, φθείροντας έτσι την μια επιφάνεια και αυξάνοντας τον όγκο της άλλης.

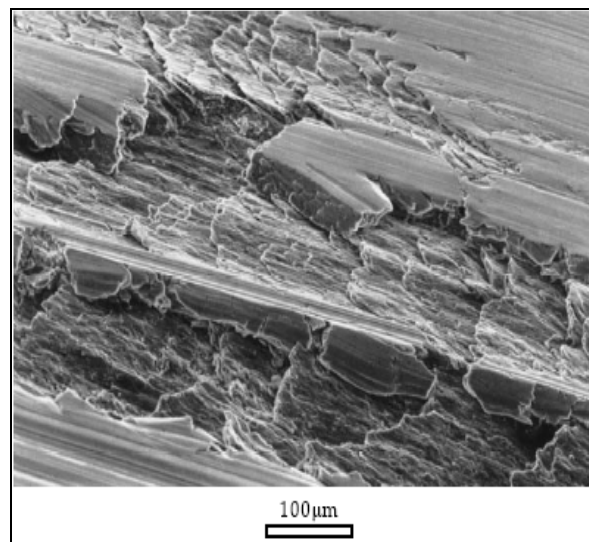


Σχήμα2 Σχηματικό διάγραμμα μεταφοράς υλικού λόγω συνάφειας [3]

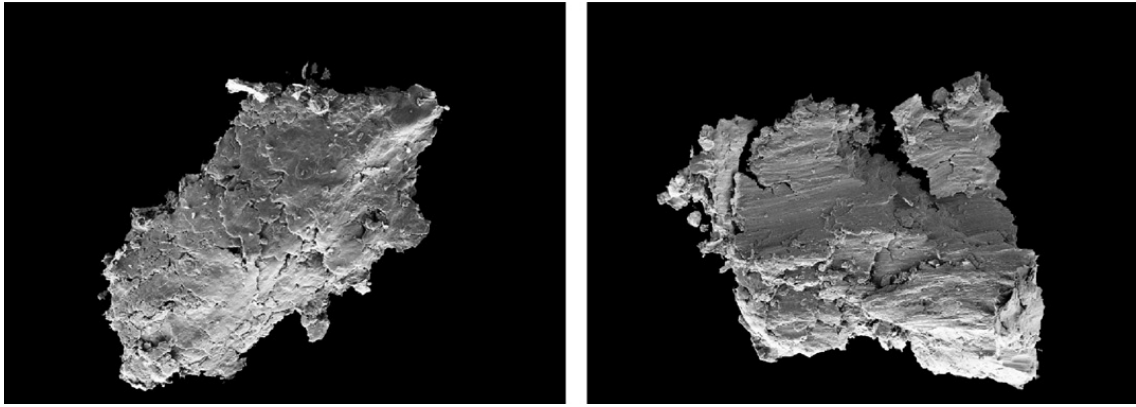


Σχήμα 3. Εναλλακτικό μοντέλο παραμόρφωσης [3]

Εκτός της ανωτέρω περίπτωσης, ενδέχεται να έχουμε ψαθυρό θρυμματισμό του υλικού ή έντονη πλαστική παραμόρφωση αν τα υλικά είναι όλκιμα.



Εικόνα 1. Κράμα Al-Si που έχει υποστεί φθορά προσκολλήσεως [5]



Εικόνα 2. Φωτογραφίες από SEM σωματιδίων φθοράς προσκολλησέως [4]

1.1.2. Φθορά Εκτριβής (abrasive wear)

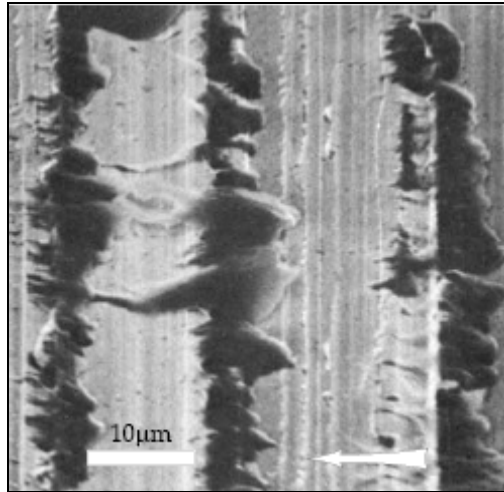
Η *φθορά Εκτριβής* (abrasive wear) συμβαίνει όταν λόγω της σχετικής ολίσθησης τραχέων επιφανειών η σωματιδίων υπάρχει απώλεια υλικού από τον συνολικά όγκο του στέρεου σώματος.

Διακρίνονται δυο τύποι φθοράς:

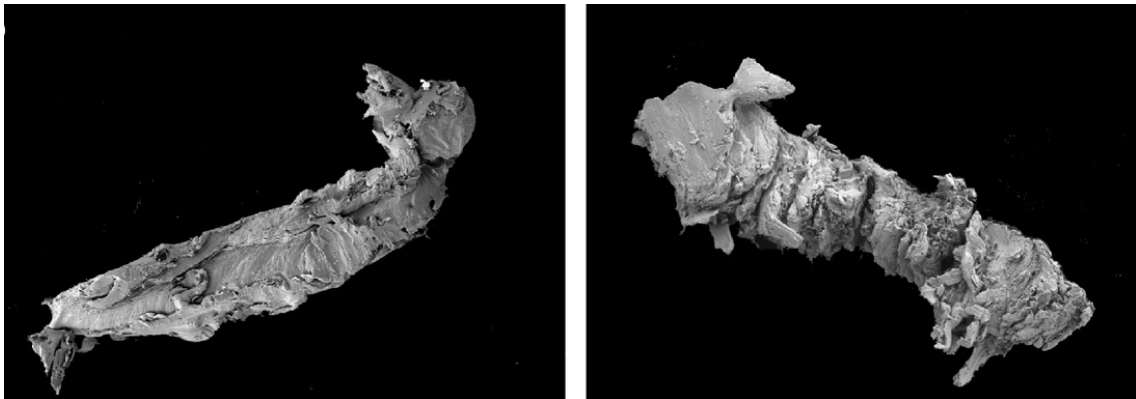
I) Φθορά εκτριβής δύο σωμάτων, η οποία πραγματοποιείται όταν υπάρχουν δυο στέρεα σώματα σε επαφή μεταξύ τους και το σκληρότερο αφαιρεί υλικό από το πιο μαλακό.

II) Φθορά εκτριβής τριών σωμάτων. Στο συγκεκριμένο τύπο φθοράς πραγματοποιείται αφαίρεση υλικού και από τις δυο επιφάνειες, οι οποίες βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, από σκληρά ελεύθερα σωματίδια. Τα σωματίδια βρίσκονται στη διεπιφάνεια των δυο σωμάτων και αποτελούν τρίτο σώμα.

Με την βοήθεια μικροσκοπικών παρατηρήσεων κατερρίφθη η αρχική πεποίθηση ότι η φθορά εκτριβής βασίζεται μόνο στο μηχανισμό μικροκοπής. Αποκαλύφθηκε ότι μικροκοπή υφίσταται μόνο από τα σωματίδια τα οποία διαθέτουν αιχμηρές επιφάνειες, ενώ κατά την φθορά εισάγονται και άλλοι έμμεσοι μηχανισμοί φθοράς.



Εικόνα 3. Συσσώρευση εκτριβόμενου πολυμερούς σε μεταλλική επιφάνεια (stae) [5]



Εικόνα 4. Φωτογραφίες από SEM σωματιδίων φθοράς εκτριβής [4]

Συνολικά σε ένα τριβασύστημα φθοράς λόγω εκτριβής, παρατηρούνται τέσσερις μηχανισμοί φθοράς: α) μικροκοπή, β) θρυμματισμός, γ) κόπωση και δ) αποκόλληση. Παρακάτω εξηγούμε αναλυτικά τον κάθε τύπο φθοράς:

α) Μικροκοπή

Όπως διακρίνουμε και στο Σχήμα 4, κατά την μικροκοπή παρατηρούνται δυο μηχανισμοί. Ο πρώτος είναι η κοπή υλικού από σκληρότερο σωματίδιο το οποίο αναλαμβάνει το ρόλο του κοπτικού εργαλείου και ο δεύτερος τη συγκέντρωση υλικού από το σφηνοειδής μορφής σωματίδιο και η δημιουργία αποβλίττου στο άκρο, με μορφή νιφάδας.

Και στους δυο μηχανισμούς παρατηρούνται έντονες πλαστικές παραμορφώσεις στο μητρικό υλικό, ενώ επιπρόσθετα στη κοπή πραγματοποιείται άμεση αφαίρεση υλικού. Η γεωμετρία των σωματιδίων, όπου στο Σχήμα 4 είναι ιδεατή, επηρεάζει τον ρυθμό φθοράς. Σωματίδια με αρκετές αιχμές έχουν την δυνατότητα να αφαιρέσουν μεγαλύτερο όγκο υλικού λόγω των πολλαπλών κοπτικών επιφανειών τους,

σε αντίθεση με σωματίδια τα οποία έχουν «εξομαλυμένη» γεωμετρία και απλά ολισθαίνουν στην επιφάνεια. Εκτός της επιφανειακής παραμόρφωσης και αφαίρεσης υλικού, ανάλογα με το φορτίο το οποίο ασκείται, πραγματοποιείται η πλαστική παραμόρφωση τμήματος του σώματος που βρίσκεται κάτω από την επιφάνειας επαφής προκαλώντας σκλήρυνση αυτού και αύξηση της αντοχής σε φθορά εκτριβής.

β) Θρυμματισμός

Η συνεχής και αλληπάλληλη διείδυση αιχμηρών σκληρών τμημάτων της μιας επιφάνειας στην άλλη οδηγεί στη κόπωση της δεύτερης και στην φθοράς εκτριβής σε αυτής μέσω ψαθυρού θρυμματισμού του υλικού.

Με την πραγματοποίηση πειραμάτων σε διαφανές υλικό κατέστη δυνατή η παρατήρηση τριών ειδών ρωγμών:

α) συμμετρικές πλάγιες ρωγμές με γωνία διάδοσης 30°

β) τοπικός θρυμματισμός του υλικού

γ) βαθιά μεσαία ρωγή κάθετη στην επιφάνεια του υλικού

Ο θρυμματισμός του υλικού, ως απόρροια μεγάλων φορτίων, οδηγεί στην απομάκρυνση υλικού από την επιφάνεια αυτού. Η διάδοση των ρωγμών δημιουργεί ελεύθερες επιφάνειες στο εσωτερικό του στέρεου και το δίκτυο των ρωγμών διασταυρώνεται δημιουργώντας τον θρυμματισμό.

γ) Κόπωση

Η συνεχής πλαστική παραμόρφωση της επιφάνειας έχει ως αποτέλεσμα την κόπωση του υλικού και τελικά την φθορά του. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους μηχανισμούς, ο ρυθμός φθοράς είναι μειωμένος λόγω του αυξημένου κύκλου φορτίσεων που απαιτείται για την κόπωση του υλικού. Στο Σχήμα 4 δίνεται μια ποιοτική απεικόνιση του μηχανισμού. Επισημάνεται η συγκέντρωση του υλικού στα άκρα με την μορφή νιφάδας.

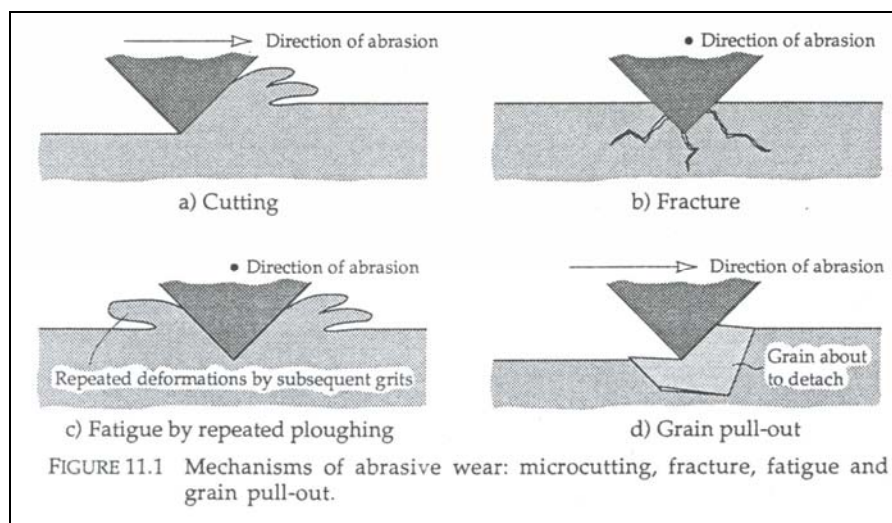
δ) Αποκόλληση

Ο τέταρτος αυτός μηχανισμός απαντάται συνήθως σε κεραμικά υλικά τα οποία προέρχονται από συσσωματωμένους κόκκους. Οι κόκκοι που υπάρχουν στην επιφάνεια του υλικού δεν είναι επαρκώς εγκλωβισμένοι και είναι σχετικά πιο εύκολο, με την βοήθεια αιχμηρών τραχυτήτων της επιφάνειας, να έλκονται και να απομακρύνονται από την επιφάνεια.

Ανάλογα με τις συνθήκες του προβλήματος (υλικό–γεωμετρία επιφανειών, εξασκούμενο φορτίο κ.α.), οι τέσσερις μηχανισμοί παρουσιάζουν διαφορετική συμμετοχή στο τριβόσυστημα φθοράς εκτριβής. Σε συγκεκριμένα προβλήματα μπορεί κάποιος από του ανωτέρω μηχανισμούς είτε να απουσιάζει εντελώς είτε να είναι κυρίαρχος και η παραδοχή ότι είναι και ο μοναδικός να εμπεριέχει σφάλμα.

Ο ρυθμός φθοράς μια επιφάνειας, η οποία υπόκειται σε φθορά εκτριβής και οι μηχανισμοί που παρατηρούνται εξαρτώνται από αρκετούς παράγοντες, όπως η διάφορα σκληρότητας των υλικών, η κρυσταλλική δομή του υλικού κ.α. Αν τα σωματίδια είναι σε αρκετό βαθμό ψαθυρά, θρυμματίζονται εύκολα και τελικώς διασπώνται, με αποτέλεσμα να μην δύναται να αφαιρέσουν υλικό από την επιφάνεια του στέρεου. Χαμηλός ρυθμός φθοράς παρατηρείται και στην περίπτωση όπου τα σωματίδια είναι πολύ σκληρά. Στην περίπτωση αυτή τα σωματίδια χάνουν τις αιχμηρές ακμές τους λόγω ψαθυρής θραύσης κατά την επαφή τους με την επιφάνεια και τελικά τείνουν σε σφαιρικά σωματίδια τα οποία στερούνται διεισδυτικής ικανότητας. Ο μέγιστος ρυθμός φθοράς παρατηρείται για σωματίδια μέτριας ψαθυρότητας, τα οποία δεν θρυμματίζονται εύκολα και δημιουργούν συνεχώς νέες ακμές κοπής.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τέσσερις μηχανισμοί φθοράς λόγω εκτριβής που περιγράφηκαν:



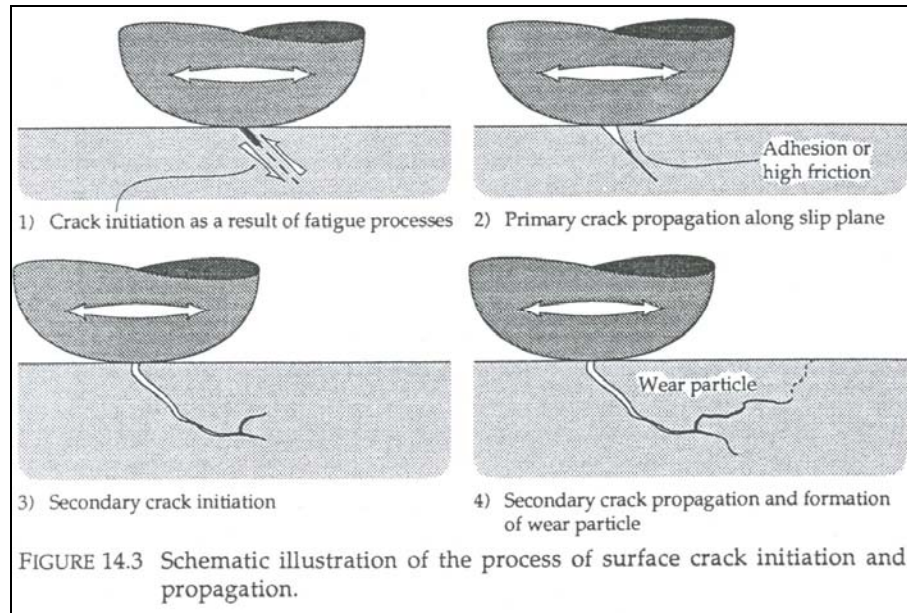
Σχήμα 4. Μηχανισμοί φθοράς εκτριβής: α) μικροκοπή, β) θρυμματισμός, γ) κόπωση και δ) αποκόλληση [3]

1.1.3 Φθορά Κόπωσης (Fatigue Wear)

Η επαφή τραχυτήτων μεταξύ δυο επιφανειών συνοδεύεται από την ανάπτυξη υψηλών τοπικών τάσεων, οι οποίες παρατηρούνται καθ' όλη την διάρκεια της ολίσθησης ή κύλισης των δυο επιφανειών. Αποτέλεσμα της συνεχούς καταπόνησης στην οποία υποβάλλονται, αποτελεί η ανάπτυξη και διάδοση ρωγμών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σωματιδίων φθοράς. Η διαδικασία και οι υπομηχανισμοί της συνθέτουν το τριβόσύστημα *φθοράς λόγω κόπωσης*. Η φθορά κόπωσης χωρίζεται σε δυο μεγάλες υποκατηγορίες:

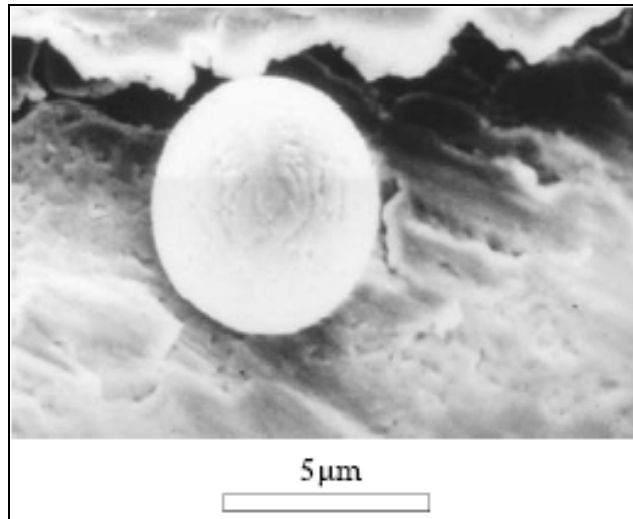
- α) φθορά κόπωσης κατά την ολίσθηση επιφανειών
- β) φθορά κόπωσης κατά την κύλιση κυκλικού ή σφαιρικού σωματιδίου σε επίπεδη επιφάνεια.

Η συνεχής παραμόρφωση επιφανειών λόγω τριβής οδηγεί τελικώς στην κατάρρευση της αρχικής δομής των κόκκων και την δημιουργία πυρήνων διαταραχής. Η εμφάνιση των ρωγμών μπορεί να έχει ως σημείο έναρξης είτε την επιφάνεια ολίσθησης είτε κάποια ασυνέχεια στο εσωτερικό του στέρεου. Ο μηχανισμός εμφάνισης ρωγμής με σημείο έναρξης την επιφάνεια του υλικού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



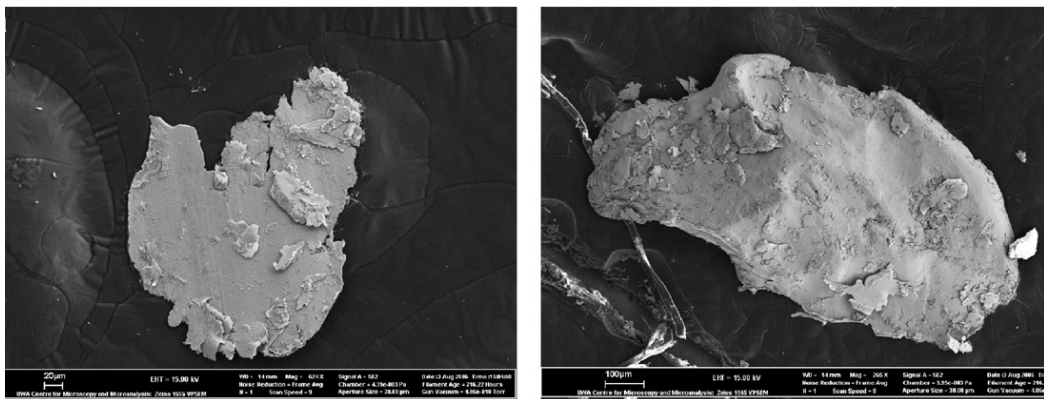
Σχήμα 5. Σχηματική παράσταση της δημιουργίας ρωγμής και της επέκτασής της [3]

Αρχικά διαπιστώνεται η εμφάνιση – έναρξη της ρωγμής στην επιφάνεια η οποία οφείλεται σε κάποια ατέλεια του υλικού. Στη συνέχεια η ρωγμή διαδίδεται προς το εσωτερικό του υλικού λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτό από την ολίσθηση των επιφανειών. Τελικώς η ρωγμή διακλαδώνεται αποκόπτοντας τμήμα από την επιφάνεια του υλικού το οποίο καλείται σωματίδιο φθοράς. Επισημαίνεται ότι η διάδοση της ρωγμής υποβοηθάτε από την παρουσία οξυγόνου, αφού η ανάπτυξη οξειδίων στις νέες επιφάνειες που σχηματίζει η ρωγμή αποτρέπει την επανασυγκόλλησή τους. Επιπλέον, κατά την απομάκρυνση του σωματιδίου φθοράς από την επιφάνεια, διαταράσσεται η ομαλή επαφή των δυο στερεών οδηγώντας σε περαιτέρω φθορά.



Εικόνα 6. Παράδειγμα σφαιρικού σωματιδίου που δημιουργήθηκε από κόπωση επαφής [5]

Στην περίπτωση που έχουμε κύλιση κυλινδρικού ή σφαιρικού σώματος σε επίπεδη επιφάνεια ο παρατηρούμενος μηχανισμός φθοράς του υλικού είναι στενά εξαρτώμενος από την ύπαρξη ή μη λιπαντικού στρώματος, καθώς και το είδος του υλικού (κεραμικό, πολυμερές κ.α.). Κατά την κύλιση υπάρχει συγκέντρωση μεγάλων δυνάμεων σε μια μικρή περιοχή επαφής. Ως αποτέλεσμα, ασκούνται μεγάλες τάσεις στο υλικό παραμορφώνοντάς το πλαστικά και ευνοώντας τον σχηματισμό ρωγμών στην επιφάνειά του ή την άμεση καταστροφή του επιφανειακού οξειδωτικού φιλμ, όπου αυτό είναι παρόν.



Εικόνα 7. Εικόνες σωματιδίων φθοράς κόπωσης [4]

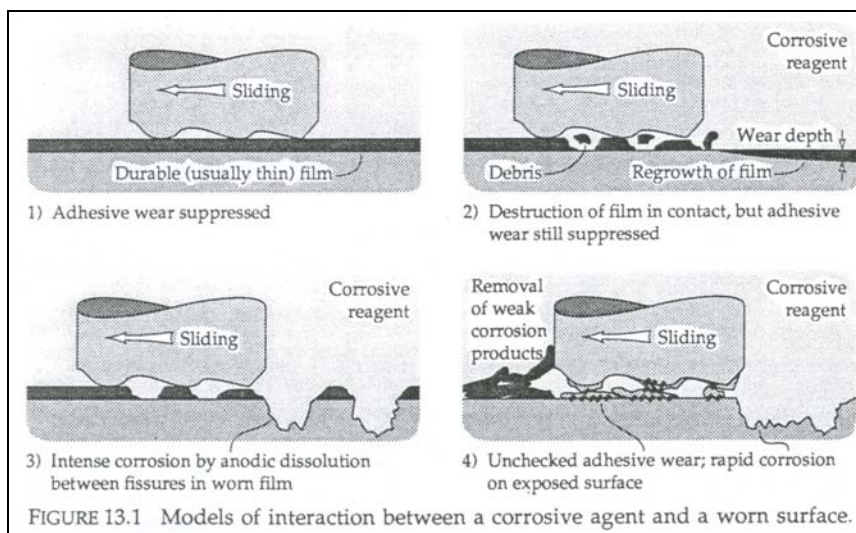
Το κύριο αίτιο φθοράς στο τριβοςύστημα που παρουσιάζεται, είναι η ανάπτυξη ρωγμών και η δημιουργία σωματιδίων φθοράς. Η ανάπτυξη ρωγμών είναι διαδικασία με χρονικό βάθος και απαιτεί πλήθος κύκλων φορτίσεως για την εξέλιξη και ολοκλήρωση της.

1.1.4 Τριβοχημική Φθορά (Corrosion) και Οξειδωτική Φθορά (Oxidative wear)

Η *φθορά χημικής διάβρωσης* προκαλείται από την χημική αντίδραση μεταξύ του στέρεου σώματος και ενός χημικά ενεργού μέσου. Σε αντιστοιχία, η οξειδωτική φθορά οφείλεται στην οξείδωση των μεταλλικών επιφανειών από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Η φθορά χημικής διάβρωσης μπορεί να εμποδίσει την ύπαρξη φθοράς από συνάφεια μέσω της δημιουργίας ενός φιλμ στην επιφάνεια του. Όταν ένα μέταλλο διαβρώνεται χημικά και παράγει το φιλμ στην επιφάνεια του ενώ αυτή ολισθαίνει, τότε μπορεί να συμβούν τα εξής:

- Η δημιουργία ενός ανθεκτικού λιπαντικού φιλμ που εμποδίζει την επιπλέον διάβρωση και φθορά.
- Η δημιουργία ενός λεπτού φιλμ το οποίο έχει μικρή διάρκεια ζωής κάτω από τις ολισθαίνουσες επιφάνειες και ρυθμό φθοράς σύμφωνα με την δημιουργία και καταστροφή του φιλμ. Ο συντελεστής τριβής μπορεί να πάρει μεγάλες και μικρές τιμές, ανάλογα με την κατάσταση.
- Φθορά του προστατευτικού φιλμ (π.χ. με αποφλοίωση) και μια απότομη σύνδεση μεταξύ των φιλμ που παραμένουν και του υποστρώματος μπορεί να επιτελέσει στην επιταχυνόμενη διάβρωση της φθαρμένης επιφάνειας.
- Η διάβρωση και η φθορά μπορεί να δρουν ανεξάρτητα και να προκαλέσουν απώλεια υλικού το οποίο προέρχεται και από τις δυο αυτές διαδικασίες.



Σχήμα 6. Μοντέλα αλληλεπίδρασης μεταξύ διαβρωτικού παράγοντα και φθαρμένης επιφάνειας [3]

Σχεδόν όλα τα μέταλλα κατά την παραμονή τους στην ατμόσφαιρα σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα οξειδίου το οποίο, κατόπιν, λειτουργεί ως προστατευτικό φιλμ από περαιτέρω οξείδωση. Ο όρος οξειδωτική φθορά αναφέρεται στην καταστροφή του οξειδωτικού φιλμ μέσω της σχετικής κίνησης των επιφανειών.

Ανάλογα με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, παρατηρείται δημιουργία ενός λεπτού φιλμ για χαμηλές θερμοκρασίες και ενός αντίστοιχα μεγάλου πάχους για υψηλές θερμοκρασίες, το οποίο από μόνο του αποτελεί πηγή φθοράς στην επιφάνεια.

1.1.5 Φθορά μηχανικής διάβρωσης (Erosive wear)

Η *φθορά μηχανικής διάβρωσης* προκαλείται από την σύγκρουση σωματιδίων σε ελεύθερη επιφάνεια στέρεου σώματος. Τυπικό παράδειγμα μηχανικής διάβρωσης είναι η φθορά στην οποία υπόκεινται τα πτερύγια των κινητήρων του αεροπλάνου όταν αυτό ταξιδεύει μέσα από σύννεφα σκόνης. Ανάλογα με την διεύθυνση, ταχύτητα, όγκο και μορφή των σωματιδίων τα οποία βάλλονται κατά της επιφάνειας, ενδέχεται να εμφανιστούν όμοιοι μηχανισμοί με αυτούς της φθοράς εκτριβής. Στο τμήμα αυτό θα εξεταστεί μόνο η μηχανική διάβρωση, η οποία προκαλείται από στέρα σώματα και όχι από υγρά.

Οι κύριοι μηχανισμοί φθοράς στο τριβοσύστημα μηχανικής διάβρωσης είναι οι εξής:

α) Τα σωματίδια βάλλονται σχηματίζοντας μικρές γωνίες με το επίπεδο επιφάνειας, εισάγοντας μηχανισμούς παραπλήσιους με την φθορά εκτριβής, όπως μικροκοπή κ.α.

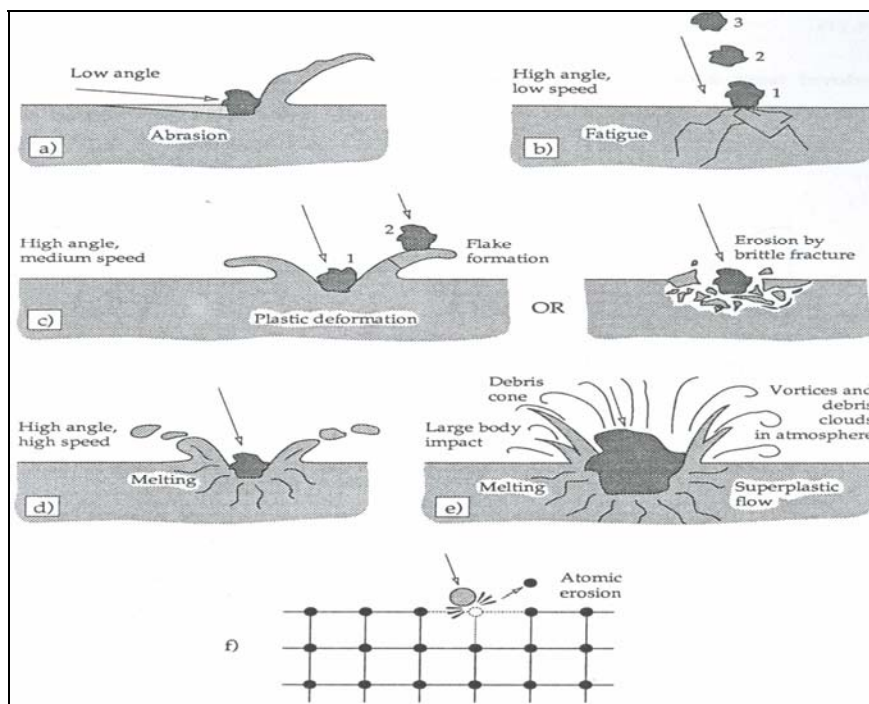
β) Τα σωματίδια βάλλονται σχεδόν κάθετα στην επιφάνεια του υλικού με σχετικά μικρές ταχύτητες. Η μικρή τραχύτητα των σωματιδίων δεν είναι δυνατόν να προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση της επιφάνειας του υλικού παρά μόνο μικρές ελαστικές παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα την κόπωση αυτού. Η κόπωση του υλικού γίνεται αντιληπτή από την δημιουργία πυκνού δικτύου ρωγμών στο εσωτερικό αυτού.

γ) Στην περίπτωση που τα σωματίδια βάλλονται με μεγαλύτερες ταχύτητες, παρατηρούνται δυο μηχανισμοί φθοράς, ανάλογα με τη μορφή των σωματιδίων. Για σωματίδια χωρίς απότομες αιχμές, παρατηρείται η εμφάνιση πλαστικών παραμορφώσεων και ο σχηματισμός νιφάδων στα άκρα του κρατήρα που δημιουργείται λόγω κρούσης. Οι νιφάδες δύναται να αποκολληθούν από το υλικό με νέα κρούση σωματιδίου σε αυτές. Όταν τα σωματίδια διαθέτουν ακμές, παρατηρείται είτε κοπή της επιφάνειας από αυτά, είτε ψαθυρός θρυμματισμός του υλικού.

δ) Για υψηλές ταχύτητες των σωματιδίων και διεύθυνση σχεδόν κάθετη στο επίπεδο της επιφάνειας, η ενέργεια της κρούσης είναι υψηλή. Ως αποτέλεσμα, ενδέχεται πέρα από την πλαστική παραμόρφωση του στέρεου να έχουμε άμεση τήξη αυτού και εισχώρηση του σωματιδίου στο υλικό.

ε) Ο πέμπτος μηχανισμός παρατηρείται σε μακροσκοπικό επίπεδο. Για σωματίδια μεγάλων διαστάσεων, εκτός από την τήξη του στην επιφάνεια παρατηρείται υπερπλαστική ροή του υλικού και δημιουργία κρατήρα στο σημείο κρούσης.

στ) Ο τελευταίος μηχανισμός αναφέρεται σε επίπεδο νάνο-κλίμακας και καλείται ατομική διάβρωση. Άτομα προσκρούουν στην ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή της επίπεδης επιφάνειας προκαλώντας την διάβρωση της.



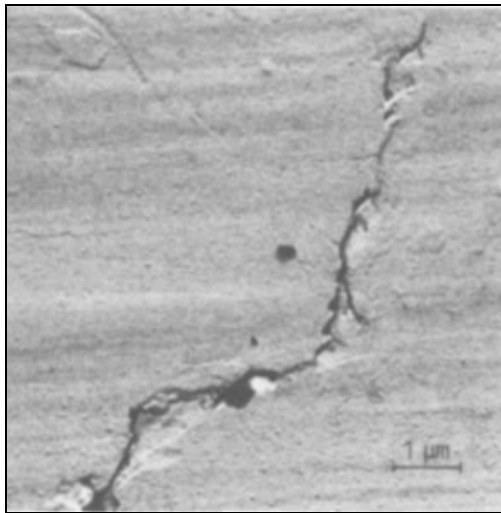
Σχήμα 7. Πιθανοί μηχανισμοί μηχανικής διάβρωσης: α) εκτριβής υπό μικρή γωνία, β) κόπωση επιφάνειας με μικρή ταχύτητα και μεγάλη γωνία, γ) ψαθυρή θραύση ή πλαστική παραμόρφωση με μεγάλη λόγω μεγάλης ταχύτητας και γωνίας πρόσκρουσης, δ) τήξη υλικού λόγω υψηλής ταχύτητας, ε) μακροσκοπική διάβρωση και δευτερεύουσες συνέπειες [3]

Από την παρουσίαση των κυρίαρχων μηχανισμών, κατέστη εμφανές ότι ο ρυθμός φθοράς και η παρουσία ή μη κάποιων μηχανισμών εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος, την ταχύτητα, την μορφή και τέλος την γωνία πρόσκρουσης των σωματιδίων. Επίσης οι μηχανικές ιδιότητες της επιφάνειας, όπως η σκληρότητα, επηρεάζουν την φθορά μηχανικής διάβρωσης.

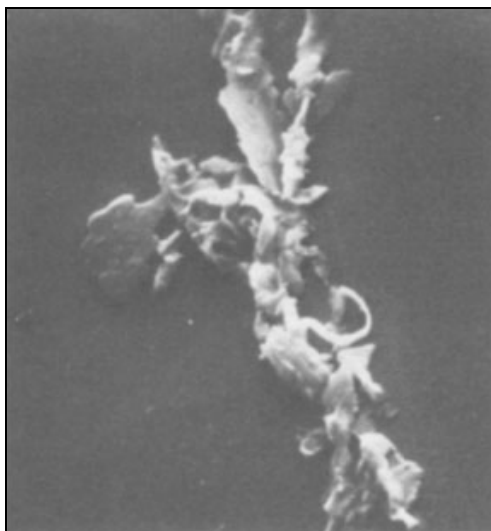
Επιπλέον, αξίζει να γίνει αναφορά σε έναν ακόμα μηχανισμό ο οποίος καθυστερεί την έναρξη της φθοράς. Παρατηρήθηκε ότι η φθοράς λόγω μηχανικής διάβρωσης δεν εκκινεί αμέσως. Αντίθετα υπάρχει ένα χρονικό διάστημα στην έναρξη της διάβρωσης, το οποίο καλείται χρονικό διάστημα *εκκόλαψης*, όπου δεν έχουμε φθορά – αποβολή υλικού. Μερικές φορές παρατηρείται ακόμα και μια αύξηση της μάζας του στερεού. Καθώς βάζονται τα πρώτα σωματίδια κατά της επιφάνειας εγκλωβίζονται στις ήδη υπάρχουσες ατέλειες και ενσωματώνονται στο στερεό, αυξάνοντας έτσι την μάζα του με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται φθορά. Κατόπιν τα νέα σωματίδια που βάζονται, απομακρύνουν τα αρχικά και κατόπιν αυτού εκκινεί η φθορά. Παρουσιάζεται λοιπόν μια χρονική καθυστέρηση της έναρξης της φθοράς μέσω ενός ιδιότυπου μηχανισμού κατά το αρχικό στάδιο.



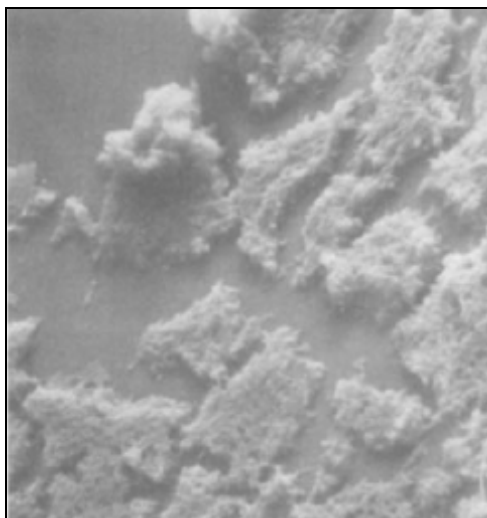
Εικόνα 7. Έναρξη φθοράς εξέλκωσης (scuffing) στην επιφάνεια οδοντωτού τροχού, [6]



Εικόνα 8 .Θραύση κόπωσης (fatigue wear) στην επιφάνεια οδοντωτού τροχού. Έναρξη φθοράς αποφλοιώσεως (pitting) [6]



Εικόνα 9 . Σωματίδια φυσιολογικής φθοράς εκτριβής (rubbing) [6]



Εικόνα 10. Σωματίδια φθοράς οξείδωσης [6]

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ύπαρξη άνω ορίου στον ρυθμό αύξησης της φθοράς συναρτήσει του αριθμού κρούσεων στην μονάδα του χρόνου. Η πιθανότερη εξήγηση του φαινομένου αυτού έγκειται στο γεγονός ότι όσο αυξάνει ο αριθμός των βαλλόμενων σωματιδίων, αυξάνουν και οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων τα οποία προσεγγίζουν την επιφάνεια για πρώτη φορά και αυτών που αναπηδούν μετά την κρούση με την επιφάνεια. Ως αποτέλεσμα, μέρος των σωματιδίων που βάλλονται δεν οδηγούνται τελικώς στην επιφάνεια η οδηγούνται με αρκετά μειωμένη ενέργεια.

1.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Φθορά

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα δοκιμών που δείχνουν την δραματική μείωση στη φθορά όταν μικρά σωματίδια φιλτραριστούν από το λιπαντικό. Δοκιμές της Glasier Metal Co 1985 [7]], έδειξαν ότι δεν είναι τα μεγαλύτερα σωματίδια (29 μm) τα πιο επικίνδυνα, αλλά αυτά στην περιοχή 3-13 μm και όταν απομακρύνονται η βελτίωση είναι δραματική.

Επίσης, από ανασκοπήσεις της εταιρείας SKF, τα πιο σημαντικά συμπεράσματα είναι:

- Η φθορά ήταν ανάλογη με την ποσότητα του ρύπου. .
- Οι ένσφαιροι τριβείς θα συνεχίζουν να φθείρονται, όσο το μέγεθος των σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από το πάχος του film του λιπαντικού.
- Για να υπάρξει σημαντική φθορά, η σκληρότητα των σωματιδίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την σκληρότητα του υλικού του τριβέα.

- Λεπτότερο φιλτράρισμα (με φίλτρο 3μm αντί για φίλτρο 40 μm) δίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (τυπικά 6 φορές μεγαλύτερη L10).
- Ο τριβέας θα έχει πρόβλημα συντομότερα, ακόμα και όταν μόνο για μία σύντομη περίοδο (έστω μισή ώρα) είχε εργαστεί σε ένα υψηλό επίπεδο ρυπαντών.

Η φθορά στα υδραυλικά συστήματα ισχύος, που οφείλεται σε ρύπανση, είναι λίγο διαφορετική από αυτήν στα συστήματα λίπανσης. Η μεταφορά ισχύος με υγρά εξαρτάται από τις πολύ μικρές ανοχές. Η προσαρμογή ανάμεσα σε ένα κύλινδρο και ένα πιστόνι ή βαλβίδα (spool valve) είναι μόνο λίγα μικρά. Αυτή η προσαρμογή είναι απαραίτητη για να μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις, 210 bar ή περισσότερο. Όμως οι πολύ μικρές αυτές ανοχές, όταν υπάρχουν έστω και μικρά επίπεδα ρυπαντών, δημιουργούν πολύ μεγάλες φθορές. [1]

Φρακαρίσματα (Jamming or seizing)

Τα περισσότερα οφείλονται σε έλλειψη λίπανσης και σε τοπική έντονη θερμοκρασία. Όσο και τα συντρίμματα μπορούν να προκαλέσουν φρακαρίσματα περιστρεφόμενων εξαρτημάτων, όταν αυτά είναι αρκετά μεγάλα. Συνήθως αυτό που συμβαίνει, είναι ότι κάτι άλλο έχει προκαλέσει κάποια φθορά, και τα συντρίμματα που παρήχθησαν δημιούργησαν το φρακάρισμα άλλων εξαρτημάτων. [1]

Μπλοκαρίσματα / Φραξίματα (Blocking)

Με τον όρο μπλοκάρισμα εννοείται η μερική ή πλήρης μείωση ενός μικρού στομίου ή μίας θυρίδας. Συνήθως δεν οφείλεται σε ένα σωματίδιο, αλλά στην συσσώρευση πολλών λεπτών σωματιδίων (<5μm), τα οποία σχηματίζουν μία λάσπη (silt). Μπλοκαρίσματα μπορούν να οφείλονται και στους μαγνητικούς συλλέκτες ρινισμάτων, εάν δεν εξετάζονται συχνά. Η ροή τότε μπορεί να αποκόλλησει ένα αρκετά μεγάλο συσσωμάτωμα, που μπορεί να φράξει κάποιο στόμιο. Εάν το σταμάτημα μίας μηχανής εξαιτίας της ρύπανσης είναι μία παροδική κατάσταση ή μία καταστροφή, εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως π.χ. η λεπτότητα (fineness) της μηχανικής διαδικασίας, η σοβαρότητα της ζημιάς, οι ανθρώπινες ζωές, κλπ. [1]

2. ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΒΛΙΤΤΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΓΡΩΝ

Το μεγάλο πλεονέκτημα της παρατήρησης ενός υγρού, είναι ότι το υγρό είναι ήδη ένα έτοιμο κύκλωμα επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων μερών του μηχανικού συστήματος. Είναι εξαιρετικά πιθανό να μεταφέρει τις αποδείξεις σφαλμάτων από διάφορες θέσεις σε κάποιο σημείο όπου μπορεί να εγκατασταθεί μία μετρητική διάταξη.

Κατά κάποιο τρόπο αυτό μπορεί να είναι ένα μειονέκτημα. Η ακριβής θέση ενός προβλήματος δεν είναι άμεσα προσδιορίσιμη. Εξάλλου, περισσότερα προβλήματα

μπορεί να υπάρχουν από διαφορετικά εξαρτήματα και ο συνδυασμός τους μπορεί να δημιουργεί σύγχυση. Παρόλα αυτά, η σκέψη ότι «εάν υπάρχει κάποιο σφάλμα, τότε αυτό θα ανιχνευθεί» απαλείφει το μειονέκτημα που αναφέρθηκε πιο πάνω. Επομένως έχουμε μία μέθοδο μέτρησης από απόσταση (remote logging method), που δεν απαιτεί καλώδια ή ραδιοκύματα, αλλά το υγρό που ήδη υπάρχει μέσα στο σύστημα.

Παρότι συνήθως η παρατήρηση ενός υγρού θα δώσει ενδείξεις κινδύνου για όλο το κύκλωμα του υγρού, υπάρχουν τρόποι να προσδιοριστεί η προέλευση. Μία τέτοια μέθοδος είναι να υπάρχει ένας αριθμός από σημεία δειγματοληψίας σε όλο το σύστημα, και πριν και μετά από κρίσιμα εξαρτήματα και φίλτρα. Θα υπάρχει ακόμα αρκετή ποσότητα στοιχείων από όλα τα εξαρτήματα, αλλά η συγκέντρωση θα είναι μεγαλύτερη ακριβώς μετά από ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Στα κυκλικά συστήματα λίπανσης το πρόγραμμα φασματογραφικής ανάλυσης λαδιού(SOAP) έχει αποδειχτεί πολύτιμο σε πολλές περιπτώσεις. Αντί να εξάγουμε το απόβλητο από το λάδι, όλο το δείγμα λαδιού υπόκειται σε ανάλυση. Οι επόμενες ενδεχόμενες απώλειες μπορούν να ανιχνευτούν με αυτόν τον τρόπο:

- Σπασμένα πιστόνια, φθαρμένα ή λιωμένα τοιχώματα κυλίνδρων, φθαρμένοι οδηγοί βαλβίδων
- Φθαρμένα ρουλεμάν
- Φθαρμένοι εκκεντροφόροι
- Ρωγμή στα πιστόνια υδραυλικών κυλίνδρων

Αν και αυτή η μέθοδος είναι καλή για απόβλιττα πολύ μικρού μεγέθους στο λάδι, δεν είναι πρακτική για μεγαλύτερα κομμάτια. Εξετάζοντας το σχήμα, την υφή της επιφάνειας, και την χημική σύσταση μεγαλύτερων κομματιών, μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμες πληροφορίες για την φθορά διαφόρων μηχανικών μερών.

Τα απόβλιττα μπορούμε να τα μαζέψουμε αφήνοντας τα να πέσουν σε μια γυάλινη επιφάνεια. Τότε μπορούμε να τα διαχωρίσουμε κάπως καλύτερα πάνω στην διαφάνεια και να τα παρατηρήσουμε από το μικροσκόπιο. Στα συστήματα λίπανσης, ένα φίλτρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συλλέξουμε τα απόβλιττα, τα οποία μπορούμε στη συνέχεια να τα ξεπλύνουμε με διαλυτικό. Η φερρογραφία που αναπτύχθηκε το 1970 χρησιμοποιεί ένα μαγνητικό πεδίο για να μαζεύει τα σίδηρο-μαγνητικά υλικά από ένα υγρό. Το υγρό πέφτει σε μια γυάλινη επιφάνεια η οποία βρίσκεται υπό κάποια κλίση και κατά μήκος της οποίας εφαρμόζεται το μαγνητικό πεδίο με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται κατά μήκος της επιφάνειας μια απότομη μαγνητική κλίση. Με αυτό τον τρόπο τα κομμάτια διαχωρίζονται κατά μέγεθος. Τα σιδηρούχα απόβλιττα διαχωρίζονται κατά σειρές, με τα μεγαλύτερα απόβλιττα στην μια άκρη. Όσα απόβλιττα έχουν λιγότερες μαγνητικές ιδιότητες εναποθέτονται τυχαία.

Φυγοκεντρίζοντας τα απόβλιττα που βρίσκονται στο λάδι-διαλυτικό, τα μεταλλικά κομμάτια διαχωρίζονται σύμφωνα με τον όγκο τους και σε στρώματα. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, το υγρό αδειάζετε σε ένα δοχείο και τα απόβλιττα απομακρύνονται με την χρήση διαλυτικού. Στην συνέχεια το υγρό ρίχνεται σε γυάλινη επιφάνεια ενώ τα κομμάτια διασκορπίζονται μόλις το διαλυτικό συμπυκνωθεί.

Ωστόσο στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι ένας ακόμη τρόπος προκειμένου να συλλέξουμε τα απόβλιττα στο λάδι ενός κινητήρα είναι με την τοποθέτηση φίλτρου λαδιού σε αυτόν. Συνήθως βέβαια το χρησιμοποιούμε προκειμένου απλώς να απομακρύνουμε τα απόβλιττα από το λάδι έτσι ώστε να μην βλάψουν την ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Είναι μια πολύ απλή μέθοδος και φτηνή επίσης, που μπορεί να μας ειδοποιήσει μερικές φορές για την ενδεχόμενη αστοχία. Βέβαια περιέχει και αυτή η μέθοδος σημαντικά μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι γίνεται με χειρωνακτικό τρόπο ή ότι το γεγονός πως σε πολλές μηχανές για να το απομακρύνουμε πρέπει να διακοπεί η λειτουργία της.

Οι μαγνητικές συσκευές ή ανιχνευτές αποβλίττων αρχικά είχαν δημιουργηθεί μόνο για την απομάκρυνση των μεταλλικών σωματιδίων από τα συστήματα λίπανσης και να περιορίσουν την ζημιά στους κινητήρες. Ωστόσο πλέον είναι διαθέσιμες και συσκευές οι οποίες μπορούν εύκολα να απομακρύνουν τα απόβλιττα για να μπορέσουμε να τα εξετάσουμε.

Η φασματογραφική ανάλυση του λαδιού (Spectrographic Oil Analysis Programm, SOAP) δίνει ποσοτικά αποτελέσματα ως προς την συγκέντρωση συγκεκριμένων στοιχείων: η συστηματική δειγματοληψία και ανάλυση μπορούν να μας υποδείξουν τον ρυθμό παραγωγής αποβλίττων από την αύξηση στοιχείων όπως σίδηρος, χρώμιο και μόλυβδος. Το SOAP είναι σχετικά ακριβό, αν και το κόστος για κάθε δείγμα μπορεί να είναι πολύ χαμηλό εάν μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για περισσότερες μηχανές.

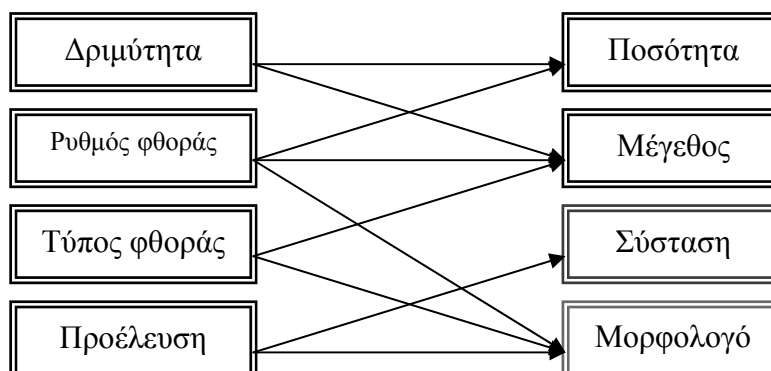
Οι τεχνικές ανάλυσης των σωματιδίων φθοράς που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς είναι αρκετές και πολλές φορές χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση ανάλογα με την έρευνα την οποία επιθυμούμε να κάνουμε. Το εύρος τους ποικίλει από τις πλέον απλές, ως τις πλέον σύνθετες. Η οπτική μικροσκοπία είναι μια από τις πιο απλές αλλά και συγχρόνως πιο εύχρηστες μεθόδους. Συνίσταται στην παρατήρηση των αποβλίττων από ένα οπτικό (μεταλλογραφικό) μικροσκόπιο. Στην ηλεκτρονική, μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) αποτελούνται από μια δέσμη ηλεκτρονίων η οποία δημιουργείται από μια πηγή ηλεκτρονίων, διέρχεται μέσω μιας σειράς μαγνητικών φακών, επιταχύνεται, συγκεντρώνεται και εστιάζεται πάνω στα υπο εξέταση απόβλιττα τα οποία σαρώνονται από την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων και τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια του δοκιμίου ηλεκτρόνια, συλλέγονται και ενισχύονται ώστε να δημιουργήσουν ένα οπτικό σήμα. Η περίπτωση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διερχόμενης δέσμης (Transmission Electron Microscope, TEM), διαφέρει από αυτήν του SEM στο ότι η ηλεκτρονική δέσμη διαπερνά το εξεταζόμενο δοκίμιο και η απεικόνιση του υλικού προκύπτει από την διαθλώμενη δέσμη και όχι από την εκπεμπόμενη από το δοκίμιο δέσμη, όπως στη περίπτωση του SEM. Υπάρχουν βέβαια και άλλες τεχνικές, όπως είπαμε, αλλά δεν μπορούμε να τις περιγράψουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, διότι εκφεύγει του σκοπού της.

Παρακάτω παρουσιάζουμε με μορφή πίνακα τις δυνατότητες που μας παρέχουν διάφορες τεχνικές ανάλυσης αποβλίτων λόγω φθοράς, ως προς τις βασικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν ένα απόβλιττο.

Μέθοδος	Εύρος (μm)	ποσότητα	μέγεθος	μορφολογία	σύνθεση	σχόλιο
Φασματογραφική ανάλυση λαδιού	<10	X	-	-	-	Υποδεικνύεται η προέλευση
Μέτρηση αποβλίττων	1 -150	X	X	-	-	Δεν διαγνώσκει την σύνθεσή τους
Μαγνητικές μέθοδοι	100 - 1000	X	X	X	X	Τυχαία κατανομή στο υπόστρωμα
Φερρογραφία	1-100	X	X	X	X	Διαχωρισμός κατα μέγεθος και μαγνητικές ιδιότητες

Μέθοδοι ανάλυσης αποβλίττων φθοράς

Τα κριτηρία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των αποβλίττων, ποικίλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της φθοράς που επιθυμούμε να προσδιοριστούν. Έτσι για την ανάλυση της φθοράς, τα κύρια χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι η ποσότητα, το μέγεθος, η σύστασή τους και η μορφολογία τους. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σχέση μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών των αποβλίττων και των χαρακτηριστικών της φθοράς.



Σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών φθοράς και των χαρακτηριστικών αποβλίττων

Τρεις τύποι **ξένων ουσιών** υπάρχουν μέσα σε ένα ρευστό: υγρές, αέριες και στερεές. Συνήθως είναι αρκετά διακριτές μεταξύ τους. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, είναι δύσκολο να διαφοροποιηθούν μεταξύ τους, όπως στη λάσπη, ή όταν τα αέρια είναι μερικώς απορροφημένα από τις άλλες δύο καταστάσεις. [1]

i. Υγρές: Υπάρχουν πολλά πρόσθετα μέσα σε ένα λιπαντικό (αντιτριβικά, αντιδιαβρωτικά, αντιοξειδωτικά, αντιαφριστικά, αναστολείς αέριας φάσης, βελτιωτικά ιξώδους), τα οποία δεν είναι «ξένα» σώματα. Υπάρχουν για να βοηθούν το υγρό να διαρκέσει όσο το δυνατόν περισσότερο και ταυτόχρονα να επιμηκύνουν την ζωή των μηχανών, αλλά μπορεί να παρουσιάζουν κινδύνους σε αναλυτές συντριμμάτων φθοράς. Είναι δυνατόν να βρίσκονται στα αποτελέσματα μίας δοκιμής (submicron spectrometric analysis), συνήθως είναι μικρότερα από μm, όπου θα φαίνονται σαν ξεχωριστά στοιχεία.

Oil Additive	Purpose	Comments
Anti-oxidation	To slow down the formation of oil oxidation which produces lacquers	Inactive compounds are formed instead, but the additives are used up in the process
Anti-wear	To improve the metal surfaces, so that wear is reduced	An adsorbed film is produced on the metal surfaces
Corrosion Inhibitor	To counteract the development of acids	A high alkalinity is given to the oil, but this gradually reduces ineffectiveness
Demulsifier present	To separate the water from the oil	This is used up in proportion to the water
Extreme Pressure Agent	To improve the surface of the metal under pressure	A chemical reaction is caused by the additive
Viscosity Index Improver	To reduce the change in viscosity with temperature	Long chain polymers which open up with temperature. A high shear environment gradually breaks the polymers

Πίνακας 1. Τυπικά πρόσθετα ελαίων [1]

Η συμβατότητα του λιπαντικού ή του υδραυλικού υγρού με τα εξαρτήματα και τα παρεμβάσματα είναι συνήθως ένα σοβαρό πρόβλημα. Για κάθε μηχανή και κάθε υγρό πρέπει να ακολουθούνται οι οδηγίες του κατασκευαστή, ειδάλως συντρίμματα θα σκορπιστούν παντού. Κομμάτια παρεμβασμάτων, όπως και διαλυμένο μέταλλο, μπορεί να οδηγήσουν έναν αναλυτή σε λάθος συμπεράσματα.

ii. Αέριες: Ο αέρας είναι το πρωτεύον ξένο αέριο. Ο αέρας είναι παρόν σε κάποιο βαθμό σε όλα τα υγρά. Υπάρχει μία φυσική απορρόφηση, το επίπεδο της οποίας εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση. Πρόβλημα υπάρχει όταν η περιεκτικότητα αέρα δημιουργεί φυσαλίδες και η συμπιεστότητα αλλάζει, οπότε αυξάνεται σημαντικά η πιθανότητα διάβρωσης.

Εάν η περιεκτικότητα αέρα μετρηθεί και βρεθεί υπερβολική, τότε είναι πολύ πιθανό η ροή του υγρού να είναι τυρβώδης (πιθανόν λόγω της σχεδίασης του συστήματος) και μάλλον δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα σχετικά με την κατάσταση της μηχανής. Άλλη πιθανότητα είναι ο αέρας να μπαίνει μέσα στο σύστημα επειδή το επίπεδο του υγρού είναι χαμηλό ή επειδή υπάρχει διαρροή ή επειδή η σχεδίαση του δοχείου λαδιού δεν είναι καλή.

iii. Στερεές (Debris): Ο αγγλικός όρος debris πάντα υπονοεί ένα «στερεό» ξένο σώμα. Στερεό με την έννοια ότι δεν είναι υγρό ή αέριο. Μπορεί να έχει κοιλότητες (διογκωμένο) ή να έχει ανώμαλη επιφάνεια. Στην μηχανολογία τα συντρίμματα

μπορούν να θεωρηθούν ότι προέρχονται από ένα μηχανικό εξάρτημα, αλλά αυτό δεν αληθεύει πάντα. Μπορεί επίσης να θεωρηθούν και τα άλλα στερεά σωματίδια που είναι παρόντα στο υγρό σαν ξένα σώματα.

Μία εναλλακτική λέξη είναι 'πρόσμιξη' (μόλυνση, contaminant) αν και πιο συχνές χρήσεις αυτής της λέξης σχετίζονται με ραδιενεργά ή χημικά αποτελέσματα. Η φράση συντρίμματα φθοράς (wear debris) είναι πιο ευκρινής, παρόλο που ξανά μπορεί να παρερμηνευθεί γιατί μπορεί να αναφέρεται και σε σωματίδια που δημιουργήθηκαν από μηχανολογικά εξαρτήματα χωρίς να υπάρχει 'τριβή' πχ. θραύση, κόπωση, απόρριψη (dislodged).

Τα συντρίμματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- *Εγκλεισμένα συντρίμματα / σωματίδια (Built-in Debris)*

Όλες σχεδόν οι κατεργασίες παράγουν συντρίμματα. Ακόμη και διαδικασίες παραμόρφωσης δημιουργούν μικροσκοπική απολέπιση πάνω στην επιφάνεια. Είναι αλήθεια ότι σε κάθε καλά κατασκευασμένο μηχανισμό, απαιτείται προσεκτικός καθαρισμός πριν την συναρμολόγηση, αλλά κατά κανόνα μία μεγάλη ποσότητα συντριμμάτων εγκλείεται μέσα στην μηχανή λόγω της συναρμολόγησης. Από την απλή κίνηση της ένωσης ενός συνδέσμου με σπείρωμα από ανοξείδωτο ατσάλι, παράγονται χιλιάδες σωματίδια. Τα σωματίδια είναι τις περισσότερες φορές αόρατα στο γυμνό μάτι, που μπορεί να δει μόνο 40 μm και άνω.

- *Παραγόμενα συντρίμματα / σωματίδια (Generated Debris)*

Τα παραγόμενα συντρίμματα είναι τα τυπικά συντρίμματα φθοράς. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται και μερικοί άλλοι σχετικοί τύποι. Παρά την λίπανση σε σημεία που εξέχουν συμβαίνει μία βαθμιαία διαδικασία φθοράς. Απελευθερώνονται σκλήθρες (slivers) μετάλλου, και μεγάλες ποσότητες λάσπης (silt) από το 'στρώσιμο' της μηχανής εισέρχονται στο υγρό. Αυτό μπορεί να μην είναι πολύ καταστροφικό για το σύστημα, μπορεί στην πραγματικότητα να βελτιώνει την διαδικασία στρωσίματος, αλλά τα σωματίδια είναι εκεί και πρέπει να τα παγιδεύσουμε και να τα ελέγξουμε.

Ο ρυθμός φθοράς είναι αρκετά μεγάλος στο αρχικό στάδιο λειτουργίας μιας μηχανής, επειδή τα εξαρτήματα δεν ταιριάζουν απόλυτα, και υπάρχουν προεξοχές που πρέπει να απομακρυνθούν (στρώσιμο της μηχανής). Ευτυχώς αυτή η περίοδος είναι μικρή και υπάρχει γρήγορη μείωση στον ρυθμό φθοράς. Στην δεύτερη περίοδο (κανονική λειτουργία) υπάρχει μικρός ρυθμός φθοράς, και όλα βαίνουν ομαλά. Μπορεί να αυξάνεται λίγο η φθορά, αλλά συνήθως είναι ασήμαντη. Η τελευταία περίοδος είναι όταν η μηχανή είναι σε τόσο άσχημη κατάσταση, ώστε υπάρχουν απευθυγραμμίσεις και υπερτάσεις, που τελικά οδηγούν στην καταστροφή του εξαρτήματος ή του συστήματος.

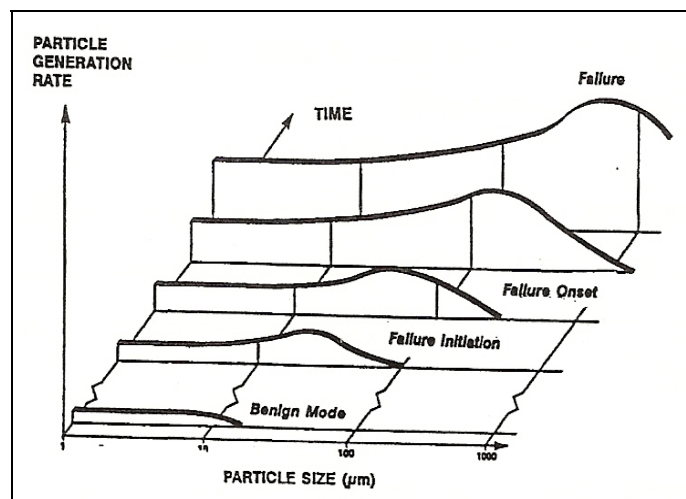
Μία τυπική εφαρμογή αυτής της διαδικασίας αποτελούν τα σύγχρονα υδραυλικά συστήματα, όπου η έμφαση είναι να συγκρατείται η φθορά των εξαρτημάτων του συστήματος στον ρυθμό «καλοήθους» φθοράς και παρακολουθώντας τα επίπεδα των σωματιδίων προκειμένου να ανιχνευθεί τότε ο αριθμός τους έχει αυξηθεί σημαντικά, να μπορούν να γίνουν έγκαιρα διορθωτικές κινήσεις για να αποκατασταθεί η ασφαλής λειτουργία. Εάν η ανάλυση της τεχνικής που επελέγη είναι

αρκετά ευαίσθητη, τότε η επιπλέον φθορά που οφείλεται στην λειτουργία σε αυτά τα υψηλότερα επίπεδα θα είναι ελάχιστη. Η μορφή παρακολούθησης που χρησιμοποιείται, γιαυτό, πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητη για να ανιχνεύει τα αυξημένα επίπεδα μικρών σωματιδίων <15μm.

Ένας άλλος τύπος συντριμμάτων, που μας ανησυχεί περισσότερο, είναι αυτά που περιλαμβάνουν τα μεγαλύτερα κομμάτια (chunks) που προέρχονται από κόπωση και μεγάλες καταπονήσεις (over stress). Δεν είναι απαραίτητα τόσο πολύ μεγάλα, αλλά είναι μεγαλύτερα από τα 5 μm των σωματιδίων λάσπης. Είναι ξεχωριστά και πρέπει να τα αντιστοιχίσουμε σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο στο σύστημα.

Κάποια άλλα σωματίδια θα οφείλονται σε τήξη. Απλά ρουλεμάν από λευκά μέταλλα χαμηλού σημείου τήξης και άλλα κράματα μπορούν να λιώσουν εξαιτίας τοπικών θερμών σημείων και να ανασχηματιστούν σαν σφαιρίδια μέσα στο λάδι.

Το Σχήμα 8 δίνει μια εξαιρετική περιγραφή της αλλαγής στον ρυθμό παραγωγής συντριμμάτων κατά την διάρκεια της ζωής ενός συστήματος.



Σχήμα 8. Ρυθμός παραγωγής συντριμμάτων κατά τη διάρκεια ζωής ενός συστήματος [1]

- *Εισερχόμενα σωματίδια (Ingested Debris)*

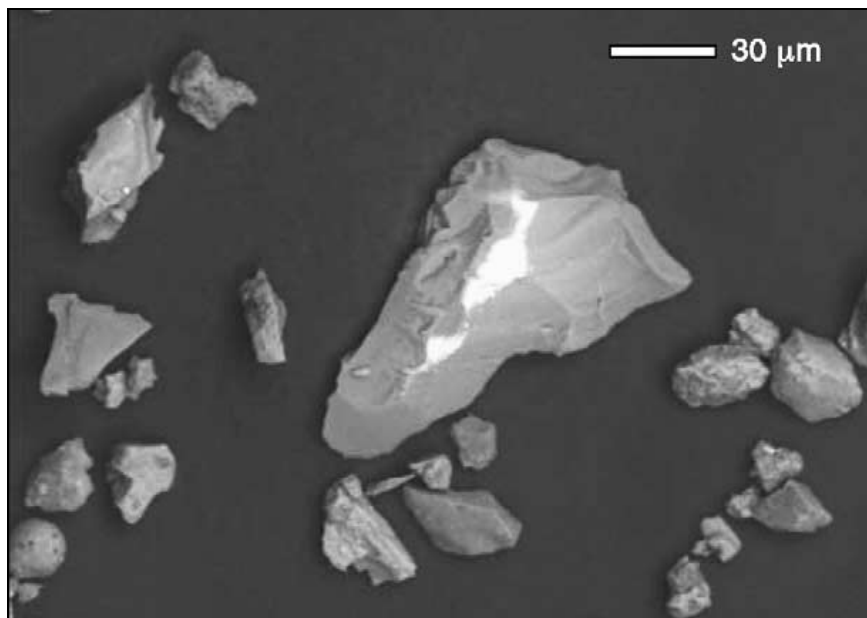
Ιδεώδες θα ήταν τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα να ήταν τελείως απομονωμένα από το κύκλωμα υγρού του συστήματος. Παρόλα αυτά, αυτό δεν είναι καθόλου εύκολο σε ένα πραγματικό σύστημα και γενικά σωματίδια από τον περιβάλλοντα αέρα εισέρχονται στο σύστημα. Ο έλεγχος και ο περιορισμός της ρύπανσης είναι μια από τις βασικότερες διαδικασίες συντήρησης, η οποία μπορεί να υποβοηθηθεί σημαντικά με την τριβολογική ανάλυση. [18]

2.1 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (PARTICLES)

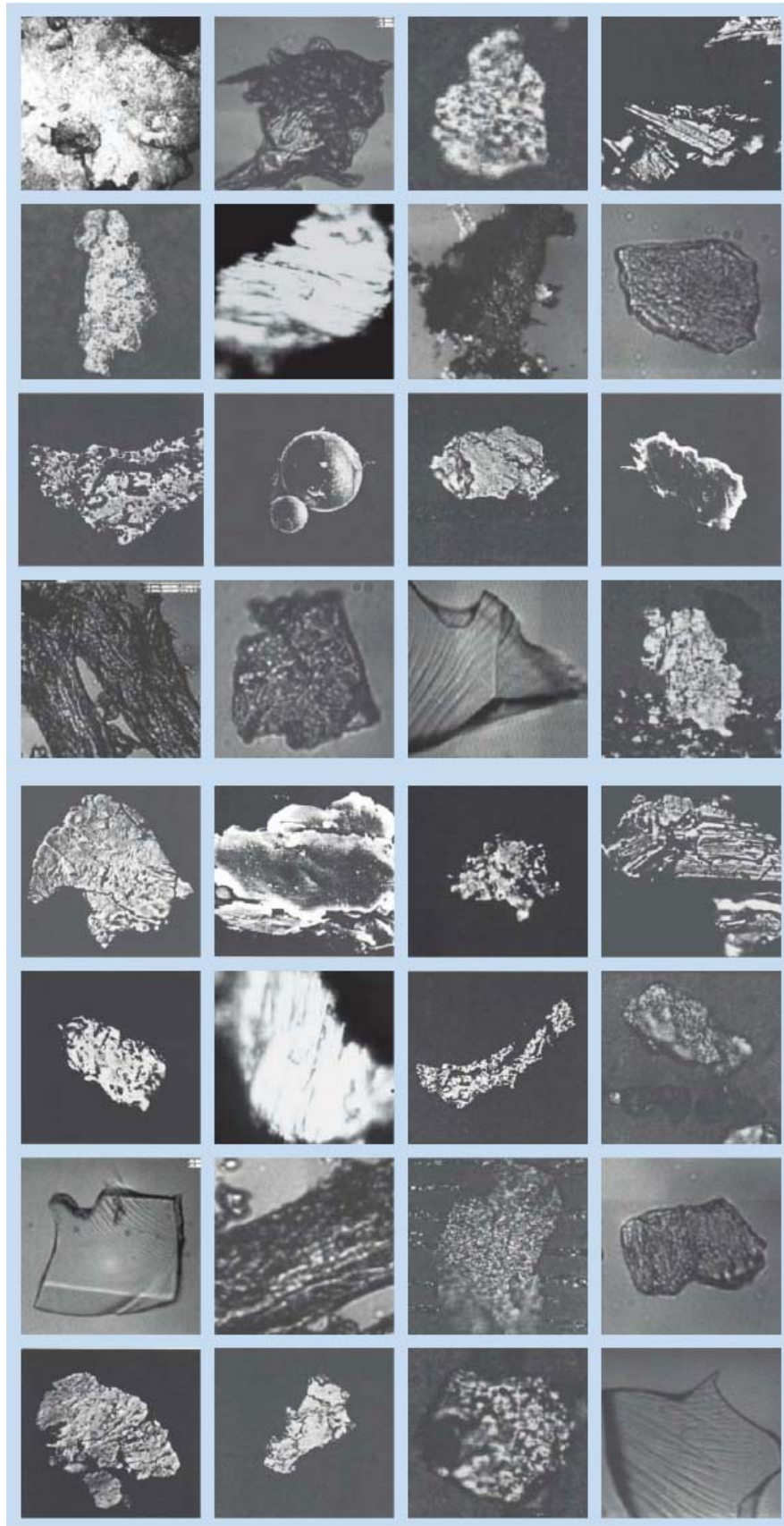
2.2 Τύποι Σωματιδίων

Επτά διαφορετικοί τύποι σωματιδίων περιγράφονται στην συνέχεια. Όλοι βασίζονται στην εμφάνιση του σωματιδίου, αλλά και στην πιθανή προέλευσή τους. Το μέγεθος τους γενικά κυμαίνεται μεταξύ του υποπολλαπλάσιου του μm έως και ένα ή δύο mm.

Πρέπει να τονιστεί όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, ότι σε ένα προς εξέταση δείγμα είναι σχεδόν αδύνατο να μην υπάρχουν στοιχεία από ατμοσφαιρικούς παράγοντες (σκόνη). Τα μικροσωματίδια σκόνης θα πρέπει να αναγνωριστούν και να μη συμπεριληφθούν βεβαίως στην μετέπειτα επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των ρινισμάτων. Μια χαρακτηριστική μορφή των σωματιδίων σκόνης είναι αυτή που φαίνεται στις εικόνες 11 και 12 που ακολουθούν.

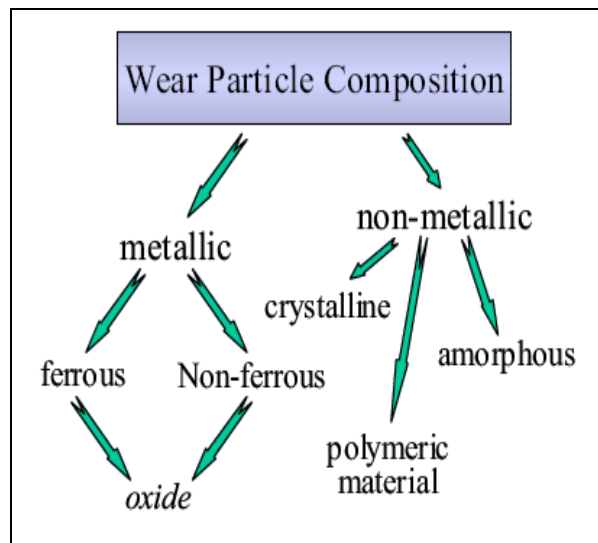


Εικόνα 11. Χαρακτηριστικό σχήμα σωματιδίων σκόνης [8]

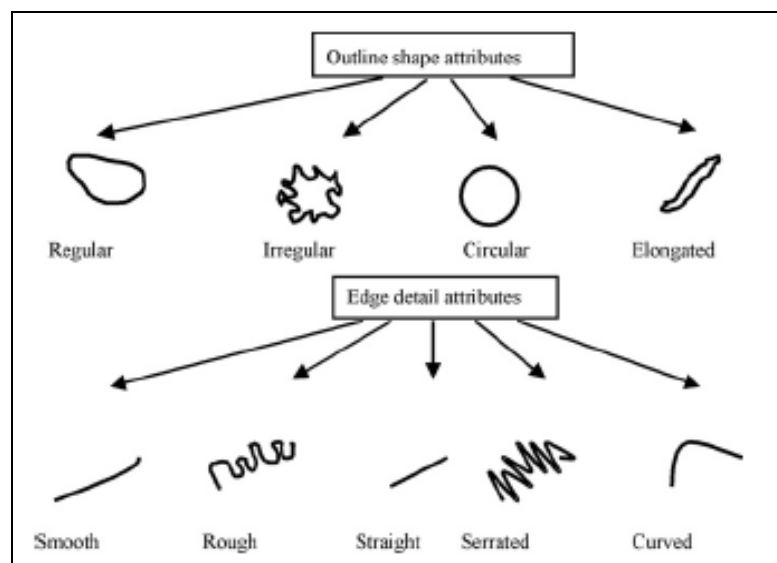


Εικόνα 12. Εικόνες των βασικών δομών σωματιδίων φθοράς [9]

Οι διάφοροι τύποι σωματιδίων διακρίνονται ως προς τη δομή τους σύμφωνα με τα παρακάτω σχήματα.










Σχήμα 9. Σύνθεση χαρακτηριστικών σωματιδίων φθοράς [10]



Σχήμα 10. [1] Διάκριση σωματιδίων φθοράς βάση σχήματος και εξωτερικού σχήματος

Μία απολοποιημένη παράστασή τους εμφανίζεται στον Πίνακα 2. Στην πράξη, εμφανίζεται μεγάλος βαθμός επικάλυψης, αλλά η παράσταση του πίνακα βοηθά, όταν εξετάζονται σωματίδια κάτω από το μικροσκόπιο.

Particle shape	Typical names	Some possible origins
	Spheres	Metal fatigue
	Distorted smooth ovoids	Quarry dusty Atmosphere dust
	Chunks and slabs	Metal fatigue Bearing pitting Rock debris
	Platelets and flakes	Running in metal wear Paint Copper in grease
	Curls, spirals and slivers	Machining debris produced at high temperature
	Rolls	Probably similar to platelets but in a rolled form
	Strands and fibres	Polymers, cotton and wood fibres Occasionally metal

Πίνακας 2. Τύποι Σωματιδίων [1]

- *Σφαίρες* Η παρουσία τους στα λάδια είναι πολύ συνηθισμένη. Για την προέλευσή τους φαίνεται να υπάρχουν τρεις πιθανότητες και μόνο η εφαρμογή και η ιστορία της μηχανής θα μας δώσει ποια είναι σωστή.

Σφαίρες σχηματίζονται κατά το «στρώσιμο» μίας μηχανής, π.χ. κινητήρας diesel. Σε σχετικές αναλύσεις, οι Jim, Wang, (1989) βρήκαν μία διακύμανση στο μέγεθος από 1 έως 20 μm, επιφάνεια από λεία έως άγρια και πολύ ζαρωμένη, και συμπαγείς όσο και κοίλες σφαίρες.

Λείες σφαίρες, (μικροσφαίρες 1-5 μm), βρέθηκαν τα πρώτα λίγα λεπτά της περιόδου στρωσίματος. Πρέπει να ήταν παρούσες πριν το ξεκίνημα (εξαιτίας προηγούμενων κατεργασιών και συγκολλήσεων).

Η κύρια λειτουργία φθοράς / τριβής κατά το στρώσιμο εμφανίζεται την πρώτη έως πέμπτη ώρα μετά το ξεκίνημα. Σε αυτό το διάστημα παρήχθη ένας μεγάλος αριθμός σφαιρών με άγρια επιφάνεια (1-12 μm), λόγω των μεγάλων φορτίων.

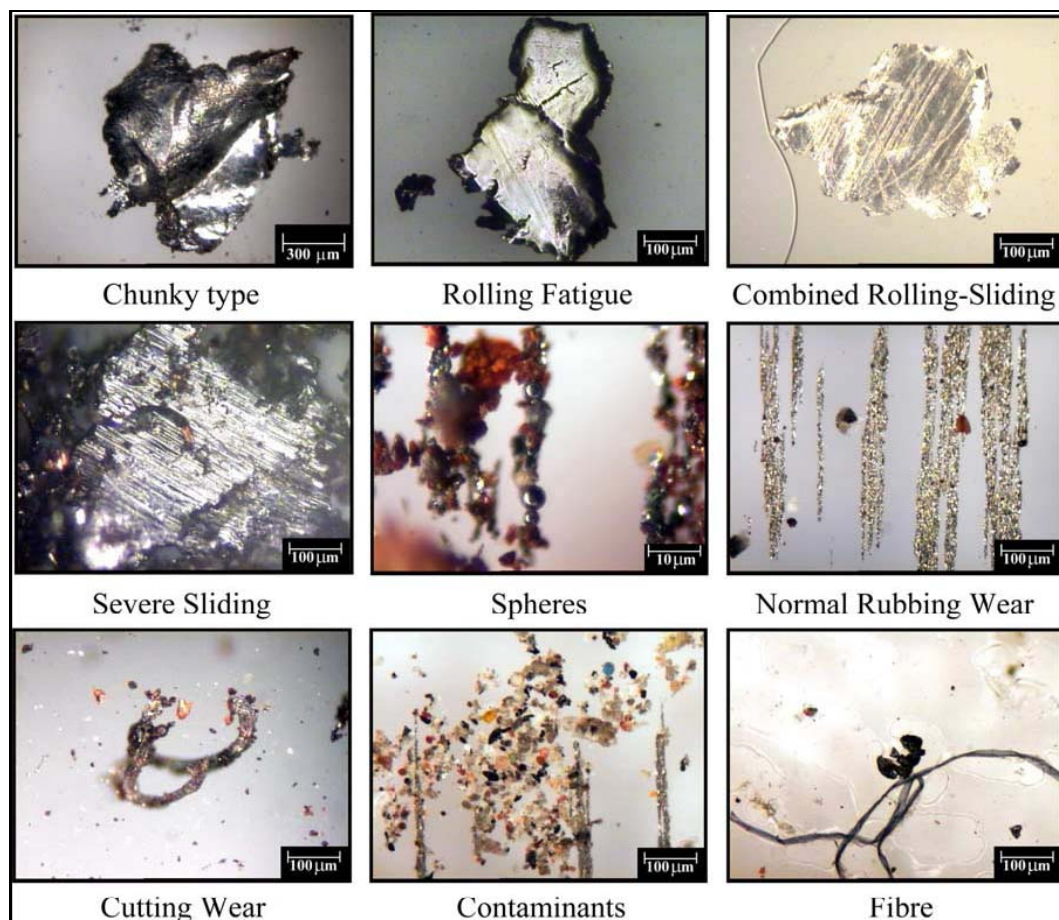
Σφαίρες λείες δημιουργούνται επίσης από ρωγμές κόπωσης τριβέων (bearing fatigue cracks), και είναι τα νωρίτερα σημάδια της κόπωσης. Συνήθως είναι μικρότερες από 3 μm και δημιουργούνται κατά εκατομμύρια στην περιοχή μίας ρωγμής από την κίνηση των σφαιρών ή των κυλίνδρων του τριβέα.

- *Βότσαλα (Pebbles)* Αυτά είναι λεία σαν βότσαλα, χονδρά σωματάρια. Είναι ημιδιάφανα (quartz, siliceous) και προέρχονται συνήθως από την σκόνη ενός

λατομείου. Πρέπει να εμποδίζονται από το να εισέλθουν σε μία μηχανή με κατάλληλο φίλτράρισμα του αέρα και των εξαεριστικών (breathers).

- *Χονδρά Σωματίδια (Chunks) και Πλάκες (Slabs)* Προέρχονται από μεταλλικές επιφάνειες λόγω κόπωσης, που οφείλεται σε υπερφόρτωση ή ελλiptική λίπανση.
- *Νιφάδες (Flakes, Platelets)* Οι νιφάδες (ή πλακίδια-Platelets) προέρχονται από το στρώσιμο και την φυσιολογική φθορά της μηχανής. Άλλη πηγή είναι εισερχόμενες νιφάδες από χρώμα ή σκουριά (ή η σκουριά που δημιουργείται μέσα στην μηχανή).
- *Βόστρυχοι (Curls), Σπείρες (Spirals) και Σκλήθρες (Slivers)* Αυτά είναι τα πιο τυπικά συντρίμμια από μηχανουργικές κατεργασίες.
- *Κύλινδροι (Rolls)* Όμοια με τα πλακίδια αλλά σε κυλινδρική μορφή.
- *Νήματα και Ίνες* Συνήθως είναι πολυμερείς ίνες, ή ίνες από βαμβάκι ή ξύλο και προέρχονται από την ατμόσφαιρα. Δημιουργούν πρόβλημα στα φίλτρα. Επίσης μεταλλικές βελόνες μπορεί να έχουν μείνει από το φινίρισμα. [1]

Άλλη μια συλλογή χαρακτηριστικών σωματιδίων φθοράς με φωτογραφίες που έχουν ληφθεί από οπτικό μικροσκόπιο φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 12. Συλλογή σωματιδίων φθοράς [11]

Δεν υπάρχει πάντα ένας σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στη μορφή ενός σωματιδίου και ενός άλλου. Πάντα θα υπάρχουν σωματίδια τα οποία θα είναι δύσκολο να ταξινομηθούν, εξαιτίας δευτερογενών κτυπημάτων. Παρόλα αυτά, κοιτάζοντας τα πραγματικά σχήματα και γνωρίζοντας πως σχηματίστηκαν, είναι δυνατόν να κάνουμε μία κατάσταση με την περιγραφή τους, για να διευκολυνθεί μία γρήγορη ανάλυση αργότερα.

Τέτοιες τυπικές αναλύσεις εμφανίζονται σε σχετικούς Άτλαντες Σωματιδίων Φθοράς, οι οποίοι περιλαμβάνουν πολλές φωτογραφίες από πολλές εφαρμογές. Οι φωτογραφίες μπορεί να είναι από Οπτικό Μικροσκόπιο ή από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM). Πολλές είναι έγχρωμες και τα σωματίδια περιγράφονται λεπτομερώς αναφορικά με την πιθανή προέλευσή τους. Τρεις τέτοιοι τυπικοί άτλαντες αναφέρονται στην βιβλιογραφία, ταξινομημένοι κατά μέγεθος, με τον μικρότερο πρώτο:

- British Coal Wear Particle Atlas (1984) [19]
- Guide to Wear Particle Recognition (University of Swansea-Tribology Centre, M.H.Jones, 1994) [20]
- Wear Particle Atlas (1982/91) (Spectro Incorporated) [21]

2.3 Ταξινόμηση λόγω προέλευσης

Υπάρχει ακόμα ένας τρόπος για να ταξινομηθούν τα σωματίδια. Αυτός οπωσδήποτε είναι ο καλύτερος, αλλά υπάρχουν πάντα αμφιβολίες, εάν είναι ο σωστός. Το πρόβλημα είναι ότι μόνο σε λίγες περιπτώσεις μπορεί να είμαστε σίγουροι για την αιτία κάποιων σωματιδίων. Συχνά κάποιος πρέπει να βασιστεί αποκλειστικά στην «εμφάνιση» και να προτείνει από αυτήν πηγή.

Υπάρχουν πέντε τύποι ανάλογα με την προέλευση, που βασίζονται σε φερογραφικές εργασίες ([12]) :

1. Φθορά τριβής, Φυσιολογική Φθορά: Είναι τα γενικά αποδεκτά σωματίδια φυσιολογικής φθοράς, που σχηματίζονται ανάμεσα σε ολισθαίνουσες επιφάνειες με λίπανση. Έχουν σχήμα πλακιδίων, 15 μm πλάτος και 1 μm πάχος, ή μικρότερα μέχρι 0,5 μm επί 0,15 μm .

2. Φθορά από Χάραξη (Cutting Wear): Τα σωματίδια αυτά σχηματίζονται είτε από μεταλλικά εξαρτήματα, που το ένα χαράζει το άλλο, είτε από εγκλωβισμένους σκληρούς ρύπους, που χαράζουν αυλάκια στις μεταλλικές επιφάνειες. Το σχήμα διαφέρει, όπως και στα ρινίσματα της μηχανουργίας - χοντρά, σπιράλ, ή ακόμα νήματα σαν σύρμα λεπτά έως 0,25 μm .

3. Κόπωση Κύλισης (Rolling Fatigue): Σφαιρικά σωματίδια εμφανίζονται πολύ συχνά σε αυτήν την κατηγορία (από ρωγμές κόπωσης σε τριβείς). Επίσης χονδρά σωματίδια από μέταλλο μπορούν να εμφανιστούν από κόπωση, και μπορεί να είναι πολύ μεγάλα. Επίσης πλακίδια μέχρι 50 μm .

4. Φθορά από Έντονη Ολίσθηση (Severe Sliding Wear): Είναι επίσης μεγάλα σωματίδια (πλακίδια), που το μέγεθος τους εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα,

που γίνεται η ολίσθηση. Όσο μεγαλύτερες οι τάσεις, τόσο μεγαλύτερη η αναλογία μεγάλων σωματιδίων προς μικρά.

5. Φθορά από Συνδυασμένη Κύλιση και Ολίσθηση: Είναι χοντρά πλακίδια με λείες επιφάνειες μεγαλύτερα από 10 μm . Παράγονται από το σύρσιμο (scuffing) ανάμεσα στα δόντια των οδοντωτών τροχών από φθορά και κόπωση.

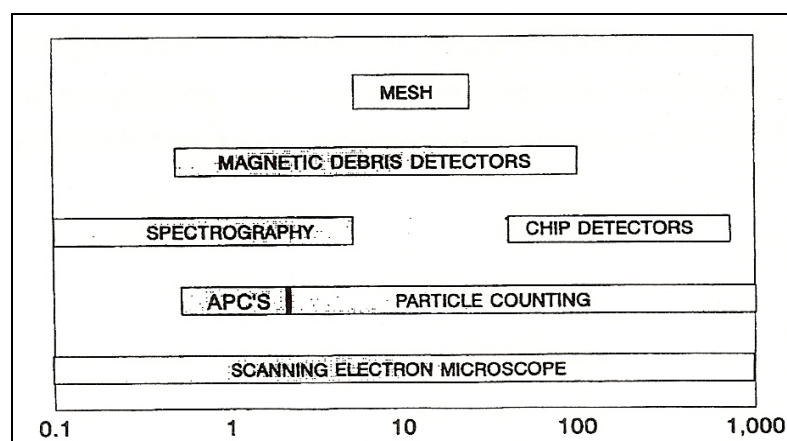
2.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

ΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (PARTICLE DETECTION)

Εάν η τεχνική που θα επιλεγεί ανιχνεύει μόνο μεγάλα σωματίδια, τότε είναι πιθανόν όταν ανιχνευθεί η βλάβη, αυτή ήδη να είναι αρκετά εκτεταμένη. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις ενός συστήματος Προβλεπτικής Συντήρησης, οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, περιορίζονται ουσιαστικά σε αυτές που μπορούν να ανιχνεύσουν και μικρότερα σωματίδια.

Τα συντρίμματα φθοράς, για παράδειγμα, απαιτούν η συσκευή να ανιχνεύει σωματίδια μεγαλύτερα από 5 μm . Ανίχνευση λάσπης (silt) απαιτεί να φθάσουμε χαμηλότερα, μέχρι 1 μm . Χημικές διεργασίες και υγρά, σχετικά με το καθάρισμα τυπωμένων κυκλωμάτων, θα απαιτούν αναλυτές με όριο κάτω από το 1 μm .

Για την ανίχνευση σωματιδίων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Σπουδαιότερες είναι οι οπτικές τεχνικές. Το Σχήμα 10 παριστάνει συνοπτικά το εύρος των μεγεθών των σωματιδίων που μπορούν να ανιχνευθούν με διαφορετικές τεχνικές, και κυρίως αναφέρονται για καθαρά συστήματα (πχ. υδραυλικά συστήματα). Ο Πίνακας 3, επίσης δίνει μία γενικότερη και πιο εκτενή αναφορά στις τεχνικές ανίχνευσης σωματιδίων. Το κυριότερο σημείο του, όπως και στον προηγούμενο πίνακα, είναι η σχέση της τεχνικής με το μέγεθος των σωματιδίων που μπορεί να ανιχνεύσει.



Σχήμα 10. Τεχνικές παρακολούθησης ρυπαντών και εύρος μεγεθών που ανιχνεύουν [13]

Όλες οι συσκευές που μετρούν σωματίδια πάνω από 5 μm μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάποιο βαθμό για ανάλυση συντριμμάτων φθοράς, όμως στην πράξη, αυτό δεν συμβαίνει για τρεις λόγους:

- Τα όργανα είναι πολύ ακριβά
- Τα όργανα απαιτούν πολύ εξειδικευμένο προσωπικό
- Τα όργανα μπορούν να καταστραφούν ή να μπλοκαριστούν από τα σωματίδια που παράγονται από φθορά.

Οπτικές Τεχνικές

1) Ευθεία Ανάκλαση, *Forward Reflectance (Near-angle Light Scattering)*

Το φως ανακλάται προς τα εμπρός σε μία μικρή γωνία (δηλαδή από $6,34^\circ$ έως $18,95^\circ$). Η ένταση σε αυτή την μικρή γωνία εξαρτάται από την επιφάνεια, που με την σειρά της εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου.

2) Περίθλαση Fraunhofer, *Fraunhofer Diffraction (Forward Scatter)*

Το σωματίδιο προκαλεί με διασκορπισμό του φωτός προς τα εμπρός ομόκεντρους δακτυλίους (σκοτεινούς / φωτεινούς), οι οποίοι στην συνέχεια μπορούν να ανιχνευθούν.

3) Σκίαση Φωτός, *Light Obscuration (Light Absorption, Light Blockage, Light Extinction)*

Προσδιορίζει συγκεντρώσεις μικρών σωματιδίων οπτικά, με σκίαση φωτός (light obscuration). Σε αυτή την μέθοδο, το δείγμα ελαίου οδηγείται με σταθερή ταχύτητα ροής διαμέσου μίας βαθμονομημένης ακτίνας φωτός. Τα σωματίδια μέσα στο υγρό ρίχνουν σκιές πάνω στον αισθητήρα φωτός ανάλογα με το μέγεθός τους.

4) Διασκορπισμός Φωτός, *Light Scatter (not Fraunhofer or Brownian) (90° Reflection)*

Χρησιμοποιεί τρεις ξεχωριστές θεωρίες διασκορπισμού φωτός - κάτω από 0.1 μm , ενδιάμεση και άνω των 3 μm . Συνήθως ανιχνεύεται στις 90° .

5) Νεφελομετρία, *Nephelometry / Turbidity*

Η αρχή της βασίζεται στην παρακολούθηση ολόκληρου του νέφους στο υγρό εξαιτίας των σωματιδίων. Οι τρόποι ανίχνευσης κυμαίνονται από ευθεία, διασκορπισμός στις 90° , ανάκλαση στις 180° , διασκορπισμός σε πολλαπλές γωνίες κλπ.

6) Διασκορπισμός Φάσης / *Doppler, Phase/Doppler Scatter*

Χρησιμοποιεί την μετατόπιση Doppler που οφείλεται στο κινούμενο σωματίδιο, όπως αυτή ανιχνεύεται από δύο ή τρεις αισθητήρες.

7) Φωτομετρική Διασπορά, *Photometric Dispersion*

Αυτή μελετά την διακύμανση των επιπέδων του φωτός γύρω από μία μέση τιμή.

8) *Φασματοσκοπία Συσχέτισης Φωτονίων, Photon Correlation Spectroscopy, PCS*

Σχετίζεται με την κίνηση Brown.

9) *Χρόνος Μετάπτωσης, Time of Transition*

Χρησιμοποιείται το μπλοκάρισμα ή ο πίσω διασκορπισμός (back scattering) μίας δέσμης laser περιστρεφόμενης σάρωσης. Ο χρόνος σάρωσης κατά μήκος ενός σωματιδίου είναι το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου. [1]

Άλλες τεχνικές

10) *Τριχοειδής Υδροδυναμική Κλασματοποίηση, Capillary Hydrodynamic Fractionation, CHF*

Χρησιμοποιείται στα υπερκαθαρά υγρά.

11) *Διηλεκτρική Σταθερά, Dielectric Constant*

Επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε νερό, οξέα, αναμειγμένα υγρά, προϊόντα οξείδωσης και μεγάλα συντρίμματα. Συνήθως δεν μπορεί να διακρίνει τους υγρούς ρύπους από τους στερεούς ρύπους ή τα συντρίμματα, αλλά δίνει την πληροφορία εάν το λάδι είναι αποδεκτό ή όχι.

12) *Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, Electrical Conductance. Ηλεκτρομαγνητική ανίχνευση (ενεργή ή παθητική)*

Αυτή βασίζεται στην μέτρηση της διατάραξης του πεδίου που προκαλείται από την παρουσία ενός μεταλλικού σωματιδίου μέσα στον αισθητήρα. Μερικοί αισθητήρες ανιχνεύουν το σωματίο καθώς διέρχεται (pass through type) και κάποιοι άλλοι συλλαμβάνουν το σωματίο και καταγράφουν αυτό το γεγονός. [1]

2.5 ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ (QUANTIFYING DEBRIS)

Εδώ εξετάζονται οι τεχνικές, που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η ποσότητα σωματιδίων σε ορισμένη ποσότητα υγρού. Συσκευές απαρίθμησης σωματιδίων (οι οποίες επίσης δίνουν ένα μέγεθος της ποσότητας των συντριμμάτων που είναι παρόντα) εξετάζονται στην επόμενη παράγραφο.

Για πολλές εφαρμογές, η ποσοτική μέτρηση είναι το μοναδικό που χρειάζονται. Αυτή η μέτρηση δίνει την αίσθηση για την πιθανή φθορά που θα συμβεί. Είναι η παλαιά πρακτική κατά την οποία έτριβαν λίγο λάδι μηχανής ανάμεσα στα δάκτυλα η οποία και εξελίχθηκε. Ενώ το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων σε ένα σύστημα μπορεί να είναι προφανές, το μικρότερο μέγεθος είναι απροσδιόριστο. Παρόλα αυτά δεν μας ανησυχεί γιατί αυτό που έχει σημασία είναι το χαμηλότερο όριο που πραγματικά δείχνει ότι υπάρχει υπερβολική φθορά ή ότι θα υπάρξει στο μέλλον. Εάν χρησιμοποιείται η

ανάλυση φίλτρων μεμβράνης, και με την προϋπόθεση ότι η μετρούμενη μάζα συντριμμάτων καθορίζεται πάντα με το ίδιο κάτω όριο, έστω φίλτρα 0.8 μm (ή 0.45 μm ή 2 μm ή 5 μm), τότε κάθε σημαντική μεταβολή στην παγίδευμένη ποσότητα, για παράδειγμα βάρος ανά ml, ένταση ανά ml ή σχήμα της συνάρτησης κατανομής μεγεθών, θα δείχνει μία αλλαγή στα συντρίμματα. Η αλλαγή μπορεί να οφείλεται σε φθορά ή σε εισερχόμενους ρύπους. Μία αλλαγή συνέβη στο σύστημα και επομένως απαιτείται περαιτέρω έρευνα.

Οι συσκευές ποσοτικού προσδιορισμού χωρίζονται σε αυτές τις τρεις κατηγορίες βάρος, ένταση και κατανομή. Ενώ οι συσκευές μέτρησης βάρους είναι λίγες τον αριθμό, υπάρχουν πολύ τύποι μέτρησης της έντασης και της κατανομής:

I. ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΑΡΟΥΣ (OR GRAVIMETRIC ANALYSIS)

Αυτό που μετριέται είναι το βάρος των συντριμμάτων σε συγκεκριμένη ποσότητα υγρού (mg /100ml ή ppm). Επειδή κάποια συστατικά του λαδιού προστίθενται στην μεμβράνη και κάποια άλλα συστατικά της μεμβράνης απομακρύνονται με το λάδι (πχ. πλαστικοποιητές), αυτό δεν γίνεται περνώντας το υγρό μέσα από μία μεμβράνη. Ο τρόπος που επιτυγχάνεται αντιστάθμιση είναι μέσω μίας διάταξης δύο μεμβρανών, όπου το υγρό (συνήθως 100ml) διέρχεται πρώτα από την μία μεμβράνη και μετά από μία δεύτερη, με βοήθεια κενού. Οι μεμβράνες εκπλένονται από το περιττό υγρό, ξηραίνονται και ξαναζυγίζονται. Οι μεμβράνες (συνήθως 0.8 μm) μπορεί να είναι προζυγισμένες ή του ίδιου βάρους από τον κατασκευαστή.

II. ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ

Βασίζεται στον προσδιορισμό της ποσότητας συντριμμάτων με την βοήθεια κάποιου αισθητήρα, που μετράει κάποιο μέγεθος (όχι όμως το βάρος, όπως στην προηγούμενη περίπτωση). Ο προσδιορισμός μπορεί να είναι οπτικός, μαγνητικός, επαγωγικός, διηλεκτρικός, πιεζοηλεκτρικός, καταστροφικός, μία μεταβολή στην ανάκλαση, πίεση, θερμοκρασία ή την ροή κλπ. Από αυτήν την συσκευή μετριέται ένταση (intensity) ανά ml του συγκεκριμένου μεγέθους και υπολογίζεται η αυξομείωση στην ποσότητα των συντριμμάτων (debris).

Υπάρχουν επτά τύποι συσκευών και τεχνικές ([1]):

- Οπτική Εξέταση Φίλτρου Μεμβράνης (or Patch Test). Οι συγκριτικές αυτές τεχνικές βασίζονται σε μεμβράνες και απαιτούν παρόμοιες συσκευές με την Οπτική Απαρίθμηση Σωματιδίων. Ο ρυπαντής που περιέχεται στο λάδι επικάθεται σε μία μεμβράνη και η γενική πυκνότητα ρυπαντών συγκρίνεται με μία σειρά παρασκευασμένων προτύπων (master) μεμβρανών που αντιπροσωπεύουν τα διάφορα επίπεδα ρυπαντών. Η πρότυπη μεμβράνη που είναι πιο κοντά στην μεμβράνη δοκιμής λαμβάνεται σαν αποτέλεσμα. Εναλλακτικά σύγκριση μπορεί να γίνει με φωτογραφίες, που αντιπροσωπεύουν επιλεγμένα επίπεδα ρυπαντών. Υπάρχουν δύο τύποι αυτής της τεχνικής :

- Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιεί μεμβράνες που παρατηρούνται χρησιμοποιώντας φως από επάνω ή προσπίπτων και τα «Πρότυπα» είναι φωτογραφίες παρασκευασμένων μεμβρανών σε ένα βιβλίο για τύπους ρύπανσης.

- Η άλλη τεχνική είναι το σύστημα Conpar από την Howden Wade Ltd και χρησιμοποιεί ειδικά παρασκευασμένα slides ρύπανσης, που αντιπροσωπεύουν επίπεδα ρυπαντών διαφόρων κλάσεων στο σύστημα κωδικοποίησης Conpar. Αυτά πρέπει να τα παρατηρήσουμε χρησιμοποιώντας εκπεμπόμενο φως (transmitted), γι' αυτό οι μεμβράνες δοκιμής πρέπει να είναι διαφανείς. Έτσι υπάρχει ο κίνδυνος για σωματίδια να χαθούν, εάν ο συντελεστής διάθλασης (refractive index) είναι ίδιος με του υγρού, και ενώ επιπλέον ρύπανση μπορεί να προστίθεται στην διαδικασία. Είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται αυτές οι συγκριτικές τεχνικές με τρόπο *go/no-go*, όπου δεν γίνονται ενέργειες εάν το επίπεδο είναι κάτω από το όριο, και απαιτούνται διορθωτικές ενέργειες εάν είναι πάνω.

- Ηλεκτρική (επαγωγική, μαγνητική, διηλεκτική)
- Νεφελομετρική (Nefelometric)
- Εναπόθεση λάσπης (Siltng) / Μπλοκάρισμα φίλτρου
- Φθορά λεπτού film
- Πιεζοηλεκτρική
- Φωτομετρική διασπορά (Photometric dispersion)

III. ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

Παρόλο που σχεδόν όλες οι προχωρημένες τεχνικές παρατήρησης σωματιδίων, θα μπορούσαν να δώσουν μία κατανομή, δεν θα χρησιμοποιούντο για ποσοτική μέτρηση ή ανάλυση κατανομής συντριμμάτων ή ρύπων σε υγρά. Οι παρακάτω τύποι οργάνων και τεχνικών είναι πιο κατάλληλες, δηλαδή είναι αναλυτές κατανομής μεγέθους σωματιδίων (Particle Size Distribution Analysers - PSDA). Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τεχνικές που προχωρούν σε απαρίθμηση σωματιδίων χρησιμοποιώντας φυσικές αρχές, και σαν τέτοιες δεν δίνουν το μέγεθος και τον αριθμό μεμονωμένων σωματιδίων. Οι δύο κύριες μέθοδοι είναι αναλυτές κατανομής, και όργανα με μπλοκάρισμα πλέγματος (mesh blockage).

- Περίθλαση Fraunhofer (Diffraction). Οι αναλυτές κατανομής σωματιδίων (Particle Distribution Analysers - PDAs) είναι μία μορφή αναλυτή σωματιδίων διασκορπισμού φωτός, που χρησιμεύουν για ένα μεγάλο εύρος μεγεθών σωματιδίων (0.1 - 2000 μm) και συγκεντρώσεις. Η αρχή που βασίζεται είναι η περίθλαση laser (laser diffraction - Fraunhofer), όπου η ακτίνα ενός laser χαμηλής ισχύος διευρύνεται και φιλτράρεται για να δώσει μία παράλληλη ακτίνα φωτός. Καθώς τα σωματίδια διέρχονται διαμέσου του αισθητήρα, το φως διασκορπίζεται ή περιθλάται σε διαφορετικές γωνίες, που εξαρτώνται από το μέγεθος του σωματιδίου. Το διασκορπισμένο φως εστιάζεται σε έναν πολλαπλών στοιχείων, στερεάς κατάστασης ανιχνευτή, που ταυτόχρονα μετράει το φως σε διαφορετικές γωνίες. Τα σήματα από τον ανιχνευτή αναλύονται από έναν υπολογιστή για να δώσουν την κατανομή μεγέθους, βασιζόμενα σε μετρήσεις ογκομετρικές ή μάζας. Αυτή η τεχνική απαιτεί σχετικά σημαντικά επίπεδα σωματιδίων, έτσι ώστε να λαμβάνονται επαρκή σήματα περίθλασης.

- Mesh Blockage (or Sieving). Η διάδος μολυσμένου υγρού διαμέσου μίας μεμβράνης ή διάτρητου δίσκου με κανονικό μέγεθος πόρου θα προκαλέσει το μπλοκάρισμα των πόρων και θα παράγει μία διαφορετική πίεση κατά μήκος του δίσκου. Εάν ο αριθμός των πόρων είναι γνωστός, τότε συνάγεται ο αριθμός των σωματιδίων ξέροντας τον βαθμό μπλοκαρίσματος του δίσκου. Το καθάρισμα του δίσκου επιτυγχάνεται με ανάστροφη ροή μετά τον κάθε κύκλο. Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από τον τύπο του δίσκου και την μορφολογία του ρυπαντή. Η αρχή χρησιμοποιείται με δύο διαφορετικές μορφές

- Μία μονάδα που εξελίχθηκε από τον Fitch μεταχειρίζεται έναν μικρό δίσκο που έχει τετράγωνα ανοίγματα (photo-etched) είτε 10 είτε 15 μm . Το υγρό εξαναγκάζεται διαμέσου του δίσκου είτε με την εφαρμογή πίεσης αέρα σε μία κυψέλη δειγματοληψίας εάν χρησιμοποιείται εκτός γραμμής, είτε από την πίεση του συστήματος στην περίπτωση της ανάλυσης σε γραμμή. Το εξερχόμενο υγρό εισέρχεται σε έναν κύλινδρο. Μετακινεί το πιστόνι και μετριέται η διαδρομή του (ή ο όγκος) είτε από ένα μετατροπέα εκτοπίσματος (displacement transducer or dial gauge). Η παρουσία των ρύπων βαθμιαία μπλοκάρει τα ανοίγματα και όταν η κίνηση του εμβόλου γίνει σημαντικά αργή, αυτό θεωρείται το τελικό σημείο. Γνωρίζοντας τον αριθμό των πόρων και τον όγκο που έχει διέλθει, ο αριθμός των σωματιδίων που είναι μεγαλύτερα από το μέγεθος του ανοίγματος μπορεί να υπολογιστεί.

- Η δεύτερη μέθοδος εξελίχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Bath, και διατίθεται στην αγορά από την Pall Europe Ltd και την Coulter Electronics Ltd. Αυτές αποτελούνται από έναν αριθμό διαφορετικών δίσκων από ανοξείδωτο πλέγμα (twilled mesh). Το υγρό αντλείται με ένα σταθερό ρυθμό διαμέσου του συνδυασμού των πλεγμάτων για να γίνει η ανάλυση και μετά στην ανάστροφη φορά για να εκπλυθούν τα σωματίδια που προηγουμένως είχαν συλληφθεί.

Το πλεονέκτημα αυτών των οργάνων είναι ότι μπορούν να αναλύσουν υγρά που η φύση τους δεν επιτρέπει την χρήση APC's. Τέτοιες συνθήκες είναι: νερό μέσα στο υδραυλικό υγρό ή στο έλαιο, σε υγρά δύο φάσεων (ή μη αναμίξιμα) και σε υγρά που περιέχουν αέρα. Επιπλέον, είναι πιο κατάλληλα για πολύ ακάθαρτα δείγματα που περιέχουν πολλά μικρά σωματίδια, επειδή αυτά επηρεάζουν την λειτουργία των APC, λόγω του φαινομένου της σύμπτωσης.

- Καθίζηση (Sedimentation)
- Χρόνος Μετάπτωσης (Time of Transition)

2.6 ΑΠΑΡΙΘΜΗΣΗ ΣΥΝΤΡΙΜΜΑΤΩΝ - ΑΝΑ ΜΕΓΕΘΟΣ

Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει όλα τα όργανα που μετρούν το μέγεθος και καταγράφουν τα σωματίδια που περιέχονται σε ένα υγρό.

I. ΟΠΤΙΚΗ ΑΠΑΡΙΘΜΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ

Το οπτικό μικροσκόπιο είναι πιθανόν το πιο ευέλικτο από τα όργανα παρακολούθησης ρυπαντών, καθώς επιτρέπει στον χειριστή να απαριθμεί και να

προσδιορίζει το μέγεθος των επιμέρους σωματιδίων, και επίσης να αναλύει τον τύπο των ρύπων που είναι παρόντες. Πρέπει να σημειώσουμε, ότι η τεχνική χρησιμοποιείται σαν επόμενο βήμα μετά την ανάλυση χρησιμοποιώντας συσκευές παρακολούθησης συντριμμάτων.

Ο ρυπαντής που περιέχεται στον υγρό φορέα διαχωρίζεται με διήθηση υπό κενό και επικάθεται σε μία αναλυτική μεμβράνη. Ο τύπος και ο πόρος της μεμβράνης θα εξαρτηθούν από την εφαρμογή, αλλά είναι συνήθως 1.2 μm και υπάρχει πάνω της τυπωμένο πλέγμα αναφοράς 3 mm.

Η επιφάνεια της μεμβράνης παρατηρείται σε διάφορες μεγεθύνσεις (συνήθως 200X, 500X) και υπολογίζεται το μέγεθος των σωματιδίων (βάσει της μεγαλύτερης διάστασης) με την βοήθεια βαθμονομημένου κανόνα, που υπάρχει μέσα στο οπτικό πεδίο.

Αν και τα σωματίδια μπορούν να ταξινομηθούν με οποιοδήποτε τρόπο, συνήθως λαμβάνονται οι αριθμοί για τα μεγέθη μεγαλύτερα από 5, 15, 25, 50, και 100 μm. Δύο μέθοδοι περιγράφονται στο ISO 4407, μία που χρησιμοποιεί εκπεμπόμενο φως και μία με προσπίπτοντα ή φωτισμό από πάνω. Η τελευταία είναι πιο συνήθης, καθώς η μεμβράνη δεν απαιτεί επιπλέον προετοιμασία πριν από την απαρίθμηση, ελαχιστοποιώντας έτσι τον κίνδυνο μόλυνσης από άλλες πηγές. Επίσης έχει το πλεονέκτημα ότι φωτίζονται τα σωματίδια ώστε να εκτιμηθεί η μορφολογία τους.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι άλλες τεχνικές παρακολούθησης ρυπαντών που αναφέρονται σε αυτό το τμήμα εφαρμόζονται στην μικροσκοπική ανάλυση, όταν απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες για την μορφολογία των ρυπαντών.

II. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ (IMAGE ANALYSING COMPUTERS-IAC'S)

Σε μία προσπάθεια να ξεπεραστεί η επίπονη φύση της χειροκίνητης απαρίθμησης, αναπτύχθηκαν οι υπολογιστές ανάλυσης εικόνας. Μία video camera σαρώνει την επιφάνεια της μεμβράνης για περαιτέρω επεξεργασία σε έναν υπολογιστή. Τα σωματίδια αναγνωρίζονται σε σχέση είτε με την κλίμακα απόχρωσης γκρι ή την χρωματική αντίθεση με την επιφάνεια της μεμβράνης. Ο υπολογιστής παρέχει την λογική να μετρήσει το μέγεθος και να απαριθμήσει τα σωματίδια αναφορικά με την παράμετρο διαστασιολόγησης. Επιπλέον μπορεί να δώσει μία πληθώρα άλλων παραμέτρων πχ. μεγαλύτερη διάμετρος, προβαλλόμενο μήκος, επιφάνεια κλπ. Παρόλα αυτά εξοικονόμηση χρόνου μπορεί να μην επιτευχθεί, γιατί η τεχνική έχει και κάποια μειονεκτήματα.

III. ΑΥΤΟΜΑΤΟΙ ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΕΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (AUTOMATIC PARTICLE COUNTERS-APC'S)

Χωρίς την ανάπτυξη των αυτόματων απαριθμητών σωματιδίων APC, μεγάλο μέρος από την έρευνα στον έλεγχο της ρύπανσης τα τελευταία 20 χρόνια δεν θα ήταν δυνατή. Όταν χρησιμοποιούνται εντός των περιορισμών τους, έχουν επιδείξει και ακρίβεια και οικονομία στην λειτουργία. Πάραυτα, υπόκεινται σε ορισμένους περιορισμούς, και εάν δεν θα χρησιμοποιηθούν σωστά, μπορούν να δώσουν

λανθασμένα αποτελέσματα. Οι APC λειτουργούν με την αρχή της απόσβεσης φωτός (light extinction), όπου τα σωματίδια που περιέχονται στο υγρό αλληλεπιδρούν με μία ακτίνα φωτός που διέρχεται από ένα στενό πέρασμα και μειώνει την ένταση του φωτός που λαμβάνεται από έναν αισθητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας είτε την σκέδαση φωτός είτε την απορρόφηση. Η μείωση στην ένταση συσχετίζεται με το μέγεθος σωματιδίου με βαθμονόμηση. Ο APC προσδιορίζει ένα μεγάλο εύρος μεγεθών, από 0.5 έως πάνω από 2000 μm , που εξαρτάται από το τύπο του οργάνου και την εφαρμογή, και μπορούν να εργαστούν και πάνω σε γραμμή και εκτός γραμμής.

Η ικανότητα αυτών των οργάνων να απαριθμούν και να διαστασιολογούν επιμέρους σωματίδια γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια, τα κάνει απαραίτητα για μελέτες ρύπανσης όπως, έλεγχος φίλτρων, έλεγχος ευαισθησίας εξαρτημάτων σε ρύπους, παρακολούθηση της εξέλιξης μίας έκπλυσης και της γενικής κατάστασης ενός συστήματος. Αυτά τα όργανα θα λειτουργήσουν μόνο σε καθαρά ομογενή υγρά και δεν δίνουν πληροφορίες για την μορφολογία των ρυπαντών.

IV. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΑΡΩΣΗΣ (SCANNING ELECTRON MICROSCOPE-SEM)

Το SEM έχει πολλές εφαρμογές στο πεδίο του ελέγχου της ρύπανσης, που μπορεί να είναι μέτρηση μεγέθους, χαρακτηρισμός, και χημική ανάλυση (elemental) των σωματιδίων. Είναι ικανά να μετρούν ένα μεγάλο εύρος μεγεθών και προς τα κάτω' μέχρι 0.1 μm . Η τελευταία γενιά SEM έχουν προγράμματα ανάλυσης εικόνας, που επιτρέπουν η απαρίθμηση σωματιδίων να γίνεται σε σωματίδια που έχουν επικαθίσει σε ένα μικρό μέρος της μεμβράνης ανάλυσης. Παρόλα αυτά, πρέπει να θεωρείται μία δευτερεύουσα τεχνική, εξαιτίας της πολύ ειδικής φύσης της και του κόστους μιας τέτοιας ανάλυσης.

2.7 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΥΝΤΡΙΜΜΑΤΩΝ

Η Φασματοσκοπική Ανάλυση των ελαίων για υπολείμματα μετάλλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης φθοράς των διαφόρων εξαρτημάτων. Από την συγκέντρωση των μετάλλων και τις τάσεις (trends), ένας εκπαιδευμένος χειριστής μπορεί να εντοπίσει το σφάλμα και να προσδιορίσει την σοβαρότητα του.

Η στοιχειώδης ανάλυση (elemental analysis), δηλαδή η ανάλυση χημικών στοιχείων, περιλαμβάνει έναν αριθμό ονομάτων (Φασματοσκοπία, Spectrometric Analysis, Spectrometry, Spectroscopy, Spectrophotometry), που βασικά όλα σημαίνουν το ίδιο, εκτός όταν περιέχεται μέσα στο όνομα ο όρος «φωτο-», οπότε η τεχνική περιλαμβάνει και κάποιο τύπο φωτομέτρου. Το φωτόμετρο είναι ένα όργανο για τον προσδιορισμό της έντασης φωτός διαφορετικών συχνοτήτων ή φασμάτων, που κάθε ένα σχετίζεται με ένα διαφορετικό στοιχείο. Μικρό δείγμα του ελαίου καίγεται σε μία φλόγα ή φούρνο (furnace), και η ανάλυση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Ατομική Εκπομπή. Παράγεται ηλεκτρικό τόξο διαμέσου μικρού δείγματος του ελαίου και αναλύονται οι προκύπτουσες φασματικές γραμμές.

- Ατομική Απορρόφηση. Ένα αραιωμένο δείγμα του ελαίου εξατμίζεται μέσα σε φλόγα, ενώ εκπέμπεται μία ακτίνα φωτός διαμέσου αυτού και ανιχνεύονται οι φασματικές γραμμές, που δεν απορροφώνται από τα ίχνη ατόμων μέσα στο λάδι

Η ατομική απορρόφηση και η ατομική εκπομπή γενικά ανιχνεύουν μόνο σωματίδια σε μέγεθος μικρότερα από 10 μm, μεγαλύτερα σωματίδια διαφεύγουν γιατί δεν μπορούν να «καούν» αποτελεσματικά. Γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, όπως όργανα που χρησιμοποιούν φθορισμομετρία ακτίνων-X (X-Ray Fluorescence, XRF).

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι όταν συντρίμματα λαμβάνονται από το λάδι και αναλύονται, είναι πολύ πιθανόν ότι και το ίδιο το λάδι είναι μέρος των στοιχείων που ανιχνεύονται. Τα κύρια συστατικά του ελαίου είναι άνθρακας, υδρογόνο, και οξυγόνο, αλλά κάθε κατασκευαστής βάζει ορισμένα πρόσθετα για να βελτιώσει την ιδιότητες του. Έτσι πρέπει πάντα να έχουμε υπόψη ότι μικρά ίχνη, που δεν είναι συντρίμματα, μπορεί να υπάρχουν στο λάδι.

Υπάρχουν δύο τρόποι για να αποφύγουμε αυτό το δίλημμα:

- Ο πρώτος τρόπος είναι να φιλτραριστούν τα συντρίμματα και να καθαριστούν πολύ καλά με έναν εξατμιζόμενο διαλύτη, έτσι ώστε να αναλυθούν μόνο συντρίμματα.
- Ο δεύτερος είναι να προσδιοριστούν το φάσμα και τα περιεχόμενα στοιχεία φρέσκου καθαρού λαδιού, αφού έχει γίνει λεπτή διήθηση και πριν χρησιμοποιηθεί. Το βασικό φάσμα των στοιχείων που λαμβάνεται, αφαιρείται τότε από αυτό των μεταχειρισμένων ελαίων.

Ακόμα τα συντρίμματα μπορούν να μας δώσουν και πληροφορίες και για την πιθανή προέλευσή τους (Πίνακας 4).

<i>Element</i>	<i>Possible Source</i>
Aluminium	Atmosphere, bearings, pistons
Antimony	Bearings, grease
Barium	Additives
Boron	Additives, cooling water
[Brass]	[see copper, tin and zinc]
Calcium	Additives, quarry, sea water
Chromium	Cylinders, piston rings, seals
Copper	Bearings, bushes, coolants, cylinder liners, piston rings
Iron	Rolling Element Bearings, cylinders, gears
Lead	Bearings, fuel, grease, paints, seals, solder
Magnesium	Additives, shafts, valves
Molybdenum	Additives, piston rings
Nickel	Bearings, gears, turbine blades, grease
Phosphorous	Additives
Silicon	Additives, atmosphere (dust), gaskets, grease
Silver	Bearings, shafts
Sodium	Additives, coolants, grease

Tin	Additives, journal bearings, seals, solder, worm gears
Titanium	Bearings, paint, turbine blades and discs
Vanadium	Fuel, oil, catalytic fines
Zinc	Additives, bearings, coolant, grease

Πίνακας 3. Πηγές χημικών στοιχείων και πιθανή προέλευση [1]

Όλες οι τεχνικές που αναφέρονται σε αυτήν την παράγραφο, χρησιμοποιούνται σε κάποιο βαθμό στην ανάλυση συντριμμάτων φθοράς.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

3.1 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ

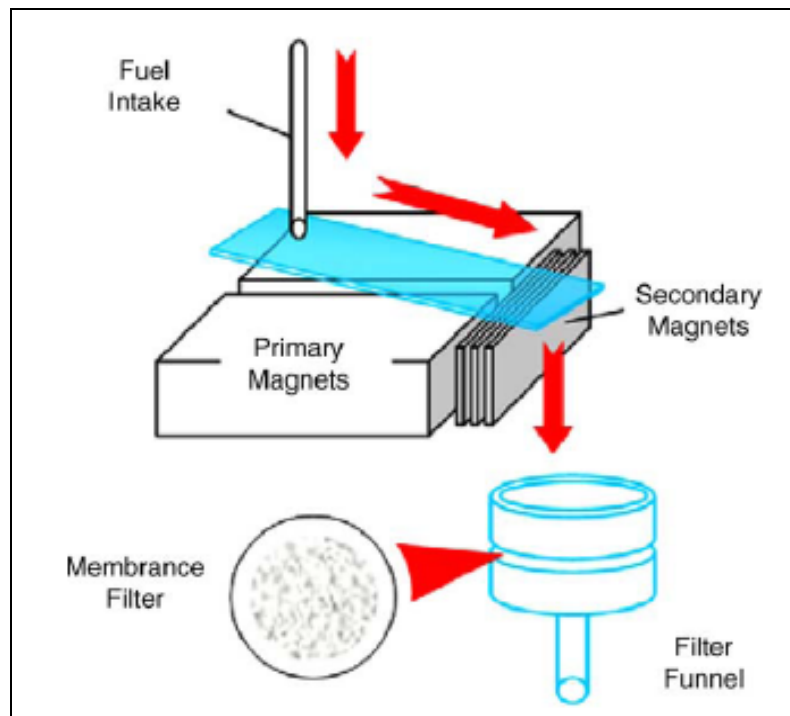
Φερρογραφική ανάλυση λαδιού

Η φερρογραφική ανάλυση ή φερρογραφία είναι μια τεχνική που επιτρέπει το μαγνητικό διαχωρισμό μεταλλικών θραυσμάτων φθοράς από ένα δείγμα λιπαντικού. Αναπτύχθηκε προκειμένου να διαχωρίσουμε τα απόβλιττα από το λιπαντικό και να τα τοποθετήσουμε σύμφωνα με το μέγεθος τους σε ένα διαφανή υπόστρωμα και να τα εξετάσουμε από ένα οπτικό ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM - Scanning Electron Microscope).

Συγκεκριμένα προέκυψε από την ανάγκη να βρούμε μια βελτιωμένη μέθοδο ανάλυσης του λιπαντικού των κινητήρων αεροσκαφών που δεν θα απαιτούσαν τόσο μεγάλο μηχανισμό όσο οι υπάρχουσες συσκευές και επίσης θα παρείχαν νωρίτερα προειδοποίηση για ενδεχόμενη αστοχία. Οι ερευνητές ανακάλυψαν ότι οι υπάρχουσες μέθοδοι ήταν απλές στην χρήση αλλά ανακριβείς, η αντιστρόφως. Μια λεπτομερής μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων του λιπαντικού αποκάλυψε ότι απαιτούνταν μια συσκευή που πρώτον θα μάζευε τα κομμάτια από την φθορά στο λαδί που επιδεικνύουν μαγνητικές ιδιότητες. Δεύτερον ότι θα μάζευε εκείνα τα κομμάτια με διαστάσεις στο εύρος του κλάσματος του μικρού, δηλαδή απόβλιττα πολύ μικρού μεγέθους όπως εκείνα τα οποία ως επί το πλείστον εμφανίζονται σε έναν κινητήρα ή όπου αλλού εμφανίζεται φθορά, και τρίτον να επιτρέπει εύκολη εξέταση των συλλεγμένων κομματιών. [26]

Ο φερρογράφος αποτελείται από ένα σωλήνα για να παραλαμβάνουμε το δείγμα λαδιού με αργό ρυθμό (περίπου 0.2 ml/min), ένα μαγνήτη που μας παρέχει ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο στους πόλους του και ένα διαφανές υπόστρωμα πάνω στο οποίο τοποθετούνται τα απόβλιττα. Το δείγμα λαδιού, το οποίο αραιώνεται με ειδικό διαλυτικό προκειμένου να προωθήσει την πτώση των κομματιών φθοράς, διοχετεύεται κατά μήκος του διαφανούς υποστρώματος το οποίο έχει κάποια κλίση, και τα απόβλιττα κολλούν στο υπόστρωμα, κατανεμημένα σχεδόν κατά μέγεθος. Στη συνέχεια, και αφού 2 ml λαδιού έχουν διοχετευτεί στην διαφάνεια, ξεπλένοντας το υπολειμματικό λάδι τα απόβλιττα κολλούν μόνιμα στη διαφάνεια. Η ποσότητα και η κατανομή βάρους των κομματιών μπορούν να διευκρινιστούν από τον οπτικό μετρητή πυκνότητας, ο οποίος ωστόσο έχει αντικατασταθεί από τον απ' ευθείας ανάγνωσης

φερρογράφο (Direct Reading Ferrograph) τον οποίο θα παρουσιάσουμε παρακάτω. Έτσι αν μπορούμε να διοχετεύουμε το φερρογράφο με συνεχή δείγματα λαδιού, μπορούμε να συλλέγουμε πληροφορίες για τον ρυθμό παραγωγής αποβλίττων από μια μηχανή και ως εκ τούτου να αντιληφθούμε αν ενδέχεται να αστοχήσει. [25]



Σχήμα 11 . Σχηματική απεικόνιση φερρογραφίας [14]

Η χρήση των δειγμάτων λαδιού από το σύστημα λίπανσης ενός κινητήρα κάνει τη φερρογραφία εύκολα εφαρμόσιμη τόσο στο εργαστήριο όσο και στο χώρο εργασίας του. Η φερρογραφία ξεπερνάει κάποια από τα μειονεκτήματα της φασματοσκοπικής ανάλυσης. Καταρχήν, είναι ιδανική στη διάκριση μεταξύ μεγάλων και μικρών σωματιδίων φθοράς αφού τα σωματίδια τακτοποιούνται από το φερρογράμμα. Δεύτερον, τα σωματίδια από διάφορες περιοχές μπορούν να διακριθούν εξετάζοντας το φερρογράμμα σε ένα διχρωματικό ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η θερμότητα του φερρογράμματος επίσης εξετάζεται για να βοηθήσει στη διάκριση της επιφάνειας από την οποία έχει δημιουργηθεί το σωματίδιο. Η ανάλυση του φερρογράμματος χρησιμοποιώντας το εγχειρίδιο του φερρογράμματος μας εφοδιάζει με ποσοτικές πληροφορίες που είναι περίπου ανάλογες με τη συγκέντρωση των σωματιδίων στο λάδι.

Η φερρογραφία υστερεί σε μερικά από τα ίδια προβλήματα απώλειας ευαισθησίας στην ανάλυση του λαδιού από ένα σύστημα που λειτουργεί με φίλτρο, αλλά είναι προφανώς πιο ευαίσθητη από τη φασματοσκοπική μέθοδο, επειδή είναι απαραίτητος μόνο ο εντοπισμός μερικών μεγάλων σωματιδίων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα της φερρογραφίας είναι η ανικανότητα εντοπισμού του διαλυμένου τμήματος των μεταλλικών υλικών φθοράς που συχνά παράγονται υπό διαβρωτικές

συνθήκες φθοράς και διαφοροποίησης μεταξύ υλικών όπως τα Cr, Al και Pb-Sn, που δεν αντιδρούν προβλέψιμα στη θέρμανση.

Τα μεταλλικά σωματίδια διακρίνονται σε μη φερριτικά από τη μη μαγνητική τους απόθεση στο φερρόγραμμα. Αντί να διατάσσονται με το μαγνητικό πεδίο ώστε να εγκαθίστανται σε μια τακτική ίνα από φερριτικά σωματίδια, ένα μη φερριτικό σωματίδιο εναποτίθεται με τυχαίο προσανατολισμό. Τα μη φερριτικά σωματίδια εναποτίθενται κατά μήκος ολόκληρου του μήκους του φερρογράμματος, επειδή τα φερριτικά σωματίδια που είναι μεγαλύτερα από 2-3μm δεν διεισδύουν πέρα από θέση 50mm. Συνεπώς, εάν ένα μεταλλικό σωματίδιο μεγαλύτερο από μερικά μm εναποτεθεί σε μια απόσταση κάτω από την είσοδο, τότε είναι μη φερριτικό.

Τα λευκά μη φερριτικά μεταλλικά σωματίδια είναι ουσιαστικά δυσδιάκριτα όταν εξετάζονται με ένα οπτικό μικροσκόπιο. Όλα είναι λευκά και λαμπερά εκτός αν είναι επενδυμένα με οξειδία ή συμμίγματα.

Το Al είναι το πιο συχνά συναντώμενο λευκό μη φερριτικό μέταλλο. Το Mg, μολυβδαίνιο και ο Zn δεν συναντώνται σε κανονικές συνθήκες σε διαβρεγμένες με λάδι επαφές. Το Ti χρησιμοποιείται σε αεριοστροβίλους αεροσκαφών, αλλά πιο συχνά εμφανίζονται σε τμήματα διέλευσης αερίου της μηχανής παρά σε περάσματα διαβρεγμένα με λάδι εξαιτίας της τάσης αυτού του μετάλλου να φθείρεται. Το Cr χρησιμοποιείται σαν μία σκληρή επένδυση που αντέχει στη φθορά και ως κράμα στοιχείου για χάλυβα. Τμήματα ποτέ δε κατασκευάζονται από Cr επειδή είναι πολύ εύθραυστο. Το Κάδμιο χρησιμοποιείται μερικές φορές σαν στοιχείο σε κράματα εδράνων ή σαν επικάλυψη.

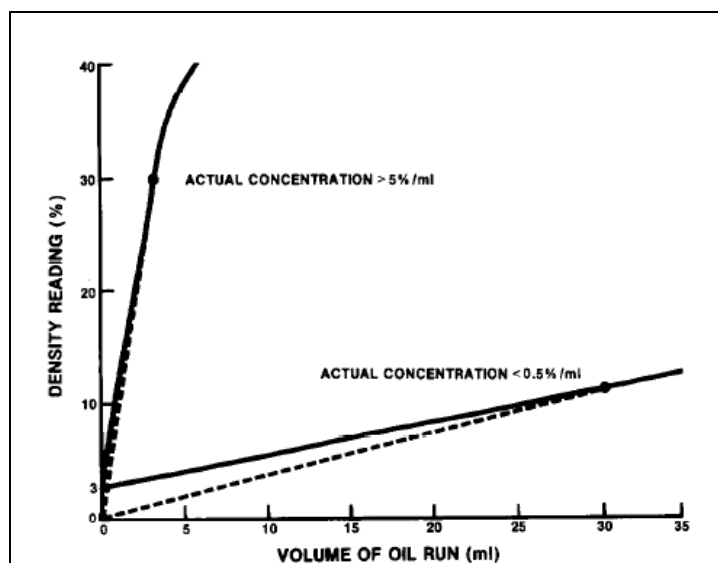
Τα κράματα χαλκού Cu αναγνωρίζονται εύκολα από το χαρακτηριστικό κοκκινοκίτρινο χρώμα τους. Κανένα άλλο κοινό μέταλλο δεν είναι τόσο χρωματισμένο εκτός από τον χρυσό που χρησιμοποιείται μόνο σε εξωτικές εφαρμογές.

Η φερρογραφία *εφαρμόζεται* στο εργαστήριο και στις μηχανές έδρασης για να καταλάβουμε καλύτερα τις διαδικασίες φθοράς που λαμβάνουν χώρα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να κάνουν τη φερρογραφία ποσοτική και ακριβείας σε ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων θραυσμάτων, παρουσιάζονται εδώ.

Μια εξομοίωση που περιγράφει τη χρονική διαφοροποίηση της συγκέντρωσης θραυσμάτων σε μια μηχανή, εφαρμόστηκε στα δεδομένα της φερρογραφίας για να μετρήσουμε το ρυθμό δημιουργίας σωματιδίων και την αποτελεσματικότητα φίλτραρίσματος με χάρτινο φίλτρο.

Για παράδειγμα η μηχανή μέσης ισχύος ενός φορτηγού οχήματος από καινούριο έως τη μέση ηλικία του (περίπου πάνω από 80000 μίλια), καταγράφεται κάθε 50 ώρες με αναλυτική φερρογραφία.

Περίληπτικά, η ποσοτική αναλυτική φερρογραφία είναι μια αποδεδειγμένη και ακριβής μέθοδος ανάλυσης μεταλλικών θραυσμάτων. Η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί με χρήση ενός παρεμβάσματος λαδιού (συλλέκτη) μηδενικού όγκου, τιμής $b=3\%$ (σχήμα 13).



Σχήμα 12 . Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη διαφορά στην κλίση μεταξύ της πραγματικής συγκέντρωσης (—) με 3% μηδενικού όγκου λαδιού παρεμβάσματος, συγκρινόμενο με την υποθετική καμπύλη (---) για δύο συγκεντρώσεις. [15]

Η φερρογραφία έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε κάθε ένα μοναδικό εργαστηριακό τεστ οργάνωσης και σε μια υγιή κατάσταση ελέγχου. Τα εργαστηριακά τεστ με τον Cummins VT-903 κινητήρα diesel, έδειξαν ότι το φίλτρο λαδιού 48μm είναι με προσέγγιση 0.5%, αποτελεσματικό στην απομάκρυνση μεταλλικών ρινισμάτων όπως υποδεικνύεται από τη φερρογραφία όταν η μηχανή λειτουργεί 2600rpm με 90% του πλήρους φορτίου. Τα τεστ πεδίου δείχνουν υψηλότερα επίπεδα θραυσμάτων από ότι στο εργαστήριο και τιμές με ευρεία διακύμανση. Δεν έχουν ακόμα εμφανιστεί αστοχίες μετά από 80000 μίλια στο φορτηγό όχημα της Ford με μηχανή Caterpillar.

Η εφαρμογή της φερρογραφίας δεν περιορίζεται μόνο στα βαρέα οχήματα, αλλά έχουμε και:

- Εφαρμογή της φερρογραφίας στην παρακολούθηση της κατάστασης γεωργικών και άλλων μηχανημάτων [16]
- Παρακολούθηση κατάστασης θαλάσσιων μηχανών diesel με φερρογραφική ανάλυση λαδιού [17]

Τέλος τα πλεονεκτήματα της μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω:

- Διαχωρισμός των αποβλήτων με κανονικό τρόπο σε σχέση με το μέγεθος τους.

- Παροχή λεπτομερειών και για τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά ενός αποβλήτου (ποσότητα, μέγεθος, μορφολογία και σύσταση).

- Εισαγωγή νέων μορφολογικών παραμέτρων και ορολογίας που σχετίζονται με τους μηχανισμούς που παράγουν απόβλιτα.

- Δυνατότητα εξέτασης αποβλίττων πολύ μικρού μεγέθους.

3.2 ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ

Φασματοσκοπική ανάλυση λαδιού

Η φασματοσκοπία είναι η μελέτη ενός εκ των διαφορετικών τύπων ενεργειακών φασμάτων που είναι χαρακτηριστικά για ένα στοιχείο. Όταν υπάρχουν χαρακτηριστικές φασματικές γραμμές για κάθε στοιχείο, είναι δυνατό να εκτελέσουμε μια ποιοτική και ποσοτική στοιχειακή ανάλυση ενός δείγματος ορίζοντας το ενεργειακό επίπεδο και την ένταση των φασματικών γραμμών. Υπάρχουν τρεις τύποι τεχνικών ανάλυσης φασματοσκοπικής ενέργειας που είναι ευρέως διαδεδομένες στη χρήση τους για ανάλυση λαδιού μηχανής από τεστ φθοράς: η διαφορική υπέρυθρη φασματοσκοπία, η ατομικής εκπομπής φασματοσκοπία και η ατομικής απορρόφησης φασματοσκοπία. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους μέτρησης ενέργειας έχουν διαφορετικές αρχές λειτουργίας, αλλά όλες στηρίζονται στην ίδια γενική ιδέα.

Η φασματογραφική ανάλυση λαδιού (Spectrographic Oil Analysis Program, SOAP) δίνει ποσοτικά αποτελέσματα ως προς την συγκέντρωση συγκεκριμένων στοιχείων: η συστηματική δειγματοληψία και ανάλυση μπορούν να μας υποδείξουν τον ρυθμό παραγωγής αποβλίττων από την αύξηση στοιχείων όπως σίδηρος, χρώμιο και μόλυβδος. Το SOAP είναι σχετικά ακριβό, αν και το κόστος για κάθε δείγμα μπορεί να είναι πολύ χαμηλό εάν μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για περισσότερες μηχανές. [24]

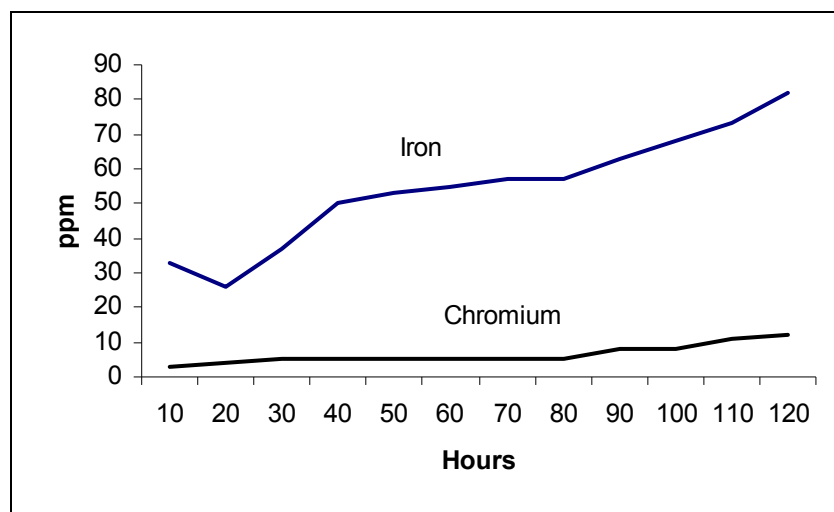
Σε κυκλικά συστήματα λαδιού, η διαδικασία SOAP για την παρακολούθηση των ρινισμάτων έχει αποδειχθεί πολύτιμη σε πρόσφατες εφαρμογές. Αντί να αφαιρούμε τα ρινίσματα από το λάδι, όλο το δείγμα λαδιού υπόκειται σε φασματοσκοπική ανάλυση. Μια περίληψη αυτού του τύπου της ανάλυσης λαδιού υποβλήθηκε από τους Lucas & Anderson (1998). Το μεταλλικό περιεχόμενο μετράται σε ppm. Οι ακόλουθες ενδεχόμενες αστοχίες μπορούν να εντοπιστούν με αυτό τον τρόπο :

- σπασμένοι δακτύλιοι πιστόνιων, φθαρμένες ή ξυσμένες κυλινδρικές επιφάνειες, και φθαρμένοι οδηγοί βαλβίδων
- φθαρμένα σφαιρικά ή κυλινδρικά έδρανα και/ή συγκρατητήρες
- φθαρμένα στροφικά έδρανα
- φθαρμένα πολύσφηνα
- φθαρμένα έκκεντρα
- χαραγμένα πιστόνια σε υδραυλικές αντλίες

Όπως έχει σημειωθεί, θραύσματα φθοράς έχουμε σε όλα τα μεγέθη και σχήματα. Ο τρόπος με τον οποίο τα θραύσματα έχουν σχηματιστεί, μπορεί να εντοπιστεί από το μέγεθος, σχήμα και υφή της επιφάνειας. Για παράδειγμα, τα θραύσματα από κοπή είναι μοναδικά στο ότι έχουν σποειροειδές και ινώδες σχήμα. Η παρουσία τους σε ένα δείγμα λαδιού σηματοδοτεί ένα σοβαρό πρόβλημα φθοράς που χρειάζεται άμεση προσοχή.

Τα απόβλιττα από ένα δείγμα λαδιού τα οποία έχουν διαχωριστεί με την μέθοδο της φερρογραφίας ή με άλλες μεθόδους, μπορούν να ταξινομηθούν κατά μέγεθος και η συχνότητα μεγέθους μπορεί να παρασταθεί γραφικά. Θεωρώντας ότι τα μεγαλύτερα απόβλιττα σχετίζονται με έντονη φθορά, μια σημαντική αύξηση τους στο γράφημα μπορεί να υποδείξει την ενδεχόμενη αστοχία.

Η χρήση των θραυσμάτων ως διαγνωστικό εργαλείο για την υγεία των μηχανημάτων είναι δύσκολη. Η αναγνώριση σημαντικών μορφολογικών χαρακτηριστικών χρώματος και χημικής σύστασης των διαφόρων σωματιδίων και στοιχείων που εμφανίζονται σε ένα δείγμα, χρειάζονται εμπειρία. Το πρόγραμμα SOAP έχει αποδειχτεί λειτουργικό για υδραυλικά συστήματα, κιβώτια ταχυτήτων και συμπιεστές. Η διάγνωση βασίζεται στο ιστορικό συγκέντρωσης συγκεκριμένων στοιχείων που βρέθηκαν σε δείγματα λαδιού. Τα σχετικά σωματίδια είναι κάτω από 10μm και πιο πιθανό μεγέθους υπομικρού. Ανιχνεύονται με φασματοσκοπικές μεθόδους που δίνουν υπολογιστικά αποτελέσματα συνήθως σε ppm. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα σχεδιάζονται σε συνάρτηση με τις ώρες λειτουργίας. Οι τάσεις των διαφόρων μετάλλων συγκρίνονται με το αρχικό δείγμα λαδιού που λήφθηκε την πρώτη ώρα. Από την εμπειρία, αυτές οι τάσεις (πχ η ξαφνική συνεχόμενη αύξηση στην περιεκτικότητα του σιδήρου) μπορεί να συσχετισθούν με επερχόμενες αστοχίες φθοράς σε συγκεκριμένα στοιχεία μηχανών.



Σχήμα 13. Μεταβολή της περιεκτικότητας σε σίδηρο και χρώμιο στο λάδι ενός κινητήρα [18]

Το πρόγραμμα SOAP έχει στρατιωτικές εφαρμογές σε μεγάλο φάσμα στρατιωτικών εξοπλισμών. Η εφαρμογή του στις Ένοπλες Δυνάμεις έχει τη μορφή του AOAP (Army Oil Analysis Program). Το AOAP είναι ένα στρατιωτικό πρόγραμμα που χρησιμοποιεί τεχνολογίες παρακολούθησης της κατάστασης μιας μηχανής για να αναλύει δείγματα λιπαντικών που εξάγονται από καταγεγραμμένα στοιχεία σε προγραμματισμένη βάση. Εργαστήρια σε όλο τον κόσμο με εξελιγμένα διαγνωστικά όργανα μπορούν να ανιχνεύσουν και να μετρήσουν τη φθορά από την ύπαρξη σωματιδίων, πριν γίνει αυτή ορατή με γυμνό μάτι. Το AOAP περιλαμβάνει βιομηχανικά δοκιμασμένες τεχνολογίες παρακολούθησης, όπως η φασματοσκοπική ανάλυση λαδιού.

Όπως και άλλα εργαλεία συντήρησης, πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλα για να είναι αποτελεσματικά.

Οι στρατιωτικοί εξοπλισμοί που παρακολουθούνται από το ΑΟΑΡ είναι πάρα πολλοί, όπως φαίνεται ενδεικτικά στον παρακάτω πίνακα :

Αεροναυτικός εξοπλισμός	
Ελικόπτερα	AH-64A, CH-47D, EH-60A, HH-60L, MH-47D, MH-6H, MH-60K, OH-58A, TH-67, UH-1, UH-60A
Αεροσκάφη	C-12, O-5A, RC-12D, RF-8G, U-21F
Μη αεροναυτικός εξοπλισμός	
Οχήματα-άρματα	M1 άρμα μάχης M1059 τεθωρ.όχημα μεταφοράς προσωπικού M106A1 αυτοκινούμενο πυροβόλο M109A4 αυτοκινουμένο πυροβόλο M113A2 τεθωρ.όχημα μεταφοράς προσωπικού M2 όχημα μάχης πεζικού M270 (MLRS) πολλαπλοί εκτοξευτές πυραύλων M3 τεθωρ. όχημα μάχης M4 μεταφοράς, διοίκησης & ελέγχου M48A5 άρμα μάχης M48A5AVLB τεθωρακισμένο όχημα-γέφυρα M548 μεταφοράς φορτίου M551A1 όχημα αναγνώρισης M578 άρμα περισυλλογής M60A3 άρμα μάχης M93A1FOX όχημα αναγνώρισης PBXII
Αμαξοστοιχία	RAIL C 25T
Πλωτά μέσα	BBEUSCSBMK1 ανυψούμενη πλωτή γέφυρα BD-264B πλωτή φορτηγίδα-γερανός BP περιπολικό λιμενικού LCM8 αποβατικό σκάφος, LSV πλοίο υποστήριξης εφοδιασμού LT ρυμουλκό σκάφος

Πίνακας 4 . [22]

4. Γενικά συμπεράσματα

Η μορφολογική εξέταση των αποβλίτων της φθοράς αποτελεί, σε σχέση με τη φερρογραφία, μια πιο ικανή τεχνική προκειμένου να αποκομίσουμε στοιχεία για την κατάσταση του παρακολουθούμενου συστήματος. Ενώ η φερρογραφία απλώς πραγματοποιεί μια χονδρική διαλογή κατά μέγεθος και μαγνητικές ιδιότητες και στη συνέχεια εκτιμά το σύνολο του όγκου τους, η μορφολογική εξέταση μας παρέχει τη δυνατότητα να εξετάσουμε περισσότερες παραμέτρους για τα απόβλιτα, έτσι ώστε να μπορούμε να εκτιμήσουμε καλύτερα, τόσο το μηχανισμό παραγωγής των αποβλίτων, όσο και τη δριμύτητα του φαινομένου.

Η μορφολογική εξέταση των αποβλίτων αποτελεί ένα συμπληρωματικό εργαλείο σε σχέση με τη φερρογραφία και τη φασματοσκοπική ανάλυση. Αποτελεί μια οικονομική, από απόψεως εξοπλισμού, αλλά απαιτητική σε ανθρώπινη εργασία μέθοδο, ενώ, συγκριτικά, η φερρογραφία είναι μια σχεδόν αυτοματοποιημένη μέθοδος και ο εξοπλισμός της δεν είναι ιδιαίτερα ακριβός. Αυτοματοποιημένη βέβαια είναι και η φασματοσκοπική ανάλυση με την διαφορά όμως ότι το κόστος είναι αρκετά αυξημένο.

Μέχρι τώρα δεν έχει γίνει συστηματική προσπάθεια προς την κατεύθυνση της αυτοματοποίησης. Κάτι τέτοιο προϋποθέτει ασφαλώς την ύπαρξη εξειδικευμένου προσωπικού που με συστηματικό τρόπο να ασχοληθεί με αυτό το αντικείμενο. Ωστόσο μπορεί να έχει πολλά πλεονεκτήματα προς μελλοντική χρήση, όπως μείωση του απαιτούμενου χρόνου για αναγνώριση των αποβλίτων φθοράς, απομάκρυνση από την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης παρατήρησης και ασφαλώς σαφέστερη ένδειξη για τον μηχανισμό και τις συνθήκες από τις οποίες προέρχεται η φθορά.

Βιβλιογραφία

- [1] Μελέτη Τριβολογικής Ανάλυσης, Ι.Αντωνιαδης, 1995
- [2] Wear-debris detection and analysis techniques for lubricant-based condition monitoring- Barwell 1978]
- [3] G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor, Engineering Tribology, Handbook, Elsevier (1993)
- [4] Automated classification of wear particles based on their surface texture and shape features, widon P. Stachowiak_, Gwidon W. Stachowiak, Pawel Podsiadlo, June 2007
- [5] ENGINEERING TRIBOLOGY, Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor
- [6] WEAR ANALYSIS, D Scott
- [7] The effect of misalignment on performance characteristics of engine main crankshaft bearings, Glasier Metal Co, 1985
- [8] Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems, V. Macian, R. Payri, B. Tormos, L. Montoro, February 2005
- [9] Recognition of texture types of wear particles, M. S. Laghari
- [10] Surface Feature Recognition of Wear Debris, Mohammad Shakeel Laghari
- [11] Wear particle analysis—utilization of quantitative computer image analysis: A review, Surapol Raadnui, June 2005
- [12] (Bowen 1976 Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids)
- [13] (Day M.J. 1996 “Condition Monitoring of Fluid Systems-The need for a Systematic Approach”)
- [14] Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems, V. Macian, R. Payri, B. Tormos , L. Montoro, February 2005
- [15] AN OVERVIEW OF RECENT ADVANCES IN QUANTITATIVE FERROGRAPHY AS APPLIED TO DIESEL ENGINES, JOHN H. JOHNSON and CHRISTOPHER J. HUBERT, November 1982)
- [16] APPLICATION OF FERROGRAPHY TO THE CONDITION MONITORING OF AGRICULTURAL MACHINERY*, VLADIMIR NOVOTNY, November 1982

- [17] CONDITION MONITORING OF MARINE DIESEL ENGINES THROUGH FERROGRAPHIC OIL ANALYSIS, STEVEN C. HARGIS, HERBERT F. TAYLOR, Jr., and JAMES S. GOZZO, November 1982
- [18] William A. Glaeser. Wear Debris Classification, Modern Tribology Handbook, Chapter 8, CRC Press (2001)
- [19] British Coal Wear Particle Atlas (1984)
- [20] Guide to Wear Particle Recognition (University of Swansea-Tribology Centre, M.H.Jones, 1994)
- [21] Wear Particle Atlas (1982/91) (Spectro Incorporated)
- [22] DEPARTMENT OF THE ARMY TECHNICAL BULLETIN AERONAUTICAL EQUIPMENT ARMY OIL ANALYSIS PROGRAM (AOAP) Headquarters, Department of the Army, Washington, D.C., 10 April 1987
- [23] Σ.Ε. Σιμόπουλου, Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών, ΕΜΠ (1989)
- [24] C. Evans, Wear debris analysis and condition monitoring, NDT International, June 1978
- [25] D. Scott, W. W. Seifert, V. C. Westcott, Ferrography – An advanced design aid for the 80's, Wear, 34, 251-260 (1975)
- [26] B. J. Roylance, Ferrography – then and now, Tribology International, 38, 857-862 (2005)
- [27] Correlation between the tribological behaviour and wear particle morphology—case of grey cast iron 250 versus Graphite and PTFE, C. Kowandy, C. Richard, Y-M. Chenb, J-J. Tessier, December 2006
- [28] Quantitative correlation of wear debris morphology: grouping and classification, Unchung Cho, John A. Tichy, April 2000
- [29] Τεχνικό Εγχειρίδιο Ε.Φ.Α.Ε , Πολεμική Αεροπορία, 2008
- [30] Πηγή: Spectro Inc.
- [31] Εγχειρίδιο Οπτικού Μικροσκοπίου LEITZ DMR
- [32] ΚΕΤΑ-ΕΤΗΜ, Πολεμική Αεροπορία, 2008
- [33] Πρόγραμμα Image-Pro Plus