

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΗΧ
697

ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

ΔΙΣΚΟΥ ΠΕΔΗΣΗΣ ΔΙΚΛΥΚΛΟΥ ΥΨΗΛΟΥ ΚΥΒΙΣΜΟΥ

Υπεύθυνοι σπουδαστές:

Αντώνιος Δημητρίου Καλτσουκαλάς Α.Μ. :33275

Μιχάλης Παναγιώτη Λιγουδιστιανός Α.Μ. :33797

Πέτρος Ιωάννου Μπουρνέλης Α.Μ. :37727

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Δρ Πανδώρα Ψυλλάκη

Αιγάλεω, Νοέμβριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα την **Ανάλυση Αστοχίας** δίσκου πέδησης δικύκλου υψηλού κυβισμού. Αναπτύχθηκε η διαχρονική εξέλιξη των συστημάτων πέδησης οχημάτων και έγινε εκτενής ανασκόπηση δεδομένων από την διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία σε θέματα που αφορούν στην αστοχία τέτοιων συστημάτων. Στη συνέχεια αναλύθηκε η περίπτωση πραγματικής αστοχίας ενός δίσκου πέδησης μια δίκυκλης μηχανής υψηλών επιδόσεων. Συγκεκριμένα, αφού αναγνωρίστηκε και αναλύθηκε το είδος της μηχανικής φόρτισης όπου δέχεται το συγκεκριμένο εξάρτημα κατά την λειτουργία του, προσδιορίστηκε το επίπεδο των μηχανικών τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτό. Πραγματοποιήθηκε μακροσκοπικός εντοπισμός των περιοχών αστοχίας του δίσκου και πειραματική/ εργαστηριακή διερεύνηση των μηχανισμών όπου οδήγησαν σε αστοχία. Τέλος, έγινε σύγκριση των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, τα οποία υπέδειξαν ως κύριο μηχανισμό της αστοχίας την συνδυασμένη δράση μηχανικής υπερφόρτισης/ κόπωσης και δομικής υποβάθμισης του στοιχείου λόγω επιφανειακής τριβικής καταπόνησης.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση Αστοχίας, Δίσκος Πέδησης, Ανοξειδωτος χάλυβας, Θραυστογραφία, Κόπωση, Επιφανειακές καταπονήσεις, Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων.

ABSTRACT

The present study examines the **Failure Analysis** of a brake rotor, operating in an on-off motorcycle system. Firstly, the up to date evolution of such systems, together with an extent review of relevant research on brake rotors failure, -presented in the international scientific community,-will be presented. Secondly, the case of premature failure of a brake rotor of an on-off motorcycle was analyzed and will also be presented. In particular, the mechanical loading of this component during operation was determined and the occurring stress/ temperature field was calculated employing Finite Element Method. Consequently, the regions of failure were macroscopically recognized and specimens were taken of these loci for further laboratory examination. The co-evaluation of computational and laboratory findings indicated as root cause the combined activation of overloading/ fatigue and tribological mechanisms, during element service for 50000 km.

Keywords: Failure mode an effect analysis (FMEA), Brake rotor, Stainless Steel, Fractography, Fatigue, Surface loading, Finite Element Analysis (FEA).

Περιεχόμενα	
Περίληψη	2
Abstract	3
Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 1:Μεθοδολογία Ανάλυσης Αστοχίας.....	9
1.1 Αστοχίας μηχανολογικών εξαρτημάτων	9
1.2 Μεθοδολογία ευρεσης αιτων καταστροφικής αστοχίας.....	11
1.3 Πειραματικές Τεχνικές ανάλυσης αστοχίας.....	14
1.4 Μοντελοποίηση και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.....	15
Κεφάλαιο 2:Συστήματα Πέδης Οχημάτων	18
2.1 Η λειτουργία του συστήματος πέδης	18
2.1.1 Τρόπος Λειτουργίας.....	18
2.1.2 Ενέργεια πέδης.....	19
2.1.3 Παράγοντες όπου επηρεάζουν την επιβράδυνση.....	20
2.2 Είδη συστημάτων πέδης.....	21
2.2.1 Μηχανικά Φρένα.....	21
2.2.2 Υδραυλικά Φρένα	23
2.3 Παράγοντες ζωής συστημάτων πέδησης.....	29
2.3.1 Τριβή - Friction	29
2.3.2 Φθορά -Wear.....	30
2.4 Προγενέστερες Μελέτες αστοχίας των δίσκων πέδησης	33
Κεφάλαιο 3:Καταστροφική αστοχία δίσκου πέδησης	39
3.1 Ιστορικό Χρήσης Δίσκου πέδης.....	39
3.2 Εφαρμογή πειραματικών μεθόδων.....	40
3.2.1 Εργαστηριακές τεχνικές διάγνωσης.....	40
3.2.2 Σχεδιαστικές/Υπολογιστικές Μέθοδοι.....	49

Κεφάλαιο 4:Αποτελέσματα διερεύνησης	53
4.1 Μακροσκοπική παρατήρηση.....	53
4.2 Χημική Ανάλυση.....	57
4.3 Μεταλλογραφική παρατήρηση	58
4.3.1 Παρατήρηση Μικροδομής για τους δίσκους πέδησης.....	58
4.3.2 Παρατήρηση μικροδομής. για το Πλακίδιο τριβής.....	59
4.3.3 Παρατήρηση διάδοσης ρωγμής	61
4.4 Παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM)	62
4.4.1 Παρατήρηση Μικροδομής	63
4.4.2 Παρατήρηση επιφάνειας τριβής-φθοράς.	71
4.4.3 Παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης (Fracture surface)	75
4.4.4 Παρατήρηση του πέδου τριβής (Brake Pad).....	82
4.5 Κρυσταλλογραφική ανάλυση (XRD).....	85
4.6 Οπτική Προφίλομετρία	86
4.6.1 Παρατήρηση των επιφανειών τριβής.....	86
4.7 Η παρατήρηση στο μικροσκληρόμετρο	89
4.8 Ανάλυση με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	95
5.1 Μακροσκοπική αξιολόγηση.....	95
5.2 Αξιολόγηση της Χημικής σύστασης.	95
5.3 Μεταλλογραφική αξιολόγηση.....	96
5.4 Κρυσταλλογραφική (XRD) αξιολόγηση.....	96
5.5 Αξιολόγηση του προφίλομέτρου.....	97
5.6 Αξιολόγηση σκληρομετρήσεων.	97
5.7 Αξιολόγηση δεδομένων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 :Συμπεράσματα ανάλυσης	101
Βιβλιογραφία	102

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανάλυση αστοχίας (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) είναι μια προσέγγιση του μηχανικού για να καθορίσει πώς και γιατί ένα εξάρτημα έχει σταματήσει να λειτουργεί για τον σκοπό όπου είχε κατασκευαστεί . Η ανάλυση αστοχίας αποτελεί το πιο ολοκληρωμένο εργαλείο σχεδιασμού για τη Διασφάλιση της Ποιότητας ενός τελικού προϊόντος ή διεργασίας που όταν συντάσσεται στα πρώιμα στάδια της ζωής του οδηγεί στην αύξηση της αξιοπιστίας μιας γραμμής παραγωγής. Οπότε, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση αστοχίας για δίσκο πέδησης μοτοσυκλέτας. Ορισμένες περιπτώσεις αστοχίας είναι η φθορά, η διάβρωση, η υπερφόρτωση, μηχανικές βλάβες καθώς και άλλες αφανείς επιδράσεις που μπορεί να έχει το υλικό μας, όπως τα εγκλείσματα. Έτσι καταλαβαίνουμε ότι για τα εξαρτήματά μας, σημαντικός παράγοντας είναι οι συνθήκες του περιβάλλοντος όπου είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί. Ένας συνδυασμός των συνθηκών μαζί με τις φορτίσεις και την κόπωση που δέχεται είναι η πιο συχνή αιτία αστοχίας των μηχανολογικών εξαρτημάτων. Στα εξαρτήματα γίνεται σχεδίαση και μελέτη για αντοχή στο περιβάλλον και τις φορτίσεις. Το κάθε εξάρτημα έχει κοινή διεργασία παραγωγής όπως θερμική κατεργασία, μηχανουργική κατεργασία κ.ά. Έτσι τα εξαρτήματα έχουν συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες. Ο στόχος της ανάλυσης αστοχίας είναι η κατανόηση της ρίζας του αιτίου απ' όπου αστόχησε, έτσι ώστε να αποτραπεί παρόμοιο φαινόμενο αστοχίας στο μέλλον. Αναγνωρίζοντας τη ρίζα από την οποία προήλθε ή διαδικασία της αστοχίας, μας επιτρέπει να εξηγήσουμε το "πώς και το γιατί" αυτής. Για την έρευνα χρησιμοποιούνται τόσο καταστροφικές όσο και μη καταστροφικές μέθοδοι. Η αποτροπή μιας μελλοντικής αστοχίας γίνεται προτείνοντας μια βελτιωτική ενέργεια για το εξάρτημά μας σε κάποιο από τα στάδια παραγωγής, όπως διαφορετική θερμική κατεργασία (heat treatment), αλλαγή στον τρόπο χειρισμού του ή ακόμα και στο αρχικό κατασκευαστικό σχέδιο.

Ο εξοπλισμός που είχαμε για μελέτη ήταν μέρος μοτοσυκλέτας, που ανήκει στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας η οποία είναι ένας τομέας όπου απασχολεί χιλιάδες μηχανικούς οι οποίοι έχουν διάφορες ειδικότητες. Ο συνδυασμός όλων αυτών των μηχανικών και των γνώσεών τους κατά συνέπεια συμβάλλει στην εξέλιξη του τομέα

καθημερινά, σε θέματα μεταφοράς των επιβατών, ασφάλειας και γενικής εξέλιξης του όλου συνόλου προς όφελος του επιβατικού κοινού. Μέχρι σήμερα ο καλύτερος τρόπος κίνησης είναι ο τροχός. Η εξέλιξη του συστήματος πέδης των τροχών δεν παύει να συνεχίζεται καθώς παλαιότερα οι ταχύτητες δεν ήταν πολύ μεγάλες και τα συστήματα ήταν απλά, ενώ σήμερα οι ταχύτητες όπου αναπτύσσονται είναι πολύ μεγάλες και είναι αναγκαία η βέλτιστη απόδοσή τους για την αποφυγή ατυχήματος όπου μπορεί να είναι σοβαρό.

Η εργασία χωρίζεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά γύρω από την ανάλυση αστοχίας υλικών, την μεθοδολογία όπου ακολουθείται όπως και τις βασικές αρχές των υπολογιστικών εργαλείων. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται το σύστημα πέδησης και οι εφαρμογές του στα οχήματα, οι μηχανισμοί του όπως και παλαιότερες μελέτες ερευνητών γύρω από το θέμα μας. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός όπου είχαμε στην διάθεσή μας για την ολοκλήρωσή της. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπου λάβαμε από τις πειραματικές και υπολογιστικές διαδικασίες. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και στο έκτο και τελευταίο καταθέτουμε τα συμπεράσματά μας και τις βελτιωτικές προτάσεις.

Η εργασία αυτή που έχετε στα χέρια σας είναι κοινή προσπάθεια πολλών ανθρώπων μαζί, καθηγητών καθώς και μηχανικών, όπου συνεργάστηκαν για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα και την παρουσίασή τους.

Ευχαριστίες θα θέλαμε να δώσουμε στην Καθηγήτρια κα Δρ Πανδώρα Π. Ψυλλάκη Μεταλλουργό Μηχανικό ΑΠΘ, επιβλέπουσα του θέματος και για τις πολύτιμες συμβουλές της καθώς και την βοήθειά της.

Στον καθηγητή μας Δρ Αντώνιο Τσολάκη Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, ο οποίος εισηγήθηκε το θέμα της εργασίας, καθώς και την παραχώρηση των προς μελέτη εξαρτημάτων.

Την Αυστριακή κατασκευάστρια εταιρεία μοτοσυκλετών KTM και πιο συγκεκριμένα τον κύριο Johannes Lampertsdoerfer, για την προσφορά του εξοπλισμού και την παροχή σημαντικών πληροφοριών όπου ζητήθηκαν.

Ευχαριστίες να δώσουμε στο ΕΛΚΕΜΕ (Ελληνικό Κέντρο Έρευνας Μετάλλων) για την αποδοχή της στην πρότασή μας για συνεργασία με την μορφή της πρακτικής άσκησης του Φοιτητή Πέτρου Μπουρνέλη. Στον MSc Αθανάσιο Βαζδιβανίδη, Μεταλλουργό Μηχανικό ΕΜΠ και τον Αντρέα Ρίκο τεχνικό του χώρου της μεταλλογραφίας, για την καθοδήγησή τους. Την κυρία Αθανασία Φλαμπούρη, Μεταλλουργό Μηχανικό ΕΜΠ για την συμβολή της στην έκδοση των αποτελεσμάτων του περιθλασιομέτρου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα θέλαμε να δώσουμε στον Δρ Γεώργιο Πανταζόπουλο, Χημικό Μηχανικό ΕΜΠ και γενικό διευθυντή του ΕΛΚΕΜΕ για το ενδιαφέρον, για την καθοδήγησή του και για τις συμβουλές του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Μεθοδολογία Ανάλυσης Αστοχίας

1.1 ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Η απόκλιση του αποτελέσματος μιας πράξης/ ενέργειας από τον αρχικό στόχο που τέθηκε πριν την πραγματοποίησή της περιγράφεται με τον όρο «αστοχία» (failure) [6]. Η απόκλιση μπορεί να οφείλεται σε λάθος σχεδιασμό, λόγω ασαφούς διατύπωσης του προς επίλυση θέματος ή/και μη ορθό καθορισμό οριακών συνθηκών του προβλήματος ή ακατάλληλης επιλογής την μεθοδολογίας υλοποίησης. Μπορεί επίσης να οφείλεται σε λανθασμένη υλοποίηση του αρχικού σχεδιασμού δηλαδή μη τήρηση των οδηγιών που τέθηκαν κατά τον σχεδιασμό. Επιπλέον μπορεί να οφείλεται και σε λανθασμένη αξιοποίηση του αποτελέσματος του προηγούμενου σταδίου, όπου μπορεί να αφορά είτε τη μη ασφαλή διερεύνηση των ορίων του αρχικού στόχου, είτε την εξυπηρέτηση στόχων διαφορετικών από αυτούς που αρχικά τέθηκαν. Τέλος μπορεί να οφείλεται στις συνθήκες λειτουργίας και περιβάλλοντος όταν αυτές είναι ακραίες και σπάνιες και δεν τις έχουμε υπολογίσει στην μελέτη μας καθώς το ενδεχόμενο να είναι αυτές είναι μηδαμινό.

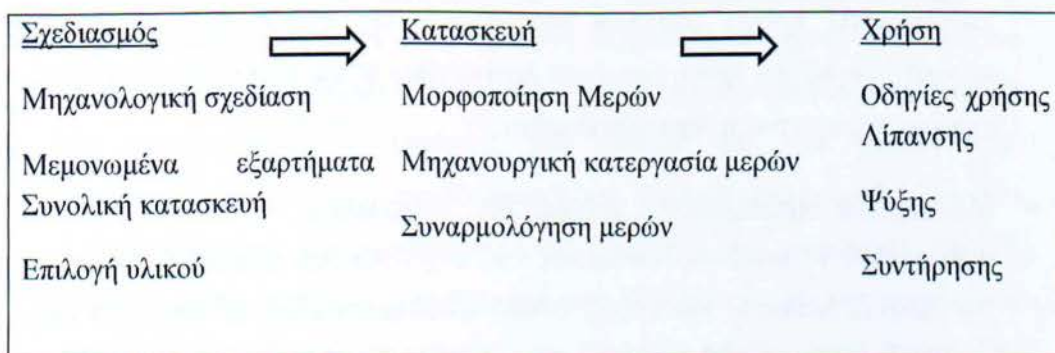
Τα μηχανολογικά εξαρτήματα όλα μαζί απαρτίζουν μια ομάδα για την τελική μορφή της κατασκευής· συνδέονται και συναρμολογούνται με συγκόλληση, κόλληση, κοιλίωση ή ήλωση. Αυτά τα εξαρτήματα συνεργάζονται, έτσι ώστε η κατασκευή μας να είναι σε μια αρμονική λειτουργία για το περιβάλλον όπου έχουν μελετηθεί. Προκειμένου να εξασφαλισθεί η απρόσκοπτη λειτουργία της κατασκευής και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες μη αναμενόμενης αστοχίας (δηλαδή πριν τον χρόνο ζωής όπου έχει δώσει ο κατασκευαστής) ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί σε κάθε ένα από τα ακόλουθα στάδια (σχήμα 1.1) :

- Στάδιο σχεδιασμού. Σ' αυτό το στάδιο περιλαμβάνεται αφενός η διαστασιολόγηση της κατασκευής, ο καθορισμός δηλαδή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τόσο των μεμονωμένων μερών όσο και της συνολικής κατασκευής, αφετέρου δε η επιλογή του υλικού από το οποίο θα κατασκευαστεί προκειμένου αυτό να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του περιβάλλοντος

λειτουργίας. Η μελέτη σχεδιασμού συνιστά μέρος του τεχνικού φακέλου μιας μηχανολογικής κατασκευής ο οποίος αποτελεί αναπόσπαστο τεχνικό εγχειρίδιο που τη συνοδεύει σε όλη τη διάρκεια ζωής της.

- Στάδιο κατασκευής . Στο στάδιο αυτό οι εργασίες που περιγράφονται λεπτομερώς στη μελέτη σχεδιασμού υλοποιούνται από τον κατασκευαστή προκειμένου να διαμορφωθεί το τελικό αντικείμενο.
- Στάδιο λειτουργίας. Στο στάδιο αυτό ο τελικός χρήστης της κατασκευής χρησιμοποιεί το τελικό αντικείμενο προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος για τον οποίο αρχικά σχεδιάστηκε και εν συνεχεία κατασκευάστηκε. Πρέπει εδώ να επισημανθεί ότι οι μηχανολογικές κατασκευές εξυπηρετούν συγκεκριμένους στόχους και λειτουργούν σε δεδομένο περιβάλλον. Προκειμένου να εξασφαλισθεί η ικανοποιητική λειτουργία τους, ο τελικός χρήστης θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις οδηγίες χρήσης του κατασκευαστή, οι οποίες αφορούν τον τρόπο διαχείρισης και συντήρησης της κατασκευής και αποτελούν επίσης αναπόσπαστο συνοδευτικό εγχειρίδιο της κατασκευής.

Για οποιαδήποτε απόκλιση, παράβλεψη ή λανθασμένη αξιολόγηση σε κάποιο από τα στάδια αυτά μπορεί να εισάγει παράγοντες που σε χρονικό διάστημα μικρότερο από το προβλεπόμενο χρόνο ζωής της κατασκευής θα οδηγήσουν σε αστοχία της. Για το λόγο αυτό και προκειμένου αφενός να ανιχνευθεί το πραγματικό αίτιο αστοχίας και να αρθεί εφόσον αυτό είναι εφικτό, αφετέρου να αποφευχθεί η επανάληψη του ίδιου σφάλματος, είναι απαραίτητη η λεπτομερής ανάλυση καταγραφή των βημάτων υλοποίησης καθώς και η συστηματική τήρηση του πρωτοκόλλου χρήσης και εργασιών συντήρησης της κατασκευής.



Σχήμα 1.1 : Διακριτά στάδια της ζωής μιας μηχανολογικής κατασκευής.

Στις περιπτώσεις μηχανολογικών κατασκευών, η αστοχία μπορεί να αφορά :

- Μη ικανοποιητική λειτουργία, η οποία με απλή ρύθμιση, επιδιόρθωση ή αντικατάσταση μεμονωμένου μέρους της κατασκευής μπορεί να αποκατασταθεί.
- Μη ασφαλή λειτουργία, η οποία μπορεί επίσης να αντιμετωπιστεί με προσωρινή διακοπή της λειτουργίας της κατασκευής και αντικατάσταση ή επιδιόρθωση μερών ή υποομάδων.
- Παύση λειτουργίας με ταυτόχρονη καταστροφή αστοχίας υλικού, η οποία είναι και η πιο επικίνδυνη, αφού τις περισσότερες φορές επέρχεται χωρίς προειδοποίηση.

1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΑΙΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Στις περισσότερες περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας, τα «αποτυπώματα» του κύριου αίτιου που οδήγησαν σ' αυτήν μπορούν να ανιχνευθούν στα κερματισμένα τεμάχια της κατασκευής, με την συστηματική ανάλυση των οποίων είναι δυνατός ο προσδιορισμός, τόσο του σταδίου -σχεδιασμός, κατασκευή, χρήση,- κατά το οποίο εισήχθη στο σύστημα το κρίσιμο αίτιο αστοχίας, όσο και της επιβαρυντικής επίδρασης που αυτό είχε στην εξέλιξη της αστοχίας.

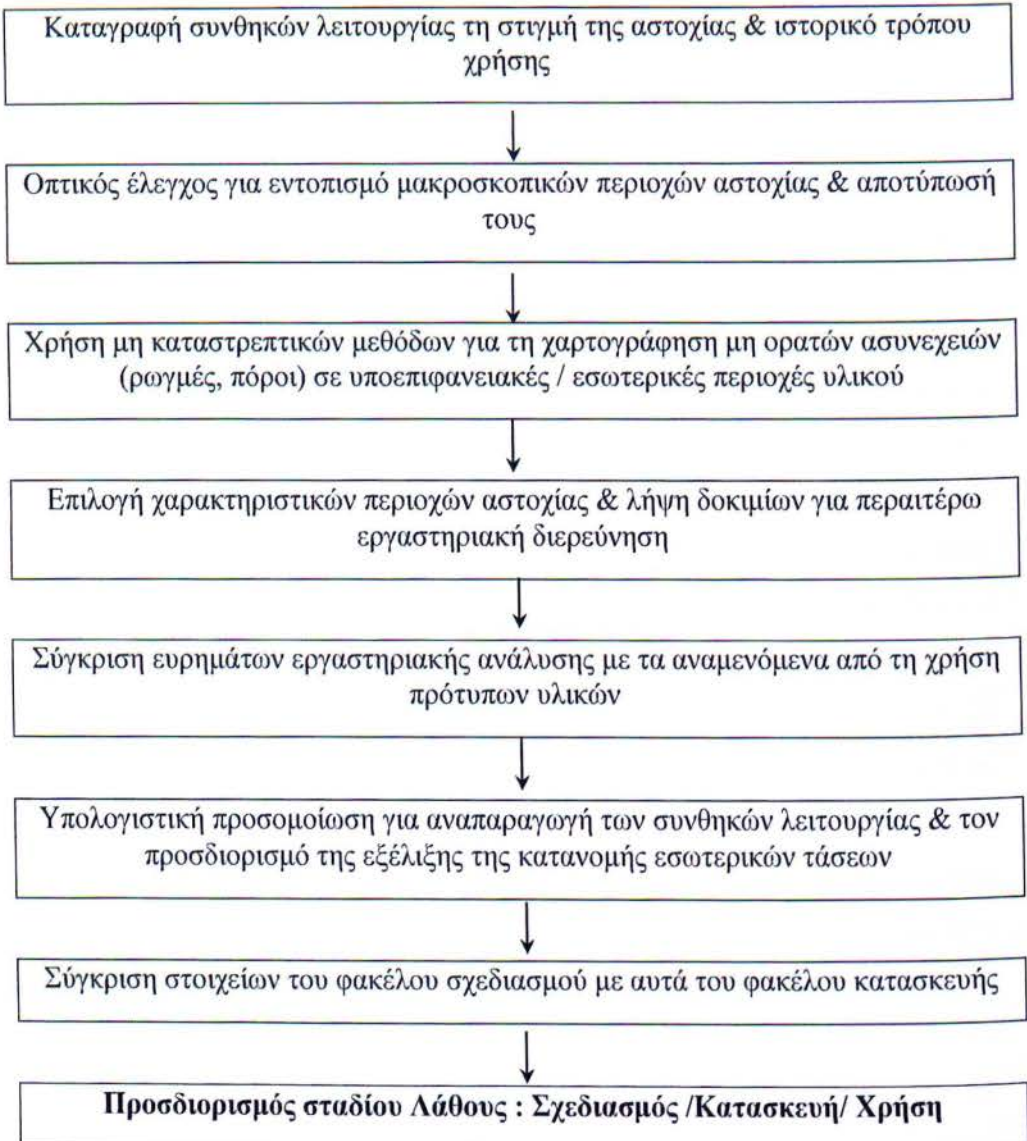
Η γενική μεθοδολογία ανάλυσης της αστοχίας περιλαμβάνει διαδοχικά βήματα που, κατά περίπτωση, θα ακολουθηθούν στο σύνολο ή κατά ένα μέρος τους [6] (Σχήμα 1.2):

- Καταγραφή των συνθηκών λειτουργίας τη στιγμή της αστοχίας προκειμένου να προσδιοριστεί πιθανή μηχανική υπερφόρτιση της κατασκευής (εκτός των προδιαγεγραμμένων ορίων ασφαλούς λειτουργίας) ή/ και μη συνήθης παρουσία χημικών παραγόντων ή θερμικών φορτίων.
- Μελέτη του πρωτοκόλλου χρήσης της κατασκευής, όπου καταγράφεται συστηματικά το ιστορικό λειτουργίας της: συχνότητα και περιγραφή εργασιών συντήρησης, λίπανσης και ψύξης, πιθανά προβλήματα κατά τη λειτουργία της, συχνότητα και χρονικό διάστημα χρήσης εκτός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας.

ασυνήθεις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος, κλπ.

- Φωτογραφική αποτύπωση της μηχανολογικής κατασκευής μετά την αστοχία της και οπτική εξέταση των κερματισμένων τεμαχίων της (χωρίς να προηγηθεί καθαρισμός τους), προκειμένου να εντοπιστούν σημαντικές μεταβολές της μορφολογίας, της υφής ή/ και του χρωματισμού του αντικειμένου γύρω από την περιοχή της αστοχίας.
- Εφαρμογή τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου (Non-Destructive Testing, NDT). Αφορά τεχνικές, -όπως είναι τα διεισδυτικά υγρά, οι υπέρηχοι, τα μαγνητικά σωματίδια και οι ραδιογραφίες,- που είτε εφαρμόζονται επιτοπίως με χρήση φορητών συσκευών, είτε σε εργαστηριακό περιβάλλον με χρήση συσκευών υψηλότερης ακρίβειας και ανάλυσης. Τα στοιχεία που θα συλλέξουμε σ' αυτό το στάδιο θα επιτρέψουν τον προσδιορισμό επιφανειακών ή υπο-επιφανειακών ατελειών μικροδομής (πόροι, ρωγμές ή/ και εγκλείσματα), το είδος και η θέση των οποίων υποδεικνύουν πιθανές πηγές έναρξης ή επιτάχυνσής της.
- Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών περιοχών αστοχίας και μικροσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης του υλικού (θραυστογραφία /fractography). Η μορφολογία των επιφανειών που δημιουργήθηκαν από την θραύση του εξαρτήματος είναι ενδεικτική του μηχανικού φορτίου που επενέργησε στο υλικό προκαλώντας την τελική του αστοχία και αρκετές φορές του χρόνου φόρτισης του αντικειμένου. Η μελέτη λοιπόν των επιφανειών θραύσης αποτελεί βασικό στάδιο στην ανάλυση της αστοχίας, αφού αυτές φέρουν τα «αποτυπώματα» της ιστορίας φόρτισης του εξεταζόμενου.
- Εργαστηριακός έλεγχος του υλικού του συστήματος του αστόχησε. Ο εργαστηριακός έλεγχος σε αυτή τη φάση περιλαμβάνει: χημική ανάλυση του υλικού για τον προσδιορισμό της σύστασής του, μικροσκοπική παρατήρηση για τον προσδιορισμό του μεγέθους των κόκκων και των φάσεών του, σκληρομέτρηση για τον προσδιορισμό του βαθμού σκλήρυνσής του και τραχυμέτρηση για τον προσδιορισμό της ποιότητας της επιφάνειάς του. Οι τεχνικές αυτές απαιτούν την απομάκρυνση (θυσία) υλικού (καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου) και εφαρμόζονται σε τελευταίο στάδιο, αφού πρώτα έχει πλήρως καταγραφεί η εικόνα του αντικειμένου που αστόχησε και των επιφανειών θραύσης. Τα στοιχεία που θα συλλέχθουν απ' αυτό το στάδιο θα επιτρέψουν τον

προσδιορισμό πιθανών παρεκκλίσεων, κατά τη φάση της κατασκευής του εξαρτήματος από τις σχεδιαστικές προδιαγραφές του που αφορούν την ποιότητα του υλικού, τη θερμική ή/και την επιφανειακή του καταργασία.



Σχήμα 1.2 : Γενική μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας.

1.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Κοιτώντας κάποιος γύρω του θα παρατηρήσει την ύπαρξη διάφορων υλικών (μεταλλικών και μη). Αυτά τα υλικά έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και είναι σχεδιασμένα για κάποια συγκεκριμένη χρήση. Το κοινό όπου απευθύνονται τα προϊόντα έχει απαιτήσει και αναζητά αξιοπιστία στην χρήση του και καλή λειτουργία κατά την διάρκεια ζωής του ώστε να μην υπάρχει απροσδόκητη αστοχία του υλικού μας. Υπάρχουν λοιπόν διάφορες μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό των υλικών και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τις καταστροφικές και μη-καταστροφικές μεθόδους. Οι καταστροφικές μέθοδοι (Destructive testing, DT) όπου είναι αναγκαία η απόσπαση δείγματος από το υλικό, συγκεκριμένων διαστάσεων όπου εξαρτάται ανάλογα την μέθοδο και την δοκιμή, για τη διερεύνηση ύπαρξης ελαττωμάτων, ο περαιτέρω έλεγχος του αντικειμένου για τον προσδιορισμό τυχόν διαφοροποιήσεων στην χημική σύσταση, τη μικροδομή κ.ά. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι (Non-destructive testing, NDT), όπου δεν επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά ή η λειτουργικότητα του προς μελέτη υλικού μας για τον χαρακτηρισμό αυτού. Έτσι χρησιμοποιούνται, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα αστοχίας ενός μεταλλικού υλικού λόγω ύπαρξης εσωτερικών ατελειών (πόροι, ρωγμές). Οι μέθοδοι μη καταστρεπτικού ελέγχου χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην παραγωγική διαδικασία, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα αστοχίας σε κάποια από τις ενδιάμεσες φάσεις της παραγωγής [3]. Παρακάτω ο πίνακας 1.1 μας παρουσιάζει ορισμένες από τις πιο σημαντικές μεθόδους ελέγχου υλικών.

Πίνακας 1.1 : Μέθοδοι χαρακτηρισμού των υλικών

ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ

- Οπτικές
- Φθορίζοντα-Διεισδυτικά υγρά
- Ολογραφία
- Υπέρηχοι
- Δινορρεύματα
- Θερμογραφία
- Μηχανικές
- Ραδιογραφία

ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ

- Ηλεκτρονικές
- Φωτο-Ηλεκτρομαγνητικές
- Περίθλασης
- Ατομικές – Ιοντικές
- Θερμικές
- Μηχανικές
- Χημικές

1.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite element method) είναι η πιο δημοφιλής αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων τα οποία είναι δύσκολα στην επίλυσή τους με πρακτικές τεχνικές καθώς περιλαμβάνουν πολλά υλικά κάνοντας την λύση τους πρακτικά αδύνατη. Έτσι για να υπολογιστούν οι τάσεις σε μια σύνθετη γεωμετρία όπως αυτή του δίσκου πέδης ή ακόμα και την κατανομή των θερμοκρασιών γίνεται η χρήση με την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων (Finite element analysis) [7]. Η μέθοδος προσαρμόζεται στην πολυπλοκότητα και τις αναλυτικές απαιτήσεις όπου έχουν διάφορα τέτοια προβλήματα. Οι δραστηριότητες που εκτελούνται κατά την ανάλυση δηλαδή η γεωμετρία, οι οριακές συνθήκες, η δημιουργία πλέγματος ονομάζονται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων και εκτελούνται από έναν προ-επεξεργαστή σχεδιασμένο για ένα συγκεκριμένο κώδικα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η ανάλυση προσεγγίζεται στην εξεταζόμενη περιοχή με τη διαίρεσή του σε ένα αριθμό πλεγμάτων (mesh). Η δημιουργία πλέγματος στο χώρο είναι επιρρεπής στα σφάλματα. Στις μέρες μας με την εξέλιξη όπου έχουν τα συστήματα κάνουν την παραγωγή πλεγμάτων αυτόματη καθώς τα συστήματα CAD και CAE συνεργάζονται πλήρως, περνώντας απευθείας τη γεωμετρία για ανάλυση χωρίς να απαιτείται μετάφραση της γεωμετρίας αν δεν ήταν σε κοινό σύστημα. Με την προσέγγιση απευθείας από το CAD και χωρίς να απαιτείτε μετάφραση δεν υπάρχει απώλεια δεδομένων και συντομεύει το βρόχο σχεδίασης-ανάλυσης-ενημέρωσης. Έτσι τα σύγχρονα υβριδικά συστήματα μπορούν να σχεδιάσουν οποιαδήποτε γεωμετρία χρειάζεται ανάλυση.

Κάθε πλέγμα είναι συνδεδεμένο στους κόμβους και έτσι αποτελούν ένα στοιχείο. Τα στοιχεία μπορεί να έχουν διάφορα σχήματα όπως τριγωνικά ή τετραγωνικά όπου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος και την ακρίβεια όπου θέλουμε να έχουμε. Μια από τις πιο σημαντικές αποφάσεις όπου πρέπει να πάρει ο χρήστης που χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτή της επιλογής των κατάλληλων στοιχείων όπου είναι διαθέσιμα στην βιβλιοθήκη του λειτουργικού, τα οποία θα του δώσουν την επιθυμητή προσεγγιστική ακρίβεια για την επίλυση του

προβλήματος. Με τον όρο αυτόματη εννοούμε και την αυτόματη ρύθμιση στοιχείων και συντεταγμένων κόμβων. Ο όρος περιλαμβάνει επίσης και την αυτόματη αριθμηση των κόμβων και των στοιχείων με βάση την ελάχιστη δυνατή αλληλεπίδραση με το χρήστη. Οι πλήρως αυτόματες μέθοδοι δημιουργίας πλέγματος απαιτούν συνήθως μόνο την είσοδο της γεωμετρίας του αντικειμένου όπου θα δημιουργηθεί το πλέγμα, τα χαρακτηριστικά όπως η πυκνότητα, ο τύπος του πλέγματος και οι οριακές συνθήκες. Να αναφέρουμε ότι υπάρχουν και ημιαυτόματες μέθοδοι παραγωγής πλέγματος όπου χαρακτηρίζονται έτσι, διότι απαιτούν διαίρεση του αντικειμένου σε δευτερεύουσες περιοχές. Για την δημιουργία πλέγματος ακολουθούνται μια από τις αρκετές προσεγγιστικές μέθοδοι. Αυτές είναι η προσέγγιση της σύνδεσης κόμβων, η τοπολογική διάσπαση, προσεγγίσεις γεωμετρικής διάσπασης, προσέγγιση μέσω καννάβου και προσέγγιση χαρτογράφησης στοιχείου. Η βελτίωση του πλέγματος ωστόσο για τις μεθόδους όπου βασίζονται στην τοπολογική διάσπαση και δε δημιουργούν ένα αρχικό πλέγμα αρκετά κατάλληλο για ανάλυση γίνεται με μια μετεπεξεργασία τριών βημάτων.

- Αν τα παραγόμενα στοιχεία δεν ανήκουν στον κατάλληλο τύπο τα υποδιαιρούμε σε στοιχεία του κατάλληλου τύπου.
- Αν τα στοιχεία δεν έχουν μέγεθος συμβατό με την επιθυμητή κατανομή πυκνότητας πλέγματος τα πυκνώνουμε.
- Αν τα στοιχεία δεν έχουν καλό σχήμα εφαρμόζουμε μια τεχνική εξομάλυνσης πλέγματος.

Μετατροπή τύπων στοιχείων. Αν τα στοιχεία που παράγονται από μια μέθοδο δημιουργίας πλέγματος δεν ανήκουν στον κατάλληλο τύπο, μπορούμε να τα μετατρέψουμε σε κάποιο άλλο τύπο. Για παράδειγμα τα τετράπλευρα και τα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα μπορούν να μετατραπούν σε τρίγωνα και τετράεδρα.

Πύκνωση πλεγμάτων. Όταν ένα πλέγμα πυκνώνει ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος, μερικά από τα στοιχεία του διαιρούνται σε μικρότερα ενώ άλλα παραμένουν άθικτα. Έτσι μπορεί να προκύψει πιθανότητα παραβίασης της συμφωνίας μεταξύ γειτονικών στοιχείων. Να θυμίσουμε εδώ ότι δυο γειτονικά στοιχεία λέμε ότι είναι σύμφωνα όταν μοιράζονται μια ολόκληρη ακμή ή μια ολόκληρη έδρα.

Εξομάλυνση πλέγματος. Αρκετά συχνά, τα στοιχεία που παράγονται από μια μέθοδο αυτόματης δημιουργίας πλέγματος δεν είναι καλοσχηματισμένα με αποτέλεσμα να πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια μέθοδο εξομάλυνσης πλέγματος (mesh smoothing technique). Η πιο δημοφιλής μέθοδος είναι η λαπλασιανή εξομάλυνση (Laplacecian smoothing) με την οποία επιχειρείται αλλαγή της θέσης των κόμβων έτσι ώστε κάθε εσωτερικός κόμβος να είναι το κέντρο βάρους του πολυγώνου που σχηματίζουν οι συνδεδεμένες γειτονιές.

Καθορίζοντας λοιπόν το πλέγμα μας στην συνέχεια καθορίζουμε τις ιδιότητες των υλικών και τις οριακές συνθήκες. Καθορίζοντας τις διαφορετικές ιδιότητες του υλικού μπορούμε να αναλύσουμε ένα αντικείμενο όπου αποτελείται από περιοχές με διαφορετικά υλικά. Συνήθως είναι γνωστές οι οριακές συνθήκες (εξωτερική δύναμη, θερμοκρασία) για το αντικείμενο που είναι προς ανάλυση. Αυτές λοιπόν τις οριακές συνθήκες τις εκφράζουμε ως σύνολα τιμών στις αντίστοιχες περιοχές των κατάλληλων στοιχείων. Αφού καθορίσουμε όλες τις οριακές συνθήκες στα στοιχεία, ο κώδικας της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων παράγει έναν τύπο, τις εξισώσεις συστήματος (system equation), ο οποίος συσχετίζει τις οριακές συνθήκες με τους αγνώστους στα στοιχεία και λύνει εξισώσεις ως προς τους αγνώστους. Συνήθως για την έξοδο των δεδομένων FEM δημιουργείται ένας φάκελος- αρχείο εξόδου όπου μας αναφέρει αναλυτικά τα αποτελέσματα. Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης λοιπόν εξετάζουμε τα αποτελέσματα και αν αυτά συμπίπτουν με το αναμενόμενο για εμάς αποτέλεσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Συστήματα Πέδης Οχημάτων

2.1 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΕΔΗΣ

2.1.1 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το σύστημα πέδης έχει ως σκοπό να επιτρέπει στον οδηγό την προοδευτική μείωση της ταχύτητας του οχήματος έως την πλήρη ακινητοποίησή του ή την αποτροπή της εκκίνησης του οχήματος όταν αυτό είναι σε ακινησία για κάθε πιθανή κλίση του οδοστρώματος. Η λειτουργία είναι απλή και βασίζεται στην τριβή και διακρίνεται σε δύο μέρη. Το κινητό μέρος δηλαδή τα εξαρτήματα αυτά όπου κινούνται και το ακίνητο που περιλαμβάνει εκείνα όπου δεν κινούνται. Ο οδηγός λοιπόν όταν ασκήσει δύναμη στο πεντάλ του φρένου, ενεργοποιεί τον μηχανισμό του φρεναρίσματος. Μηχανικό σύστημα πέδης ονομάζεται εκείνο όπου η δύναμη μεταφέρεται με μηχανικά μέσα (συρματόσχοινα), όταν όμως μεταφέρεται υδραυλικά (με την χρήση ρευστού) ονομάζεται υδραυλικό σύστημα πέδης. Κατά συνέπεια από την ενεργοποίηση του μηχανισμού πέδης, ασκείται πίεση στα πέδπλα τριβής ή αλλιώς τακάκια όπου ανήκουν στα ακίνητο μέρος του συστήματος. Όταν ασκηθεί πίεση στο ακίνητο μέρος δηλαδή στα τακάκια, τότε εκείνες έρχονται σε επαφή με το κινητό και αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες δύναμη τριβής, η οποία προσπαθεί να μειώσει την κινητική ενέργεια όπου έχει το όχημα. Έτσι η τριβή μετατρέπεται σε θερμότητα και απάγεται στο περιβάλλον.



Σχήμα 2.1 : Η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα.

2.1.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΕΔΗΣ

Είναι γνωστό από την μηχανική, ότι κάθε σώμα όπου κινείται έχει κινητική ενέργεια μέσω του έργο όπου παράγεται από την άσκηση κάποιας δύναμης [9]. Ο τύπος είναι ο παρακάτω:

$$E_K = \frac{1}{2} m u^2 (\text{Joule})$$

Όπου m η μάζα του σώματος όπου κινείται σε kg και

u η ταχύτητα του σώματος όπου κινείται σε m/sec

Ας υπολογίσουμε για παράδειγμα ένα όχημα με βάρος $B = 1200 \text{ kg}$ το οποίο κινείται με ταχύτητα 72 km/h .

$$\text{Τα } 72 \text{ km/h} \text{ σημαίνει ότι } \frac{72.000m}{3.600 \text{ sec}} = 20m/sec$$

Αν θεωρήσουμε $g=9,81 \text{ m/sec}^2$, τότε θα έχει βάρος $B = m * g = 1200 * 9,81 = 11772 \text{ N}$

$$E_K = \frac{1}{2} * m * u^2 = \frac{1}{2} * 1200 * 20^2 = 240.000 \text{ Joule} = 240 \text{ KJ}$$

Για την ακινητοποίηση του οχήματος θα πρέπει η κινητική ενέργεια όπου έχει να μετατραπεί σε θερμότητα μέσω της τριβής από την επαφή των πλακιδίων τριβής και του κινούμενου μέρους. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται έργο πέδησης. Οπότε ισχύει $E_{ΠΕΔΗΣΗΣ} = E_{ΚΙΝΗΤΙΚΗ}$

Αν X_{Π} η απόσταση (σε m) που απαιτείται σε μέτρα για την ακινητοποίηση του οχήματος ή αλλιώς διαδρομή πέδησης και F_{Π} οι δυνάμεις (σε N) που αντιστέκονται στην κίνηση του οχήματος, όπου εφαρμόζονται ανάμεσα στους τροχούς και το οδόστρωμα, τότε θα έχουμε $E_{ΠΕΔΗΣΗΣ} = F_{\Pi} * X_{\Pi}$ (Joule).

Αν T ονομάσουμε την δύναμη τριβής στο οριζόντιο έδαφος και μ_{\max} το συντελεστή τριβής μεταξύ των τροχών και του οδοστρώματος, τότε θα έχουμε

$$T_{\max} = F_{\Pi} = \mu_{\max} * B$$

Και έτσι η απόσταση πέδης θα γίνει

$$E_{ΠΕΔΗΣΗΣ} = F_{Π} * X_{Π} = \frac{1}{2} m * u^2 \leftrightarrow X_{Π} = \frac{m u^2}{2 * F_{Π}} (m) = \frac{1}{2} \frac{m u^2}{\mu_{max} B} = \frac{1}{2} \frac{u^2}{\mu_{max} g} (m)$$

Για την επιβράδυνση ισχύει ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα όπου μας αναφέρει ότι ένα σώμα όπου κινείται με ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη/ επιβραδυνόμενη κίνηση τότε η συνισταμένη των δυνάμεων είναι το γινόμενο της μάζας με την επιτάχυνση/ επιβράδυνση.

$$\Sigma F = m a \leftrightarrow F_{Π} = m a$$

Η ταχύτητα και ο χρόνος επιβράδυνσης κατά το φρενάρισμα αναλύονται με την παρακάτω εξίσωση:

$$u = u_0 - a t$$

Όπου u η τελική ταχύτητα δηλαδή μηδέν,

u_0 η αρχική ταχύτητα του σώματος σε m/sec,

a η επιβράδυνση σε m/sec²,

t ο χρόνος επιβράδυνσης σε sec

2.1.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΟΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΣΗ

Οι παράγοντες όπου επηρεάζουν την επιβράδυνση ενός οχήματος είναι :

- I. Ο συντελεστής τριβής, ανάμεσα στο όχημα και το οδόστρωμα, ο οποίος συντελεστής εξαρτάται από το είδος και την κατάσταση των ελαστικών, το οδόστρωμα και την ταχύτητα του οχήματος.
- II. Την θερμοκρασία όπου αναπτύσσεται ανάμεσα στις επιφάνειες τριβής κατά την διάρκεια της πέδης (σιαγόνες - τύμπανα ή πλακίδια - δίσκους). Αυξημένη θερμοκρασία στις επιφάνειες τριβής σημαίνει μείωση του

συντελεστή τριβής όποτε έχουμε κόπωση λόγω υπερθέρμανσης του υλικού και αύξηση της απόστασης πέδης.

- III. Η κατάσταση όπου έχει το σύστημα πέδης. Καταλαβαίνουμε ότι για ένα σύστημα όπου έχουν γίνει οι έλεγχοι του τότε δεν υπάρχει πρόβλημα σε σχέση με ένα άλλο όπου δεν έχουν γίνει οι απαραίτητοι έλεγχοι και παρουσιάζει αυξημένη φθορά.
- IV. Το μπλοκάρισμα των τροχών, όταν αυτοί ακινητοποιούνται και το όχημα αρχίζει να ολισθαίνει. Τότε μειώνεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος πέδης και αυξάνεται η απόσταση πέδησης.

Παρατηρώντας όλα τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι πιο συχνό φαινόμενο στην αστοχία των δίσκων πέδησης είναι η ανάπτυξη της θερμοκρασίας ανάμεσα στις επιφάνειες τριβής αφού η αιτία είναι η θερμική κόπωση αυτών.

2.2 ΕΙΔΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΕΔΗΣ

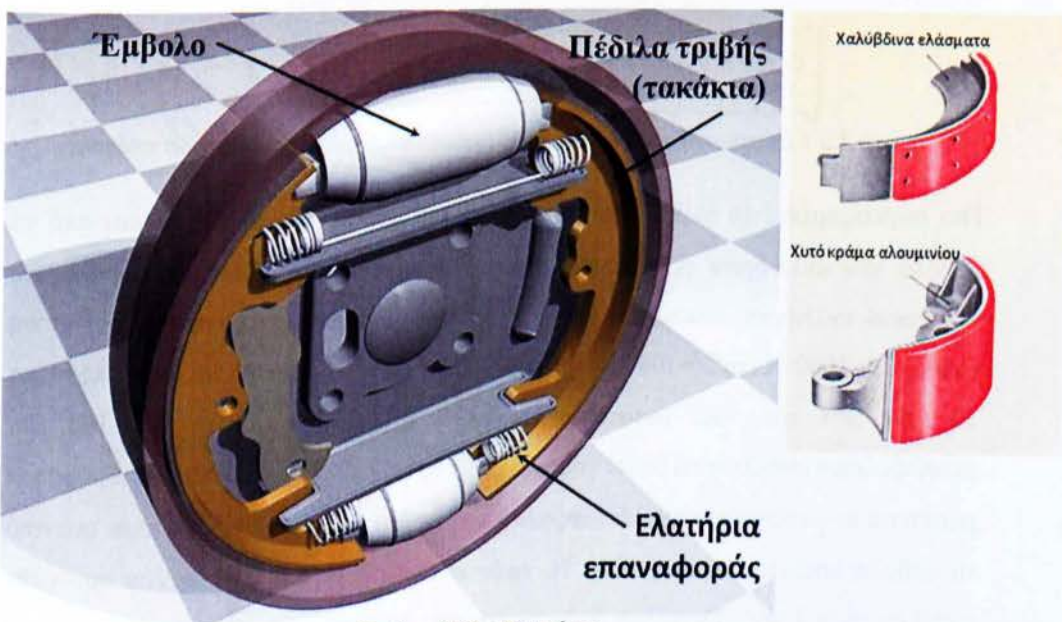
2.2.1 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΦΡΕΝΑ

Τα ενεργά μέρη στο σύστημα φρένων, εκείνα δηλαδή που περιλαμβάνουν τις επιφάνειες τριβής, είναι κατά κανόνα οι σιαγόνες μαζί με τα τύμπανα (ταμπούρα), ή τα πλακίδια (τακάκια) με τους δίσκους, ανάλογα με το είδος του συστήματος πέδησης. Είναι φανερό ότι όσο πιο κοντά στους τροχούς βρίσκονται οι επιφάνειες τριβής, τόσο λιγότερο θα καταπονηθεί το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, που περιλαμβάνεται μεταξύ τροχών και φρένων, από τις μεγάλες δυνάμεις που δημιουργούνται κατά το φρενάρισμα. Για το λόγο αυτό, τόσο τα τύμπανα όσο και οι δίσκοι τοποθετούνται όσο τον δυνατόν κοντινότερα στη ζάντα του τροχού, με τον οποίο και συνδέονται μέσω του κινούμενου τμήματος του άξονα ενώ οι σιαγόνες και τα πλακίδια συνδέονται με το ακίνητο τμήμα του άξονα. Στα μηχανικά συστήματα πέδησης [9], η μεταφορά της σχετικής δύναμης την οποία ασκεί ο οδηγός μέχρι τις σιαγόνες, γίνεται με μοχλούς και ελκυστήρες (ντίζες ή συρματοσχοίνα). Στη διάταξη αυτή η ασκούμενη δύναμη στο πεντάλ ή στους μοχλούς των φρένων φθάνει τελικά στους αντίστοιχους μοχλούς ενεργοποίησης των εκκέντρων, τα οποία ανοίγουν τις σιαγόνες. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι τα μηχανικά συστήματα πέδησης, που

ενεργοποιούνταν με τη χρήση – πίεση του ποδοπλήκτρου (πεντάλ φρένου) στα πρώτα οχήματα, δεν υπάρχουν πλέον, αφού τα μηχανικά αυτά συστήματα που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα οχήματα, αφορούν μόνο διατάξεις των χειρόφρενων.

2.2.1.1 Σιαγόνες

Οι σιαγόνες είναι από χυτό χάλυβα ή συγκολλημένα φύλλα ελατού χάλυβα και έχουν διατομή σχήματος απλού T. Το πέλμα της σιαγόνας διαμορφώνεται σε τμήμα κύκλου, με ακτίνα μικρότερη από την ακτίνα του τυμπάνου, και το πάχος της επένδυσης τριβής. Επάνω σε αυτό το πέλμα στερεώνεται η επένδυση τριβής με κόλληση ή κάρφωμα (πριτσίνωμα). Η κόλληση γίνεται με θέρμανση θερμοπλαστικών ρητινών και παράλληλη συμπίεση της επένδυσης τριβής, ώστε αυτά να μη έρχονται καθόλου σε επαφή με το τύμπανο. Ένα ζεύγος σιαγόνων αποτελείται από την πρωτεύουσα ή οδηγό σιαγόνα ή οδηγούμενη σιαγόνα.



Σχήμα 2.2 : Σιαγόνες

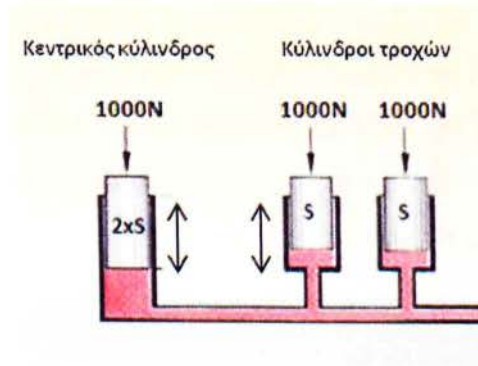
Αριστερά: Διάταξη φρένων τύμπανο-σιαγόνων.

Δεξιά Πάνω: Από συγκολλημένα φύλλα ελατού χάλυβα.

Δεξιά Κάτω: Από χυτό χάλυβα ή χυτό κράμα αλουμινίου.

2.2.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΦΡΕΝΑ

Είναι γνωστό από τη Φυσική ότι, όταν έχουμε υγρό μέσα σε κλειστά και συγκοινωνούντα δοχεία και το πιέζουμε σε κάποιο σημείο, η πίεση μεταδίδεται εξίσου σε όλα τα σημεία της επιφάνειάς του (Νόμος του Πασκάλ). Σε αυτόν ακριβώς τον νόμο στηρίζεται η λειτουργία του υδραυλικού συστήματος των φρένων[8] . Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μία διάταξη με έναν κεντρικό κύλινδρο που τροφοδοτεί 2 κυλίνδρους τροχών.

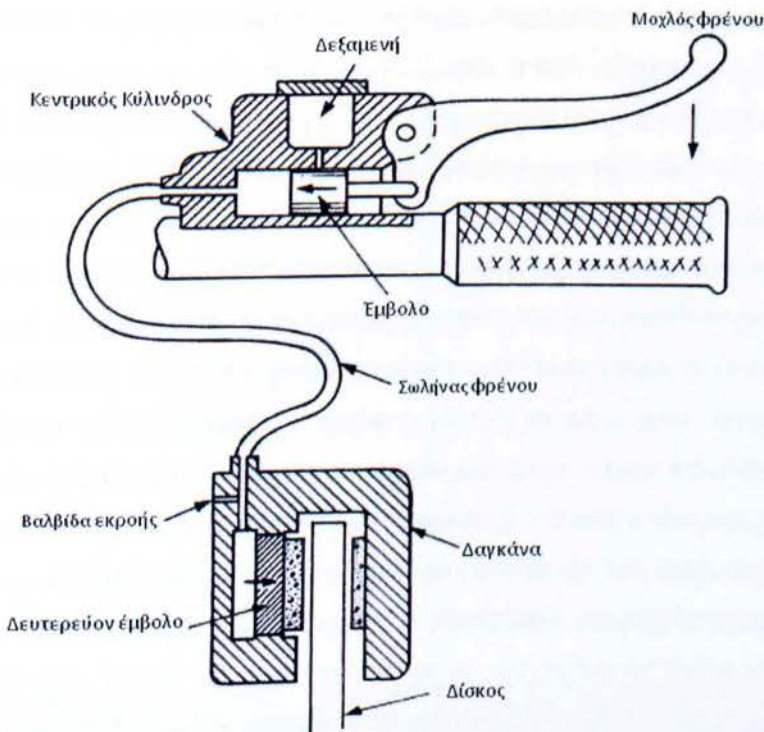


Σχήμα 2.3 : Εφαρμογή του Νόμου του Πασκάλ σε υδραυλικό σύστημα πέδησης.

Πιο συγκεκριμένα, το έμβολο του κεντρικού κυλίνδρου, καθώς και καθένα από τα έμβολα των κυλίνδρων των τροχών, έχουν επιφάνεια 1cm^2 . Εάν στο έμβολο του κεντρικού κυλίνδρου ασκηθεί δύναμη $F_1 = 1000\text{ N}$, τότε αναπτύσσεται μία πίεση επάνω του 1000 N/cm^2 ($=100\text{ Bar}$). Έστω ότι το έμβολο μετατίθεται κατά διάστημα $2S$ (εάν $S=1\text{ cm}$, τότε μετατίθεται κατά 2cm). Η πίεση αυτή των 100 Bar μεταβιβάζεται αναλλοίωτη μέσω της σωλήνωσης σε καθένα από τους κυλίνδρους και μεταθέτει το αντίστοιχο έμβολό τους κατά απόσταση $S=1\text{ cm}$. Έτσι, σε κάθε ένα από τα έμβολα ασκείται δύναμη 1000 N , εφόσον δεχθήκαμε ότι η επιφάνεια του κάθε εμβόλου είναι 1 cm^2 . Συνολικά, δηλαδή και στα 2 έμβολα ασκείται μία δύναμη $F_2 = 1000\text{ N} \times 2 = 2000\text{ N}$. Έχουμε δηλαδή ένα σύστημα πολλαπλασιαστή δύναμης, με αποτέλεσμα η δύναμη που εφαρμόστηκε στο έμβολο του κεντρικού κυλίνδρου να αυξηθεί κατά 2 φορές, συνολικά, στα έμβολα των κυλίνδρων των τροχών.

Για την περίπτωση της μοτοσυκλέτας το σύστημα μας παρουσιάζει μια διάταξη σχ.Χ.Χ. Αυτό αποτελείται από ένα κεντρικό κύλινδρο μέσα στον οποίο κινείται ένα

έμβολο που συνδέεται μέσω βάρικου με το μοχλό φρένου, και από έναν κύλινδρο ο οποίος επικοινωνεί με τον κεντρικό μέσω σωλήνα. Ο κύλινδρος αυτός ονομάζεται και κύλινδρος τροχού και το έμβολό του δευτερεύον έμβολο. Οι κύλινδροι και οι συνδετικοί τους σωλήνες είναι γεμάτοι με υγρό. Ο κεντρικός κύλινδρος ονομάζεται εντολοδότης κύλινδρος, ενώ οι κύλινδροι των τροχών εντολοδόχοι κύλινδροι. Έτσι, αν πιεσθεί το πεντάλ ή ο μοχλός φρένων, η πίεση που θα δημιουργηθεί μέσα στον κεντρικό κύλινδρο από την κίνηση του εμβόλου θα μεταδοθεί αμέσως (ακαριαία) στα έμβολα των κυλίνδρων των τροχών. Εκεί δημιουργείται τριβή από την επαφή αυτή, με αποτέλεσμα η κινητική ενέργεια του αυτοκινήτου να μετατρέπεται σε θερμότητα και ταυτόχρονα, να επιτυγχάνεται το φρενάρισμα.



Σχήμα 2.4 : Τυπικό υδραυλικό σύστημα πέδησης.

Το δίκτυο μεταφοράς του υγρού των φρένων αποτελείται από τμήματα χαλύβδινων ενισχυμένων σωληνίσκων, που ξεκινούν από την κεντρική αντλία και φέρουν κατάλληλη διαμόρφωση (εκτόνωση) στο κάθε άκρο τους και ρακόρ με σπειρώματα σωληνίων για την μεταξύ τους σύνδεση. Έτσι οι σωληνίσκοι αυτοί φθάνουν σε ένα σημείο του πλαισίου ή του αμαξώματος, απ' όπου τους "υποδέχονται" πλέον με

κατάλληλη σύνδεση, εύκαμπτοι ενισχυμένοι ελαστικοί σωλήνες (μαρκούτσια) που φθάνουν μέχρι το στόμιο προσαγωγής του υγρού στους κυλινδρικούς των τροχών, αφού βιδωθούν σε συνδετικά άκρα (ρακόρ), που φέρουν σπειρώματα σωλήνων για το σκοπό αυτό.

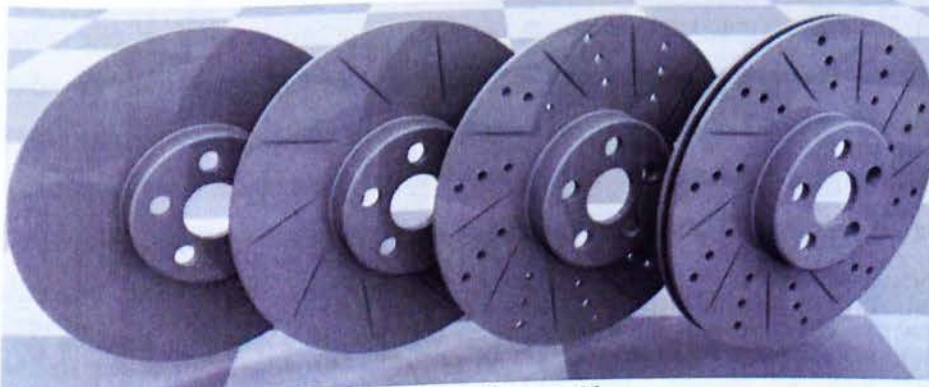
Για τα υδραυλικά συστήματα πέδης χρησιμοποιούνται υγρά, τα οποία έχουν ως βάση τη γλυκόλη με χαμηλό σημείο πήξης, υψηλό σημείο ζέσης και με τελείως ουδέτερη αντίδραση προς τον σίδηρο και το ελαστικό. Σύμφωνα λοιπόν, με τις διεθνείς προδιαγραφές DOT (Dipartment of Transportation) του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ, χρησιμοποιούνται τα υγρά DOT 3 για συμβατικά υδραυλικά συστήματα φρένων, που χρησιμοποιούν μόνον τύμπανα (ταμπούρα), και DOT 4 για υδραυλικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν τύμπανα και δισκόφρενα ή μόνον δισκόφρενα. Τα DOT 4 πλεονεκτούν έναντι των DOT 3, λόγω του ότι έχουν μεγαλύτερη ρευστότητα σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία (-50° C) και σημείο ζέσης στους 230° C. Επίσης, το τελευταίο διάστημα κυκλοφόρησαν και τα Super DOT 5, με βελτιωμένη σύσταση και αντοχή ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες με ικανότητα απορρόφησης ελάχιστων ποσών υγρασίας. Επιπλέον, τα υγρά αυτά πρέπει να έχουν τη μικρότερη δυνατή συμπίεστικότητα και να είναι ελάχιστα υγροσκοπικά, δηλαδή πρέπει να απορροφούν πολύ ελάχιστα ποσά υγρασίας – νερού, και γενικά να διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Να σημειωθεί εδώ, ότι εάν ένα υγρό έχει απορροφήσει υγρασία, μπορεί να ατμοποιηθεί στα σημεία των κυλίνδρων των τροχών και να παρουσιάσει υψηλή συμπίεστικότητα – σαν να έχουμε αέρα στο υδραυλικό κύκλωμα – με αποτέλεσμα η πέδηση να γίνεται αναποτελεσματικότερη και η απόσταση πέδησης να αυξάνεται υπερβολικά. Τα υγρά των φρένων πρέπει να ελέγχονται για το ποσοστό υγρασίας και εάν αυτό είναι άνω του 4%, πρέπει να ανικαθίστανται. Επίσης δεν πρέπει για κανένα λόγο να αναμιχθούν με ορυκτά λάδια (πετρέλαια, λιπαντέλαια, παραφίνες κ.λπ.), γιατί προσβάλλονται (φθείρονται) τα ελαστικά κυάθια των κυλίνδρων. Ταυτόχρονα πρέπει να αποφεύγεται η ανάμιξη υγρών φρένων διαφόρων εργοστασίων, γιατί ο κάθε κατασκευαστής ίσως χρησιμοποιεί για την παρασκευή τους διαφορετικά χημικά συστατικά και να είναι άγνωστη η αντίδραση από τη μεταξύ τους ανάμιξη. Τα υγρά, όμως, της ίδιας σύστασης έχουν τη δυνατότητα να αναμειγνύονται μεταξύ τους.

Πίνακας 2.1 :Τα σημεία ζέσεως για κοινά υγρά φρένων.

	Ξηρό σημείο ζέσεως	Υγρό σημείο ζέσεως
DOT 3	205 °C (401 °F)	140 °C (284 °F)
DOT 4	230 °C (446 °F)	155 °C (311 °F)
DOT 5	260 °C (500 °F)	180 °C (356 °F)
DOT 5.1	270 °C (518 °F)	190 °C (374 °F)

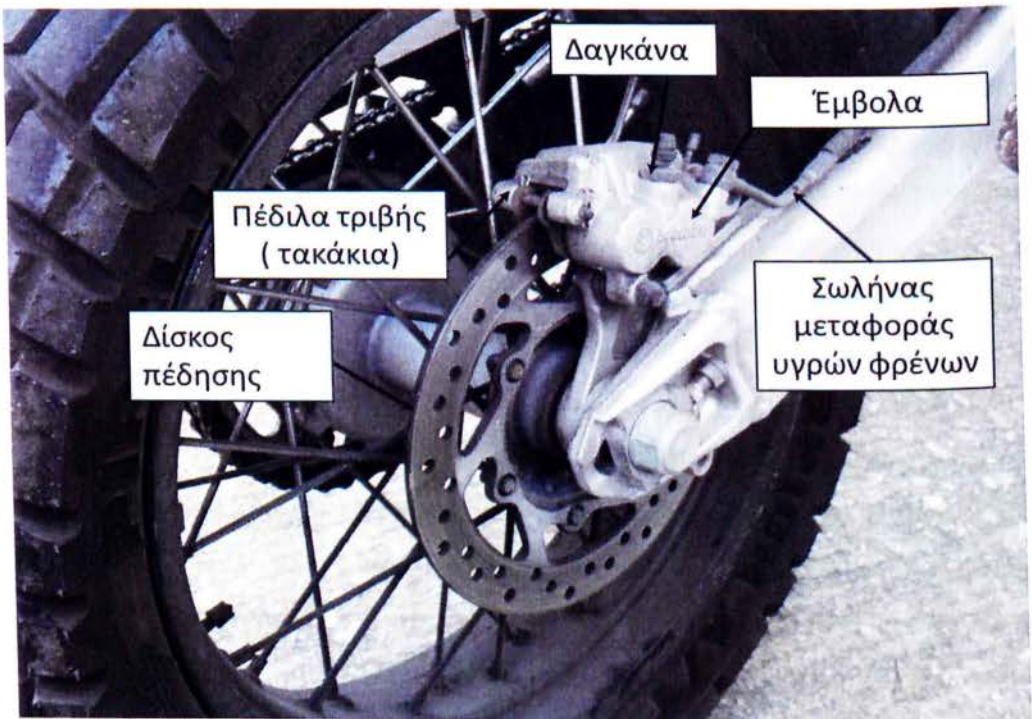
2.2.2.1 Δισκόφρενα

Στο σύστημα πέδησης με τύμπανο και σιαγόνες δεν υπάρχει αρκετός αερισμός στα σημεία που αναπτύσσεται η τριβή, οπότε παρουσιάζεται υπερθέρμανση στις παραπάνω αυτές επιφάνειες, ιδίως σε περίπτωση εντατικής χρήσης του ή σε κατηγορικές διαδρομές μεγάλου μήκους, όπου απαιτείται συνεχής προσπάθεια πέδησης. Έτσι για να βελτιωθούν οι δυνατότητες όλου του συστήματος, ώστε να είναι πιο αποτελεσματικό, τα τύμπανα έχουν αντικατασταθεί με δίσκους και οι σιαγόνες με πλακίδια (τακάκια), οπότε ο κάθε τροχός αντί για τύμπανο έχει δίσκο [9]. Ο δίσκος αυτός κινείται ανάμεσα στα σκέλη ενός σταθερού δίχαλου (δαγκάνας) που καλύπτει ένα μικρό τομέα του δίσκου. Κάθε σκέλος του δίχαλου αυτού έχει ένα ή και περισσότερους κυλίνδρους με τα αντίστοιχα έμβολα, που εφάπτονται σε χαλύβδινο πέδιλο, όπου είναι κολλημένη η επένδυση της τριβής (θερμουίτ) και έτσι, ο δίσκος περιστρέφεται ανάμεσα στα πέδιλα τριβής (τακάκια). Όταν, λοιπόν, ο οδηγός πιέσει το πεντάλ ή το μοχλό φρένου, το υγρό έρχεται με πίεση στον ένα ή και περισσότερους κυλίνδρους, ανάλογα με τη σχεδίαση του κάθε συστήματος. Τα είδη των δίσκων πέδηση είναι συμπαγής δίσκος, με ραυδώσεις, διάτρητος και σε μορφή πτεροτής. Στόχος πάντα είναι η καλύτερη ψύξη του δίσκου πέδησης. (σχήμα2.5).



Σχήμα 2.5 : Είδη δίσκων πέδησης.

Η ψύξη έτσι του δίσκου είναι πολύ καλύτερη από την αντίστοιχη του τυμπάνου και γι' αυτό επιτρέπει να δρουν μεγαλύτερες δυνάμεις για φρενάρισμα-ακινητοποίηση του αυτοκινήτου σε πολύ μικρότερο χρόνο, χωρίς να δημιουργηθεί υπερθέρμανση, η οποία θα επέφερε επικίνδυνη επιβράδυνση στη λειτουργία της πέδησης. Σε ορισμένα συστήματα δισκόφρενων, η δαγκάνα έχει συνήθως ένα έμβολο μόνο στο ένα σκέλος του. Η όλη διάταξη του σχήματος αυτού αφορά τον εμπρός τροχό οχήματος (αυτοκινήτου), αλλά με κίνηση του αυτοκινήτου στους πίσω τροχούς, ενώ ο δίσκος συγκρατείται με κοχλίες στην πλήμνη του τροχού.



Σχήμα 2.6 : Η διάταξη των εξαρτημάτων της πέδησης για τον πίσω άξονα.

Στην περίπτωση, λοιπόν, που υπάρχει έμβολο στο ένα σκέλος της δαγκάνας, τότε αυτή δεν στερεώνεται κατευθείαν στη βάση του ακραξιόνιου, αλλά σε ένα ειδικό συνδετικό και ταυτόχρονα συγκρατητικό εξάρτημα, με δύο πείρους και ελαστικά δακτυλίδια ή με ολισθαίνουσα διάταξη, έτσι ώστε να είναι δυνατή μια μικρή μετακίνηση της δαγκάνας, κάθετα προς τον δίσκο. Τη στιγμή του φρεναρίσματος, η δαγκάνα υποχωρεί λίγο και έτσι προσαρμόζονται στο δίσκο τα πλακίδια (τακάκια) ομοιόμορφα και στις δύο επιφάνειές του. Υπάρχουν όμως, και δαγκάνες, οι οποίες έχουν από ένα έμβολο σε κάθε σκέλος τους. Στις περιπτώσεις αυτές η δαγκάνα είναι ενιαία, φέρει δύο έμβολα – ένα από κάθε πλευρά του δίσκου – και στερεώνεται με κοχλίες, απευθείας στη βάση του ακραξιόνιου. Το υγρό των φρένων από την κεντρική

αντλία καταθλιβεται στο σωλήνα προσαγωγής του και από εκεί διοχετεύεται στους χώρους κατάθλιψης των δύο εμβόλων, ενώ ο δίσκος του συστήματος συγκρατείται με κοχλίες στην πλήμνη του τροχού.

2.3 Φθορές – Βλάβες συστημάτων πέδησης

Η καλή λειτουργία του συστήματος πέδησης έχει πολύ μεγάλη σημασία και ο οδηγός πρέπει να την παρακολουθεί συνεχώς, ενώ για κάθε παρέκκλιση από τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας, πρέπει να απευθύνεται αμέσως στους ειδικούς τεχνίτες.

Διάφορες περιπτώσεις κακής λειτουργίας του συστήματος πέδησης με δυσκόφρενα είναι οι παρακάτω:

1. Το πεντάλ κατεβαίνει, χωρίς φρενάρισμα, τα αίτια είναι:

- Κάποιο έμβολο είναι αντικανονικά τοποθετημένο μέσα στον κύλινδρο του.
- Διαρροή ανάμεσα στον κύλινδρο και το έμβολο σε κάποιο άλλο σημείο της δαγκάνας.
- Είσοδος αέρα μέσα στους κυλίνδρους.

2. Το πεντάλ κάνει μεγάλη διαδρομή για το φρενάρισμα, τα αίτια είναι:

- Υπερβολική φθορά είτε της υλικού τριβής, είτε του δίσκου.
- Διαρροές υγρού από τους κυλίνδρους της δαγκάνας.

3. Το πεντάλ θέλει πολύ πίεση από τον οδηγό για το φρενάρισμα, τα αίτια είναι:

- Υπερβολική φθορά της επένδυσης στα τακάκια.
- Ακατάλληλα τακάκια.

4. Τα φρένα κάνουν θόρυβο: Ο θόρυβος αυτός μπορεί να οφείλεται είτε σε υπερβολική φθορά των επενδύσεων τριβής, είτε σε παραμόρφωση των σιαγόνων, είτε σε ανομοιόμορφη φθορά του τυμπάνου (για σύστημα με σιαγόνες) ή των δίσκων, είτε τέλος, σε χαλάρωση του δίσκου στήριξης των φρένων.

5. Το ένα από τα φρένα σφηνώνει: Αυτό είναι δυνατόν να οφείλεται σε κακή ρύθμιση του διάκενου ανάμεσα στις σιαγόνες και το τύμπανο (όταν δεν υπάρχει αυτόματη ρύθμιση του διάκενου), είτε σε απόφραξη του σωληνίσκου, που οδηγεί στο

σφηνωμένο φρένο, είτε κόλλημα του κυάθιου μέσα στον κύλινδρο, είτε σε σπάσιμο ή χαλάρωση το ελατηρίου επαναφοράς, είτε τέλος, σε πολύ φθαρμένα ρουλεμάν του τροχού.

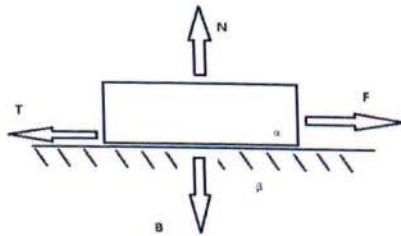
2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΖΩΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΙΕΔΗΣΗΣ

2.3.1 ΤΡΙΒΗ - FRICTION

Τριβή (Friction) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο όταν δύο σώματα έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, το ένα αντιτίθεται στην κίνηση του άλλου (σχήμα 2.6). Η τριβή εκφράζεται μέσω του **συντελεστή τριβής μ** [5], ο οποίος ορίζεται από το πηλίκο της εφαπτομενικής δύναμης Τριβής (T) προς την δύναμη (N) που είναι κάθετη στην επιφάνεια επαφής. Η δύναμη της τριβής είναι ανάλογη στο συντελεστή τριβής και την κάθετη δύναμη στην επιφάνεια.

$$T = \mu * N$$

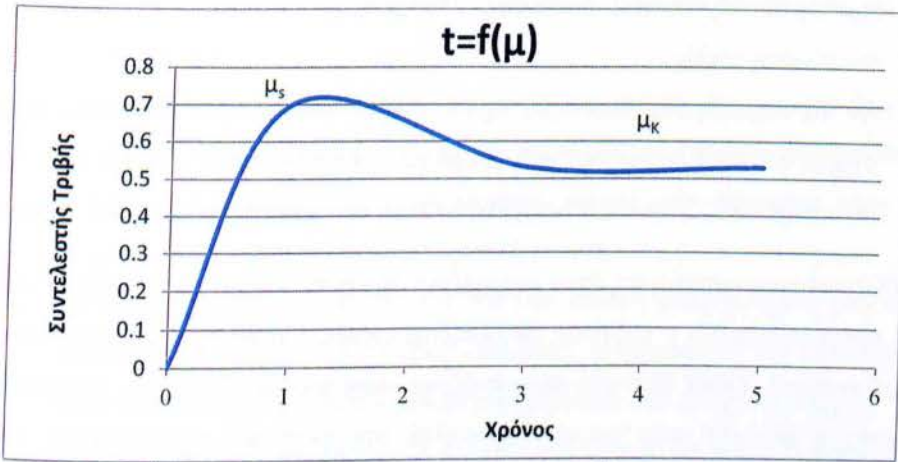
Βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία του τριβικού συστήματος είναι: Τα υλικά των τριβόμενων επιφανειών, η παρουσία επιφανειακού στρώματος, η τραχύτητα των επιφανειών, η σχετική ταχύτητα ολίσθησης, το εφαρμοζόμενο κάθετο φορτίο και η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ των επιφανειών. Όταν ένα σώμα ολισθαίνει σε κεκλιμένο επίπεδο, με γωνία κλίσης θ , τότε ο συντελεστής τριβής ισούται με την εφαπτομένη της γωνίας θ .



Σχήμα 2.6 Το τριβικό σύστημα.

Έστω το τριβικό σύστημα του παραπάνω σχήματος. Η δύναμη F_S αυξάνεται συνεχώς έως ότου το σώμα αρχίζει να ολισθαίνει και F_K η δύναμη όπου απαιτείται για να συνεχίσει να κινείται σταθερά. Την στιγμή όπου αρχίζει η κίνηση του σώματος, η απαιτούμενη δύναμη F_S που πρέπει να ασκηθεί, πρέπει να υπερνικήσει την τριβή η

ποία καλείται στατική τριβή και ο συντελεστής τριβής καλείται **στατικός συντελεστής τριβής** μ_s , ενώ η απαιτούμενη δύναμη F_k , για να συνεχίσει το σώμα να κινείται πρέπει να νικήσει την τριβή κίνησης και ο συντελεστής τριβής καλείται **δυναμικός ή κινηματικός συντελεστής τριβής** μ_k . Η δύναμη κίνησης είναι μικρότερη σε μέγεθος από εκείνη όπου απαιτείται για την έναρξη της ολίσθησης. Δηλαδή, $F_s > F_k$, ομοίως και οι συντελεστές τριβής $\mu_s > \mu_k$.



Σχήμα 2.7 : Ο στατικός και ο δυναμικός συντελεστής τριβής ως συνάρτηση του χρόνου.

2.3.2 ΦΘΟΡΑ -WEAR

Οι επιφάνειες όπου έρχονται σε επαφή μεταξύ τους αλλοιώνονται λόγω της τριβής που υπάρχει ανάμεσά τους. Αυτή η απομάκρυνση υλικού, των μεταξύ τους επιφανειών ονομάζεται **φθορά** [5]. Η φθορά εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Πρώτος παράγοντας είναι οι ιδιότητες των τριβόμενων επιφανειών. Το ανταγωνιστικό υλικό λοιπόν είναι αυτό όπου συνήθως καθορίζει το μηχανισμό, με τον οποίο η διεργασία της τριβής, προκαλεί φθορά του υλικού και απώλεια μάζας. Δεύτερος παράγοντας είναι η τοπογραφία των υλικών όπου έρχονται σε επαφή μεταξύ τους για να λειτουργήσει ο μηχανισμός. Η ύπαρξη προεξοχών μειώνει την επιφάνεια στην οποία διανέμεται το επιβαλλόμενο φορτίο με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στα σημεία αυτά, όπου φθείρονται πρώτα και παρουσιάζουν ταχύτερη φθορά από τη μέση φθορά του υλικού. Τρίτος παράγοντας είναι τα παραγόμενα απόβλητα της τριβής. Εκείνα επηρεάζουν τον μηχανισμό καθώς παραμένουν στην διεπιφάνεια και επηρεάζουν την σχετική κίνηση με τρεις τρόπους :

- Αν τα παραγόμενα απόβλητα έχουν μικρή σκληρότητα, μεγάλη πλαστικότητα και παρουσιάζουν την τάση να προσκολληθούν μηχανικά στις ανταγωνιστικές επιφάνειες, τότε παρεμποδίζουν την ελεύθερη ολίσθησή τους, με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή τριβής.
- Αν τα παραγόμενα απόβλητα έχουν μέτρια σκληρότητα και ομαλό σχήμα με στρογγυλεμένες επιφάνειες, διευκολύνουν την τριβή και δρουν ως λιπαντικά, δημιουργώντας δύο νέες επιφάνειες ολίσθησης, με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή τριβής.
- Αν τα παραγόμενα απόβλητα έχουν υψηλή σκληρότητα και ακανόνιστο σχήμα, συνήθως συνεργούν στη φθορά των ανταγωνιστικών υλικών, δρώντας ως αποξεστικά. Στην περίπτωση αυξάνεται ο συντελεστής φθοράς του υλικού.

Συνεχίζοντας τους παράγοντες όπου επηρεάζουν την φθορά, είναι το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η τριβή και επηρεάζεται κυρίως η τριβοχημική συμπεριφορά του μηχανισμού. Υλικά τα οποία παρουσιάζουν τάση προς οξείδωση π.χ. σιδηρούχα κράματα, η άσκηση ενός φορτίου προκαλεί την πλαστική παραμόρφωση των επιφανειών, τέτοιων υλικών. Σε συνθήκες υγρασίας είναι σύνηθες φαινόμενο να παρατηρείτε η επιφανειακή οξείδωση και να παρεμβαίνει στο μηχανισμό προκαλώντας επιτάχυνση της φθοράς. Το περιβάλλον λειτουργίας λοιπόν, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην φθορά του υλικού μας. Η θερμοκρασία είναι μια παράμετρος όπου επηρεάζει με τη σειρά της τον μηχανισμό της τριβής, δηλαδή όπου αναπτύσσεται στο μηχανισμό μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών. Η θερμοκρασία αυτή εξαρτάται από το επιβαλλόμενο φορτίο και τη ταχύτητα κίνησης. Για υψηλές τιμές φορτίου και ταχύτητας έχουμε αντίστοιχα και υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του μηχανισμού. Έτσι για την τελευταία περίπτωση λειτουργίας, γίνεται συνήθως χρήση λιπαντικών υλικών. Με την χρήση των λιπαντικών ουσιών, δημιουργούνται δύο νέες επιφάνειες τριβής, αυτές του σώματος ένα με το λιπαντικό και αντίστοιχα του σώματος 2 με το λιπαντικό. Επομένως οι θερμοκρασίες όπου αναπτύσσονται είναι μικρότερες. Τα λιπαντικά χωρίζονται σε στερεά (κόνεις), υγρά (λάδια SAE) και αέρια. Η τελευταία χρησιμοποιείται σε πλοία συνήθως μειώνοντας την τριβή με την θάλασσα και αυξάνοντας την ισχύ και την ταχύτητα του πλοίου. Όπως διαπιστώσαμε η φθορά έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση υλικού από τις επιφάνειες που δέχονται την επιβολή του φορτίου. Έτσι παρατηρείται ότι είναι πολύ

βασικό η φθορά ενός υλικού, αφού αυτή χαρακτηρίζει την διάρκεια ζωής του υλικού. Οι κατασκευαστές συνήθως ορίζουν ένα εύρος τιμών, όπου το εξάρτημα δεν θα είναι πλέον σε θέση να λειτουργεί και πρέπει να αντικατασταθεί, καθώς η αναμενόμενη φθορά είναι τέτοια όπου δεν επιτρέπει την περαιτέρω χρήση του εξαρτήματος.

Οι κύριες ομάδες τύπων φθοράς των υλικών είναι:

- Ανάλογα με τον **τρόπο κίνησης** των δύο υλικών και διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες.
 1. **Φθορά λόγω ολίσθησης.** Πρόκειται για τον τρόπο όπου ολισθαίνει μία επιφάνεια σε μία άλλη με ή χωρίς την παρουσία αποξεστικών σωματιδίων ή λιπαντικών. Παρατηρείται αυτός ο τύπος φθοράς όταν ορισμένα μέρη από μηχανές ή όργανα βρίσκονται σε σχετική κίνηση.
 2. **Φθορά λόγω κύλισης.** Πρόκειται για την κύλιση μίας σφαίρας (κυκλικής επιφάνειας) πάνω σε μια στερεή επιφάνεια. Η φθορά για την καταστροφή εδράνων των οποίων η λειτουργικότητα εξαρτάται από κίνηση ρουλεμάν.
 3. **Φθορά λόγω παλινδρόμησης.** Οι αλληπάλληλες παλινδρομικές κινήσεις είναι η αιτία διαφόρων συχνοτήτων. Συναντάται σε κάθε κοινή μηχανή.
 4. **Φθορά λόγω πρόσκρουσης.** Προκαλεί την καταστροφή επιφάνειας, λόγω πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων. Με την παρουσία ηλεκτρολυτών επιταχύνεται η φθορά του υλικού μας με την παρατήρηση χημικής διάβρωσης.
 5. **Φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης.** Προκαλείται στην επιφάνεια του υλικού από στερεά σωματίδια, μεταφερόμενα από κάποιο στερεό, υγρό ή αέριο.
 6. **Φθορά λόγω δόνησης.** Οι επιφάνειες επαφής υποβάλλονται σε ταυτόχρονη παλινδρόμηση και ολίσθηση. Παρατηρείται στις επιφάνειες αυτές κοιλότητες και εσοχές όπου περιβάλλονται από τα προϊόντα φθοράς. Συναντάται μεταξύ επιφανειών, όπου συνδέονται μεταξύ επιφανειών, όπου συνδέονται εν ξηρό όπως οι άξονες και τα έδρανα συνδετικών δακτυλίων.
- Ανάλογα με τον **μηχανισμό** που υπεισέρχεται το φαινόμενο της φθοράς.

Τα είδη της φθοράς :

1. **Φθορά Πρόσφυσης (adhesive wear).** Διακρίνουμε το είδος αυτό όταν δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή και ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη και σχηματίζονται δεσμοί πρόσφυσης στα σημεία επαφής. Το αποτέλεσμα είναι

τμήματα από την μια επιφάνεια να τρίβονται στην άλλη και να αποκολλούνται από την αρχική τους επιφάνεια, καταστρέφονται (δημιουργώντας απόβλητα) και σχηματίζονται νέα.

2. Φθορά Λείανσης (abrasive wear). Προκαλείται όταν μια τραχεία και σκληρή επιφάνεια ολισθαίνει επί μαλακότερης και δημιουργεί μια σειρά από αύλακες πάνω σε αυτή είτε όταν χαλαρά τραχεία ψήγματα παγιδεύονται μεταξύ των επιφανειών κατά την διάρκεια της κίνησης.
3. Κύλιση επιφανειακής κόπωσης (surface fatigue wear). Προκαλείται ιδιαίτερα στην τριβή κύλισης. Έπειτα από τον προκαθορισμένο χρόνο λειτουργίας του εξαρτήματος και την επαναλαμβανόμενη φόρτιση όπου δέχεται, αρχίζουν να εμφανίζονται σημάδια κόπωσης με την δημιουργία ρωγμών, όπου οδηγούν στην απομάκρυνση στρωμάτων υλικού, μεγάλων διαστάσεων (αποφλοίωση).
4. Η χημική διάβρωση (corrosive wear). Είναι ένας συνδυασμός χημικής διάβρωσης και διάβρωσης τριβής και επέρχεται όταν το περιβάλλον του μηχανισμού μας είναι σε χημικά δραστικό μέσο. Ανάλογα με την χημική δράση υπάρχει και η ανάλογη φθορά στην επιφάνεια του υλικού.

2.4 ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΣΚΩΝ ΠΕΔΗΣΗΣ

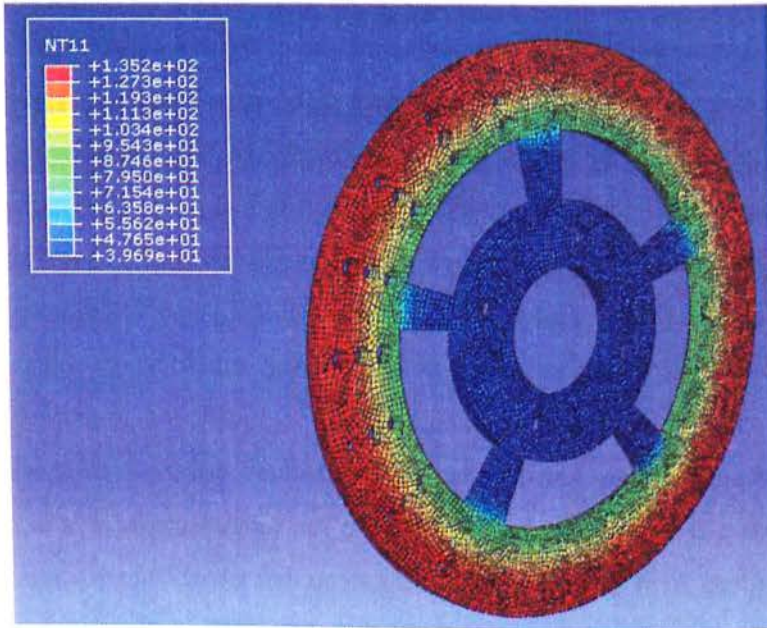
Η τριβή και η φθορά όπου δέχονται οι δίσκοι πέδησης είναι αναπόφευκτη αλλά η εμφάνιση ατελειών σε αυτούς όπως ρωγμές περιμετρικά των οπών ή εξελισσόμενες ακτινικά, είναι ένα φαινόμενο όπου χρήζει εφαρμογή μεθόδων για την ανάλυση αστοχίας του υλικού. Έτσι σας παρουσιάζουμε παρακάτω ορισμένες μελέτες ανάλυσης αστοχίας δίσκων πέδησης όπου έγιναν από ερευνητές ανά τον κόσμο.

Ο G. Perricone [11] μέλος της ιταλικής κατασκευάστριας εταιρείας δίσκων πέδησης μαζί με μία ομάδα του Τμήματος Μηχανικών του Πολυτεχνείου του Μιλάνο μελέτησαν την περίπτωση αστοχίας δίσκου πέδης μοτοσυκλέτας και πιο συγκεκριμένα η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε δύο (Α και Β) δίσκους πέδησης (διαμέτρου 280 mm και πάχους 8 mm) τα οποία αποτελούνται από ανοξείδωτο χάλυβα με τις προδιαγραφές AISI 410, μαρτενσιτικής δομής και η τιμή της επιφανειακής σκληρότητας ανέρχεται στα 32-36HRC. Ο δίσκος τύπου Β παρουσίασε μικρές

ρωγμές μετά από χρήση μερικών χιλιάδων μιλίων, ενώ στο δίσκο τύπου A δεν διαπιστώθηκε κάποια αλλοίωση του υλικού. Τα δείγματα εξετάστηκαν σε οπτική μικροσκοπία, χημική ανάλυση, μεταλλογραφία ανάλυση, σκληρομέτρηση, ανάλυση της επιφάνειας θραύσης και δοκιμή αντοχής στη θερμική κατεργασία. Η επιφάνεια του δίσκου υποβλήθηκε σε τάσεις που αποτελούνται από το άθροισμα δύο συνιστωσών, της μηχανικής καταπόνησης, λόγω ροπής πέδησης και της τριβής, και τις θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται από θερμοκρασιακές διαφορές που παρουσιάζονται στο δίσκο. Τα συμπεράσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι η διάρκεια ζωής ενός δισκοφρένου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την γεωμετρία και τις ιδιότητες του υλικού στις υψηλές θερμοκρασίες και συνθήκες λειτουργίας. Επίσης σε λειτουργία υπό σταθερές συνθήκες φόρτωσης δεν μειώνετε δραστικά ο χρόνος ζωής του δίσκου. Πιο συγκεκριμένα ο ραγισμένος δίσκος ήταν κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα παρόμοιο με του τύπου AISI 410, εκτός από μερικές χημικές διαφορές, και υπέστη πλήρη βαφή στο τμήμα της στεφάνης του δίσκου. Επίσης οι ρωγμές προκλήθηκαν από την υπερβολική σκλήρυνση του μαρτενσίτη, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, με βάση όλων αυτών η ακαταλληλότητα του δίσκου τύπου B ήταν προφανής. Ο χάλυβας του δίσκου τύπου A ο οποίος είναι μία παραλλαγή του AISI 410, μπορεί να επιλεγεί ως ένα κατάλληλο για χρήση αντί του B όπου μελέτησαν. Ο λόγος για τον οποίο μπορεί να θεωρηθεί βελτιωμένος είναι η μεγαλύτερη ποσότητα σε βανάδιο και μολυβδαίνιο, τα οποία επιτρέπουν στο υλικό να ενισχύσει την αντοχή του σε θερμικές κατεργασίες.

Ο Abu Bakar [14] και τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου της Μαλαισίας, πραγματοποίησαν θερμική ανάλυση αεριζόμενου δίσκου πέδησης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το υλικό που επιλέχθηκε για την κατασκευή του δίσκου πέδης είναι χυτοσίδηρος από συμπυκνωμένο γραφίτη. Η θερμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στη μελέτη αυτή έγινε με την χρήση ειδικού λογισμικού. Κατά την θερμική ανάλυση εφαρμόστηκε ένα σύνολο 10 κύκλων πέδησης. Η ροή θερμότητας που εφαρμόστηκε στο δίσκο υπολογίστηκε κατά την διάρκεια της πέδησης και ο χρόνος εφαρμογής κάθε μίας είναι 2.83 sec που αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια που ο δίσκος θερμαίνεται και 29.17 sec ο χρόνος ψύξης. Έτσι ο κάθε κύκλος αποτελείται από 32 sec και για τους 10 κύκλους συνολικά 320 sec. Τα

αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η μέγιστη θερμοκρασία που δημιουργείται στην επιφάνεια του δισκοφρένου κατά το τέλος της διαδικασίας και των 10 κύκλων πέδησης είναι περίπου 288°C , η οποία είναι εντός των επιτρεπτών θερμοκρασιών λειτουργίας του υλικού του αεριζόμενου δίσκου. Εν κατακλείδι, η θερμική ανάλυση του νέου αεριζόμενου δίσκου έδειξε ότι είναι σε θέση να αντέξει τη θερμότητα που παράγεται κατά την πέδηση χωρίς να παρουσιάσει αστοχία υλικού.



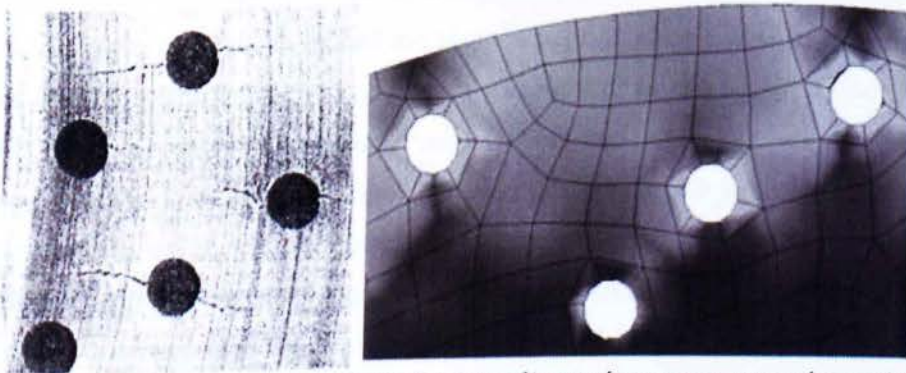
Σχήμα 2.8: Θερμοκρασιακή κατανομή της επιφάνειας του δίσκου κατά το τέλος του πρώτου κύκλου πέδησης. (μέγιστη θερμοκρασία 135.2°C)

Οι Υ. Yildiz και Μ. Duzgun [13] από το τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του πολυτεχνείου της Άγκυρας μελέτησαν την ανάλυση τάσεων αεριζόμενων δίσκων πέδης. Η μελέτη έγινε με τη μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και πιο συγκεκριμένα μελετήθηκαν τριών τύπου διαφορετικά αεριζόμενα δισκόφρενα σε σύγκριση με ένα συμπαγή δίσκο όπως φαίνεται παρακάτω (σχήμα 2.9). Οι συγκρίσεις αυτές αποδεικνύουν ότι η εφαρμογή διαφορετικών κατανομών δυνάμεων κατά μήκος της επιφάνειας τριβής, μειώνει τις τάσεις που εμφανίζονται στους αεριζόμενους δίσκους από 8.8% σε 19.1%. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε ασκώντας μία δύναμη της τάξης των 250N περιοδικά σε διαστήματα των 30 s, 60 s, 90 s, 120 s, 150 s, 180 s, 210 s, και 240 s. Επίσης η ταχύτητα του περιστρεφόμενου δίσκου ήταν 200 km/h (γωνιακή ταχύτητα 397.56 rad/s). Η καλύτερη απόδοση σε κατάσταση

εφαρμογής πεδήσεως εμφανίστηκε να έχει ο δίσκος με σχισμές και εγκάρσια τομή (CS-SG) για παράδειγμα για τιμή χρόνου 120 s η δύναμη πεδήσεως του CS-SG είναι 5.26 KN ενώ του SL 3.86 KN. Στο σχήμα 2.9 φαίνεται η προσομοίωση των τάσεων για όλους του τύπους δίσκων. Οι σχηματισμένες τάσεις που διαμορφώθηκαν γύρω από τις οπές και τις σχισμές των αεριζόμενων δίσκων από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε σύγκριση με τις πραγματικές ρωγμές δείχνουν ότι η προσομοίωση προσέγγισε τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.9 Προσομοίωση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, a) SL disk, b) CD disk, c) CS disk, d) CS-SG disk.



Σχήμα 2.10 : Πραγματικές ρωγμές (από αριστερά) και τάσεις της προσομοίωσης (από δεξιά) γύρω από τις οπές των αεριζόμενων δίσκων.

Οι Ji-Hoon Choi και In Lee [12] του τμήματος Αεροδιαστημικής Μηχανικής μελέτησαν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παροδικών θερμοελαστικών συμπεριφορών των δίσκων πέδησης. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται μια παροδική ανάλυση του προβλήματος της θερμοελαστικής επαφής του δίσκου πέδησης και της θερμότητας λόγω τριβής. Η αριθμητική προσομοίωση για τη θερμοελαστική συμπεριφορά του δισκοφρένου λαμβάνεται σε κατάσταση επαναλαμβανόμενης πέδησης. Παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα για τις κατανομές της πίεσης και της θερμοκρασίας σε κάθε επιφάνεια τριβής μεταξύ των σωμάτων επαφής. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή σταθερής υδραυλικής πίεσης $P=1 \text{ MPa}$ και γωνιακή ταχύτητα $\omega=50 \text{ rad/s}$ για 10 sec . Για να ληφθεί η αριθμητική προσομοίωση της θερμοελαστικής συμπεριφοράς που εμφανίζεται στα δισκόφρενα, η συζευγμένη θερμική αγωγιμότητα και οι εξισώσεις ελαστικότητας λύνονται με τα προβλήματα επαφής. Οι μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις εμφανίζονται στη στεφάνη του δίσκου και είναι η κύρια αιτία κοπώσεως. Επίσης εξετάζεται η επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού τριβής σχετικά με την αναλογία επαφής των επιφανειών τριβής, οι ιδιότητες που επηρεάζουν περισσότερο είναι η ο συντελεστής θερμικής διαστολής και ο συντελεστής ελαστικότητας. Τέλος παρατηρήθηκε ότι η τα ορθοτροπικά δισκόφρενα παρέχουν καλύτερη απόδοση στο φρενάρισμα σε σχέση με τα ιστροπικά λόγω της ομοιόμορφης και ήπιας κατανομής πίεσης.

Ο F. Bagnoli, F. Dolce και M. Bernabei [21], του Κέντρου Αεροπορικών Δοκιμών του Τμήματος Χημείας στη Ρώμη, μελέτησαν δίσκους πέδησης πυροσβεστικών οχημάτων που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη αεροναυτικών δραστηριοτήτων και ένας σημαντικός αριθμός των δίσκων αυτών παρουσίασε ρωγμές κατά τον έλεγχο με μη καταστροφικούς ελέγχους. Η ομάδα πραγματοποίησε μία σειρά μεθόδων χαρακτηρισμού των υλικών, όπως μακροσκοπική ανάλυση της επιφάνειας θραύσης η οποία έδειξε αρκετές ρωγμές κατά μήκος των επιφανειών τριβής με μήκος από 1 έως $7,5 \text{ cm}$. Στη συνέχεια έγινε περαιτέρω εξέταση των ρωγμών με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, από τα οποία αποκαλύφθηκε ότι οι ρωγμές εξαπλώθηκαν σε ημιελλειπτικό σχήμα μέσω των επιφανειών τριβής λόγω της θερμικής κόπωσης. Επίσης η χημική σύσταση, η μικροδομή και οι σκληρομετρήσεις του υλικού ήταν οι αναμενόμενες και

δεν διαπιστώθηκε κάποια ατέλεια που να δικαιολογεί τη δημιουργία ρωγμών λόγω κακής κατασκευής του δίσκου. Ακόμα πραγματοποιήθηκε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) για τον προσδιορισμό των θερμοκρασιών στο δίσκο καθώς και για να εκτιμηθεί η κατανομή των τάσεων κατά την πέδηση. Εν κατακλείδι οι ρωγμές που παρατηρήθηκαν στις επιφάνειες τριβής των δίσκων πέδης προήλθαν από τη θερμική καταπόνηση λόγω της τοπικής εναπομένουσας τάσης που παράγεται κατά την διάρκεια της εφαρμογής της πέδησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Καταστροφική αστοχία δίσκου πέδησης

3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΧΡΗΣΗΣ ΔΙΣΚΟΥ ΠΕΔΗΣ

Η φθορά λόγω τριβής και η αφαίρεση υλικού ως φυσικό επακόλουθο είναι αναπόφευκτη για τον μηχανισμό του φρεναρίσματος. Η φθορά για τον δίσκο πέδησης ήταν 200μm από την πλευρά όπου έχει το έμβολο και 100μm από την άλλη που αντιτίθεται στην πίεση. Η επίβλεψη του εξοπλισμού έπειτα κάποιες χιλιάδες χιλιόμετρα ή και η αντικατάστασή του είναι απαραίτητη σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή [16] για την ασφάλεια των αναβατών.

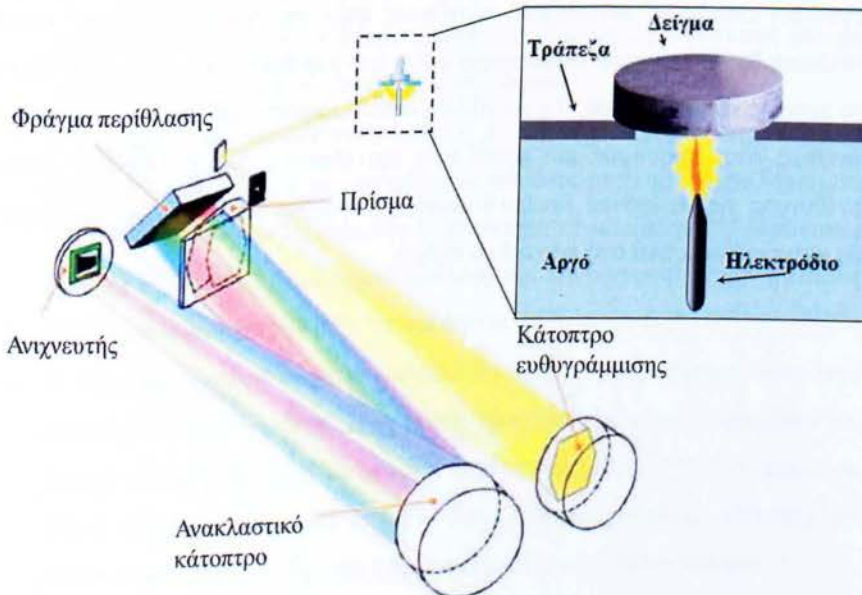
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η περίπτωση καταστροφικής αστοχίας δίσκου πέδησης μέχρι την εμφάνιση ρωγμών γύρω από τις οπές αερισμού. Η μοτοσυκλέτα και κατ' επέκταση ο δίσκος πέδησης χρησιμοποιούνταν από τον καθηγητή μας Δρ Α. Τσολάκη. Οι συνθήκες του δίσκου πέδησης είναι αυτές του περιβάλλοντος, δηλαδή 25°C και πίεση 1 bar (~1atm) όπου ασκείτε από την ατμόσφαιρα, πριν την έναρξη λειτουργίας και ενώ βρίσκεται ακόμα σε ακινησία. Κατά την έναρξη λειτουργίας της μοτοσυκλέτας και κατά συνέπεια η ενεργοποίηση του μηχανισμού όπου ανήκει ο δίσκος πέδησης, η θερμοκρασία αυξομειώνεται και κυμαίνεται από 100°C έως και 500°C ή και παραπάνω σε περιπτώσεις εκτάκτου και αλληπάλληλου φρεναρίσματος όπου οι δυνάμεις και οι πιέσεις είναι ακαριαίες. Έτσι κάθε φορά όπου ενεργοποιείται ο μηχανισμός οι θερμικές τάσεις και η κόπωση του υλικού μας είναι τα φορτία που μειώνουν τον χρόνο ζωής του δίσκου πέδησης και μας υποχρεώνουν στην επίβλεψη του όπως είπαμε παραπάνω. Η πίεση έχει μια μέγιστη τιμή η οποία είναι σταθερή συνήθως και είναι 25 bar για φορτίο μόνο ενός αναβάτη (του οδηγού) και 35 bar για πλήρες φορτίο δηλαδή δεύτερος αναβάτης και αποσκευές. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2 η ενέργεια πέδησης εξαρτάται από την ταχύτητα και το βάρος του οχήματος. Η μοτοσυκλέτα ζυγίζει περίπου 210 kg χωρίς καύσιμα όπως αναφέρει το εγχειρίδιο του κατασκευαστή [16]. Όπως γίνεται αντιληπτό με την συμπλήρωση καυσίμου στην μοτοσυκλέτα και φορτίο ενός αναβάτη η συνολική μάζα της μοτοσυκλέτας υπολογίζεται στα 300kg περίπου (για έναν αναβάτη ~80kg). Ο δίσκος πέδησης όπου

είχαμε στην κατοχή μας για ανάλυση είχε περίπου 55.000 χιλιόμετρα και συχνά κάλυπτε μεγάλες αποστάσεις της τάξης των 100 χιλιόμετρα ημερησίως.

3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

3.2.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ

Η Χημική Ανάλυση έγινε με την μέθοδο της Φασματοσκοπία οπτικής εκπομπής (Optical Emission Spectroscopy) [6]. Η τεχνική χρησιμοποιείται λόγω της ταχύτητας και της αξιοπιστίας. Τα άτομα των στοιχείων του εξεταζόμενου υλικού διεγείρονται, συνήθως με τη δημιουργία πλάσματος, και στη φάση της αποδιέγερσής τους εκπέμπουν μια σειρά χαρακτηριστικών για κάθε στοιχείο ακτινοβολιών. Η παρουσία του είδους των στοιχείων (ποιοτική ανάλυση) ταυτοποιείται με την ανίχνευση των κύριων φασματικών γραμμών, ενώ η περιεκτικότητα των στοιχείων στο δείγμα (ποσοτική ανάλυση) προσδιορίζεται μετά από κατάλληλη μέτρηση της έντασής τους με τη χρήση πρότυπων δειγμάτων του αντίστοιχου στοιχείου. Για την διαδικασία της δοκιμής λάβαμε από την επιφάνεια επαφής του δίσκου και του υλικού πέδης και την επιφάνεια που δεν συμμετέχει στην πέδη. Το μέγεθος του δείγματος εξαρτάται από τον εξοπλισμό και τι ανάγκες χώρου έχει. Για να πραγματοποιήσουμε την ανάλυση χρησιμοποιήσαμε μια εφαρμογή για την ανίχνευση του Cr και Ni και άλλη εφαρμογή για τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία χαμηλότερης χημικής σύστασης.

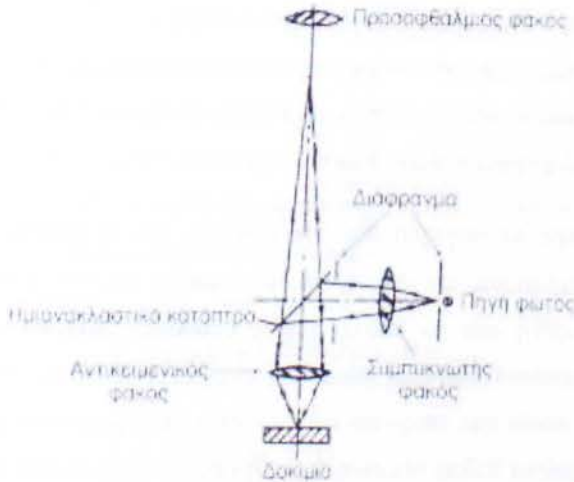


Σχήμα 3.1. Αρχή λειτουργίας της φασματοσκοπίας οπτικής εκπομπής.

Η Μακροσκοπική Παρατήρηση [6] και απεικόνιση του εξοπλισμού μας, του δίσκου πέδης όπου αστόχησε και του νέου δίσκου, έγινε με Φωτογραφική μηχανή NIKON COOLPIX P90. Το επίπεδο όπου εναποθέσαμε τα προς μελέτη αντικείμενα ήταν ένα πλέγμα, όπου έχει σχηματισμένους κύβους και ο κάθε ένας από αυτούς, έχει μήκος και πλάτος όπου αντιστοιχεί σε ένα εκατοστό. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε το Στερεοσκόπιο ανακλώμενου φωτός Nikon Stereoscope sm2-1500 για την παρατήρηση των ρωγμών και των επιφανειών θραύσης. Για τον καθαρισμό των επιφανειών όπου ήταν οξειδωμένες χρησιμοποιήσαμε υπέρηχους Starsonic 90 και βαφτίσαμε τα δείγματά μας σε λουτρό αιθανόλης.

Η οπτική μικροσκοπία [3] είναι βασική μέθοδος χαρακτηρισμού της μικροδομής. Μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγεθος, το είδος και το σχήμα των κόκκων ενός μετάλλου, η κατανομή των διαφόρων φάσεων, ατέλειες (ρωγμές, πόροι), ξένες ουσίες μέσα στο μέταλλο (εγκλείσματα) όπου είναι σημαντικά για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Η πηγή ακτινοβολίας είναι συνήθως ένα λευκό φως. Η δέσμη φωτός, προερχόμενη από την πηγή φωτός περνάει από τον συμπυκνωτή φακό, ανακλάται σε ένα ημιδιαφανές κάτοπτρο και μέσω του αντικειμενικού φακού προσπίπτει στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ένα μέρος της ακτινοβολίας που ανακλάται από την μεταλλική επιφάνεια, μεγεθύνεται περνώντας πάλι από τον αντικειμενικό φακό. Η ανάκλαση θα φθάσει στον παρατηρητή αφού έχει μεγεθυνθεί για δεύτερη φορά μέσω του προσοφθάλμιου φακού. Τα μεταλλογραφικά μικροσκόπια έχουν μεγέθυνση X10 συνήθως, στον προσοφθάλμιο φακό τους και φτάνουν έως χ1000-1500 συνολική μεγέθυνσης για να έχουμε διακριτή ικανότητα έως και 200nm Η αρχή λειτουργίας του φαίνετε αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα λειτουργίας οπτικού μεταλλογραφικού μικροσκοπίου.

Η μεταλλογραφική παρατήρηση των δοκιμών μας, για την παρατήρηση της μικροδομής και των επιφανειών θραύσης έγινε με Μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός Nikon inverted microscope Epiaphot 300 έπειτα από κατάλληλη μεταλλογραφική προετοιμασία των δειγμάτων, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM [17] όπου έγινε στο εργαστήριο μεταλλογραφίας του ΕΛΚΕΜΕ.

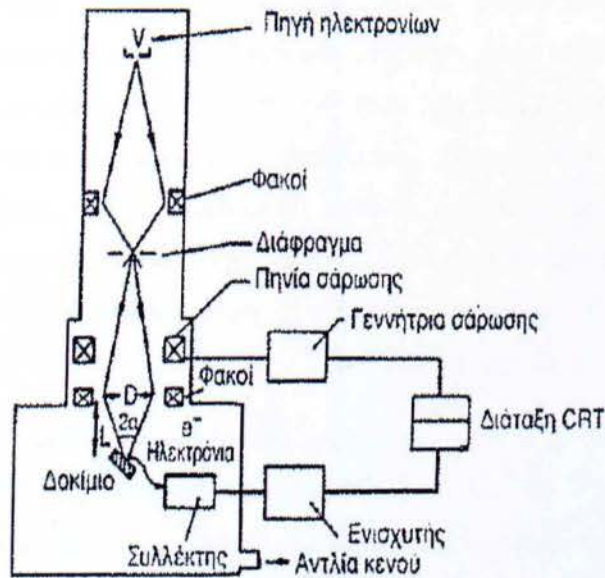
- Για την κοπή, στις επιθυμητές διαστάσεις, χρησιμοποιήθηκε δισκοτόμος Struers Discotome -50, με δίσκους κοπής κατάλληλους για την κοπή χάλυβα όπως ορίζεται από την κατασκευάστρια εταιρεία.
- Ο εγκιβωτισμός των δειγμάτων έγινε με μηχανή εν θερμό εγκιβωτισμού Struers ProntoPress 20, με την χρήση κοκκώδους ρητίνης Struers Multifast, όπου τοποθετήθηκαν τα κομμένα δείγματα για προετοιμασία. Η διαδικασία διαρκεί συνολικά 20 λεπτά και περιλάμβανε ταυτόχρονη θέρμανση στους 180°C και συμπίεση στα 250 bar και έπειτα ψύξη με νερό.
- Η δημιουργία ανακλαστικών επιφανειών για την παρατήρησή τους στο οπτικό μικροσκόπιο, έγινε με λείανση των εγκιβωτισμένων δειγμάτων με Struers RotorPol-35 μαζί με ημιαντόματη κεφαλή Struers RotorForce-4 σε ειδικά πανιά, Struers grid 80-220- 500-1200 και polishing MD-Mol με κόκκους από διαμάντι 3-6 μm , MD-Nap με OPS suspension 0.04 μm .
- Η χημική προσβολή των δοκιμών μας έγινε με χημικό διάλειμμα:

10ml HNO₃ + 15ml HCL + 10ml Acetic Acid [1]

- Η επεξεργασία των εικόνων μας, από το μικροσκόπιο και το στερεοσκόπιο, έγινε με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και την χρήση ειδικού λογισμικού image software- Image pro plus 7.0

Λεπτομερέστερη παρατήρηση των δοκιμίων μας, για τα λειασμένα δείγματα από τον μεταχειρισμένο και τον καινούργιο δίσκο καθώς και την επιφάνεια τριβής του δίσκου και εκείνη από το πέδιλο τριβής (τακάκι) , πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning electron Microscope, SEM) [3] FEI XL 40 XFEG, το οποίο μας επιτρέπει και την στοιχειακή μικροανάλυση (Electron Dispersive Spectrometer X-Ray Microanalysis System, EDAX) σε επιλεγμένα σημεία των παρατηρούμενων περιοχών. Η διακριτική ικανότητα- μεγέθυνση του SEM, είναι πολύ μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα μεγέθη του οπτικού- μεταλλογραφικού μικροσκοπίου. Έτσι για μια μεγέθυνση X 200, το αντίστοιχο βάθος πεδίου του SEM είναι 100 μm, ενώ του οπτικού μικροσκοπίου 0.7 μm. Οι μεγεθύνσεις της τάξης X 10.000- X 30.000 είναι δυνατότητες του SEM. Συνήθως στις περισσότερες εφαρμογές οι μεγεθύνσεις κυμαίνονται από X 1.000-5.000. Για την στήλη παραγωγής και εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων, θα πρέπει να δείγματα να στηριχτούν σε μία τράπεζα η οποία θα βρίσκεται σε έναν θάλαμο σε κενό, δηλαδή <math> < 10^{-3}</math> Pa. Η πηγή ηλεκτρονίων λειτουργεί σε ένα εύρος από 0-30 KV. Δημιουργεί δέσμη **ηλεκτρονίων (πρωτογενή ηλεκτρόνια)**, η οποία διερχόμενη μέσω μιας σειράς μαγνητικών φακών, επιταχύνεται, συγκεντρώνεται και εστιάζεται πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το δείγμα μας σαρώνεται από την δέσμη ηλεκτρονίων και τα εκπεμπόμενα από την επιφάνειά του, συλλέγονται για την δημιουργία οπτικού σήματος. **Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια (Secondary Electron)** είναι αυτά όπου προέρχονται από τις συγκρούσεις των πρωτογενών με τα άτομα των επιφανειακών στρωμάτων. Με την χρήση ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Detector) μπορέσαμε να συλλέξουμε πληροφορίες για την τοπογραφία των επιφανειών μας. **Τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (Backscatter Electron)** είναι αυτά όπου προέρχονται από τις ελαστικές συγκρούσεις μεταξύ των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων των επιφανειακών στρωμάτων. Οι πληροφορίες όπου λάβαμε με τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια αφορούσαν την μελέτη περιοχών με διαφορετική χημική σύσταση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της αναλυόμενης

επιφάνειας. **Οι ακτίνες- X** παράγονται από το επιφανειακό στρώμα του δοκιμίου μέχρι βάθους έως και 1 μm και εξαρτώνται από το είδος των ατόμων της επιφάνειας. Η ανάλυση των εκπεμπόμενων ακτίνων- X οδηγεί σε χημική ανάλυση όπου γίνεται παράλληλη με την παρατήρηση των δειγμάτων στο SEM. Για να πετύχουμε καλύτερες εικόνες, στα δείγματά μας χρειάστηκε να γίνει επικάλυψη με χρυσό (Au) με χρήση ειδικού μηχανήματος το Sputter Coater.



ΣΧΗΜΑ 3.3. Σχηματικό διάγραμμα του SEM.

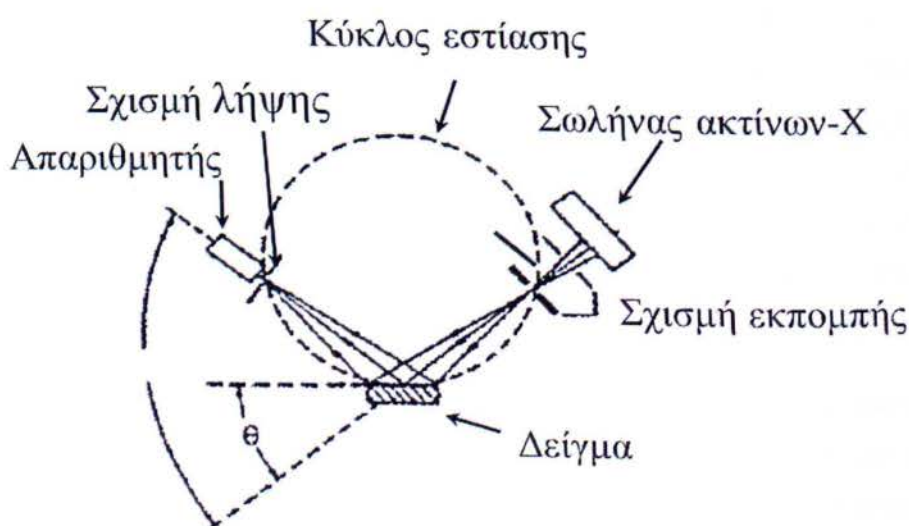
Η κρυσταλλογραφική ανάλυση [3] του δείγματος του πλακιδίου τριβής πραγματοποιήθηκε με περιθλασιμετρία ακτίνων X με συσκευή Philips X'Pert Pro. Χρησιμοποιήθηκαν λογισμικό ελέγχου περιθλασίμετρου, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων X Pert Organiser, Data Collector, Graphics & Identify καθώς και το λογισμικό δεδομένων αναγνώρισης και προσδιορισμού κρυσταλλικών φάσεων πολυκρυσταλλικών υλικών Crystallographica Search Match με βάση κρυσταλλογραφικών δεδομένων την PDF-2 database.

Η Περιθλασιμετρία ακτίνων- X είναι η βασικότερη μέθοδος τεχνική ανάλυσης της κρυσταλλικής δομής και χαρακτηρισμού υλικών. Η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση φάσεων, κυρίως σε μεταλλικά και κεραμικά υλικά, όπως επίσης και ο προσδιορισμός

της κρυσταλλικότητας πολυμερών, αλλά και η ανίχνευση κρυσταλλογραφικού ιστού, είναι μερικές από τις βασικές εφαρμογές της περίθλασης ακτίνων-Χ.

Η περίθλαση ακτίνων Χ (XRD) είναι μια διαδικασία εκπομπής ακτίνων-Χ κάτω από ορισμένες συνθήκες αλληλεπίδρασης ύλης και ακτινοβολίας. Στην περίπτωση των κρυσταλλικών στερεών η διαπλεγματική απόσταση d , είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος (λ) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας-Χ. Κατά την πρόσπτωση ακτίνων-Χ, συγκεκριμένου μήκους κύματος λ , σε ένα κρυσταλλικό στερεό παράλληλων επιπέδων, τότε υπάρχουν δύο περιπτώσεις: i) οι διάφορες ανακλώμενες δέσμες να μην είναι ομοφασικές οπότε δεν παρατηρείται ενίσχυση της έντασης της ακτινοβολίας και ii) οι διάφορες ανακλώμενες δέσμες για κάποια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, θ (γωνία Bragg) να είναι ομοφασικές και να συμβάλλουν, με την ενίσχυση της εξερχόμενης ακτινοβολίας. Η σχέση της γωνίας θ , του μήκους κύματος λ , των ακτίνων Χ, αλλά και της διαπλεγματικής απόστασης, d , δίνεται από την γνωστή εξίσωση του Bragg : $n\lambda = 2 d \eta\mu\theta$

Η πειραματική διάταξη XRD αποτελείται από : i) πηγή ακτίνων-Χ συγκεκριμένου μήκους κύματος, ii) ανίχνευση ακτίνων-Χ (απαριθμητής) iii) γωνιόμετρο. Καταγράφεται η ένταση της περιθλώμενης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη γωνία 2θ , και από την εξίσωση του Bragg υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές διαπλεγματικές αποστάσεις d για τα διάφορα επίπεδα. Με την βοήθεια κατάλληλης βάσης δεδομένων, προσδιορίζεται το είδος των φάσεων του υπό εξέταση υλικού.



Σχήμα 3.4. Σχηματικό διάγραμμα περιθλασιόμετρον ακτίνων Χ (XRD)

Το περιθλασιμετρία ακτίνων- X είναι η βασικότερη τεχνική ανάλυσης της κρυσταλλικής δομής και χαρακτηρισμού υλικών και πιο συγκεκριμένα, η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των φάσεων για μεταλλικά και μη υλικά. Επιπλέον επιτρέπει την ανίχνευση κρυσταλλογραφικού ιστού και τον προσδιορισμό της κρυσταλλικότητας πολυμερών που όμως δεν θα ασχοληθούμε στην εργασία μας.

Η παρατήρηση της επιφάνειας, για την σύγκριση των παραμέτρων της επιφανειακής τραχύτητας (R_a , R_q , Bearing ratio curves), μεταξύ καινούργιου και μεταχειρισμένου δίσκου, έγινε με το Προφιλόμετρο Optical profiler Wyko NT1100 [20]. Η Προφίλομετρία (profilometry) είναι κλάδος της μετρολογίας (metrology) και έχει σαν σκοπό την μέτρηση και τον χαρακτηρισμό μιας επιφάνειας. Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες που χωρίζεται η προφίλομετρία και αυτές είναι:

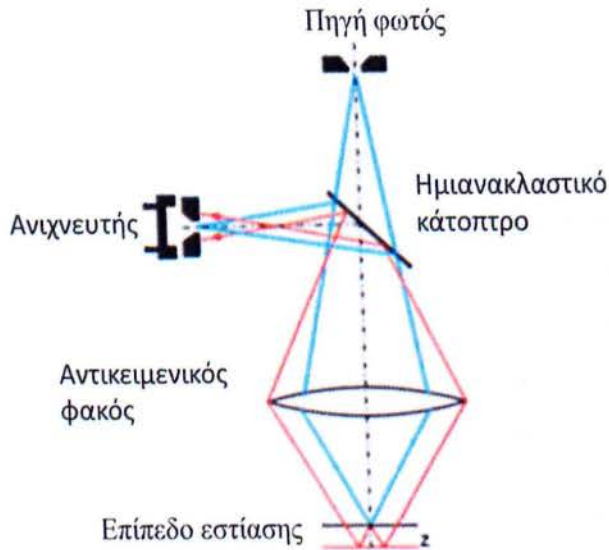
- Προφίλομετρία επαφής (Contact Profilometry)
- Προφίλομετρία χωρίς επαφή (Non-Contact Profilometry)

Η μέθοδος όπου χρησιμοποιήσαμε εμείς για να παρατηρήσουμε τις επιφάνειές μας είναι η προφίλομετρία χωρίς επαφή. Η μέθοδος αυτή, της προφίλομετρίας λειτουργεί με την επαφή ενός αισθητήρα από διαμάντι με διαστάσεις μέτρησης 0,8mm * 5mm. Ο αισθητήρας λαμβάνει τις αποκλίσεις μορφής της επιφάνειας με την αιχμή του, ενώ μια διάταξη πρόωσης οδηγεί το σύστημα επάνω από την επιφάνεια. Ταυτόχρονα εμφανίζονται, ανάλογα με τις κυματώσεις, μεταβολές της θέσης της αιχμής του αισθητήρα έναντι μιας επιφάνειας αναφοράς. Η αρχή λειτουργίας του φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 3.4.

Για την μέθοδο πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις πρέπει να γίνει η βαθμονόμηση (calibration), η οποία γίνεται τοποθετώντας ένα δείγμα που θεωρείται ως πρότυπο και επιλέγοντας την επιλογή βαθμονόμηση. Την μέτρηση που θα πάρει από το δείγμα την έχει ως σημείο αναφοράς.

Η μέθοδος της οπτικής προφίλομετρίας, που αποτελεί μέθοδο μη-επαφής, χρησιμοποιεί για να μετρήσει μεγάλο εύρος υψών επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε ένα σύστημα οπτικής μικροσκοπίας. Υπάρχουν δύο τεχνολογίες μέτρησης η PSI (Phase-Shifting Interferometry) και η VSI (Vertical Scanning Interferometry) [20]. Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο VSI με

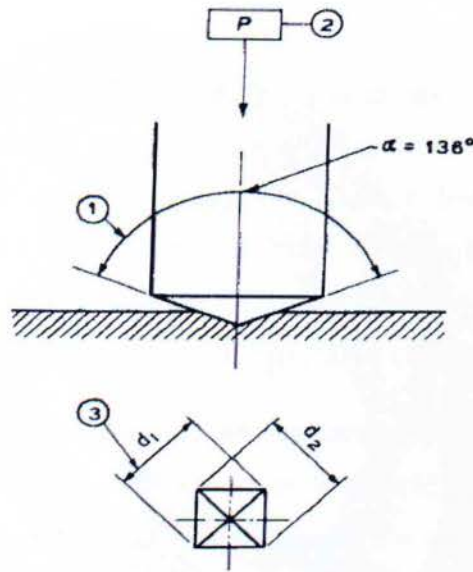
επιφάνεια μέτρησης $2,4 * 1,8\text{mm}$. Όλα τα δεδομένα του πειράματος καταχωρούνται και επεξεργάζονται το ειδικό λογισμικό με την βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.



Σχήμα 3.5. Η αρχή λειτουργίας του οπτικού προφιλόμετρου.

Η μικροσκληρομέτρηση, [3] για την παρατήρηση διαφορών των τιμών των δειγμάτων, έγινε με την χρήση του Wolpert στο εργαστήριο μεταλλογραφίας του ΕΛΚΕΜΕ. Οι διαφορές στις τιμές κατά ακτινικό μήκος των δειγμάτων μας θα μας δείξουν εάν έχουν υποστεί περμική κατεργασία. Το πρότυπο όπου ισχύει για την δοκιμή αυτή είναι το ASTM E 92 [18] και ASTM E384[19]. Για να γίνει η δοκιμή έγινε βαθμονόμηση του οργάνου με ένα πρότυπο δοκίμιο της κατασκευάστριας εταιρίας. Η εισχώρηση του διεισδυτή από διαμάντι έχει σχήμα πυραμίδας με γωνία 136° όπου μετρώντας τις διαγώνιους της μπορούμε και παίρνουμε την τιμή της σκληρότητας του δοκιμίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι κατάλληλη για σκληρά και λεπτά υλικά. Το αποτύπωμα που προκαλεί ο διεισδυτής υπό την επίδραση του προκαθορισμένου φορτίου έχει σχήμα έχει σχήμα τετραγωνικό. Η δύναμη που ασκείτε στο δείγμα καλύπτει ένα εύρος από 1-120 kgf. Εμείς για τα δοκίμιά μας χρησιμοποιήσαμε 0,500Kg . Η σκληρότητα κατά Vickers ορίζεται αντίστοιχα ως δύναμη ανά επιφάνεια αποτυπώματος διείσδυσης και δίνεται από τη σχέση:

$$HV = 2P \sin(a/2) / d^2 = 1.8544 P/d^2$$



Σχήμα 3.6. Η γεωμετρία του ίχνους του διεισδυτή για της μεθόδου Vickers.

Όπου

α = Η γωνία της διαμαντένιας κεφαλή 136°

P = Δύναμη σε Kg του διεισδυτή.

d = η μέση τιμή της διαγωνίου από το αποτύπωμα $(d_1+d_2)/2$

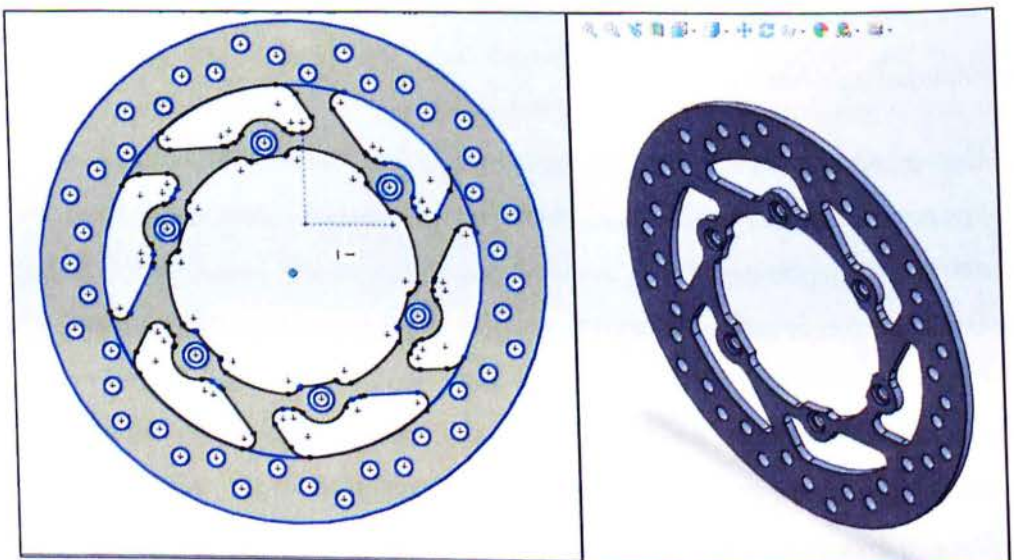
Περιορισμοί μεθόδου Vickers

- Η επιφάνεια που πρόκειται να σκληρομετρηθεί πρέπει να είναι λειασμένη και να έχει υποστεί χημική στίλβωση. Η ποιότητα της επιφανείας εξασφαλίζει σαφή όρια αποτυπώματος διεισδυτή.
- Το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι 1,5 φορά μεγαλύτερο από το μήκος της διαγωνίου του τετραγωνικού αποτυπώματος.
- Η απόσταση μεταξύ δυο σκληρομετρήσεων πρέπει να είναι τουλάχιστον 2,5 φορές μεγαλύτερη από τη διαγώνιο d του αποτυπώματος.
- Όταν η σκληρομέτρηση πραγματοποιείται σε κυρτή κυλινδρική επιφάνεια η τελική τιμή σκληρότητας σε Vickers (HV) δίνεται λαμβάνοντας υπόψη έναν συντελεστή σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E92-82(2003)

3.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ/ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) [15] έγινε αίτηση και παραχώρηση, από το εκπαιδευτικό ίδρυμα του τμήματός μηχανολογίας, της ειδικής φοιτητικής άδεια (Student License) για την χρήση του λογισμικού πακέτου *SolidWorks 2012*. Το λογισμικό πακέτο είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα στην βιομηχανία για σχεδίαση και ανάλυση, με πολλούς χρήστες να είναι απόλυτα ικανοποιημένοι από την απόδοση, την ταχύτητα και τις δυνατότητες όπου έχει.

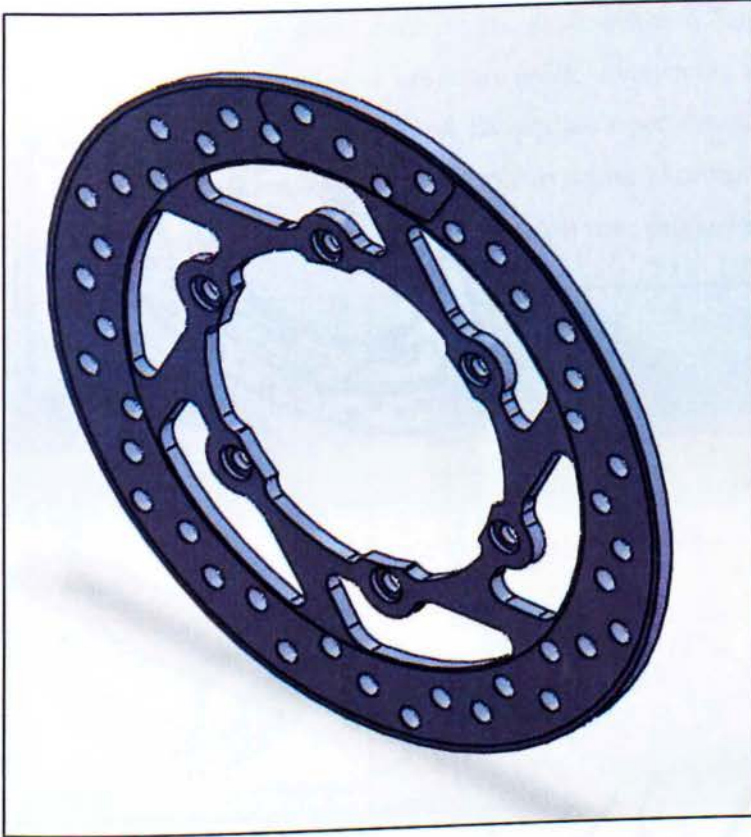
Η αρχή έγινε με την μοντελοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως έχουμε αναφέρει περιλαμβάνει την γεωμετρία, τις οριακές συνθήκες, και την δημιουργία πλέγματος. Είναι ένα κομμάτι όπου θέλει προσοχή για την δημιουργία της ορθής γεωμετρίας αν και δεν θεωρείται δύσκολο. Με την εκκίνηση του λογισμικού μπαίνουμε σε στο γραφικό του περιβάλλον και επιλέγοντας επίπεδο αρχίζουμε να σχεδιάζουμε το μοντέλο μας (σχήμα). Αφού ολοκληρώσαμε το σχέδιό μας, είμαστε έτοιμη για το επόμενο βήμα όπου είναι η μοντελοποίηση του (σχήμα). Η ολοκλήρωση του μοντέλου μας γίνεται με την σχεδίαση της επιφάνειας τριβής με τα πέδιλα τριβής (τακάκια) καθώς είναι βασική εντολή για την ανάλυση αργότερα την ώρα της προσομοίωσής μας.



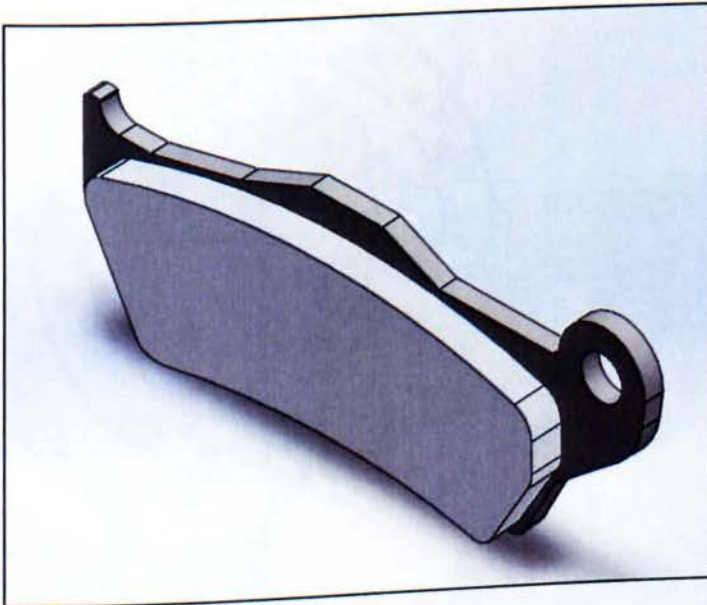
Σχήμα 3.7. Η μοντελοποίηση με την χρήση του ειδικού λογισμικού.

Αριστερά η Δημιουργία του σχεδίου

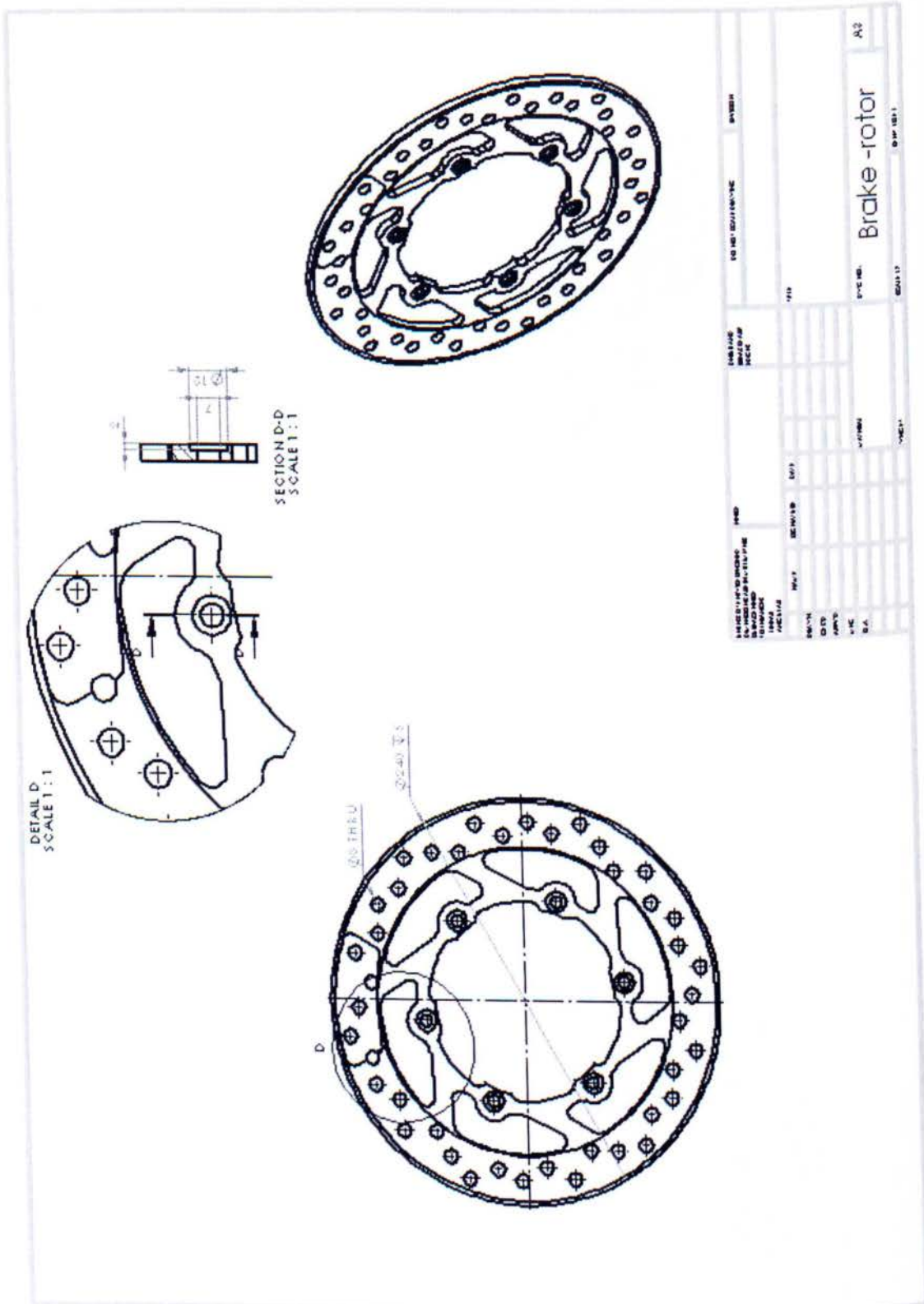
Δεξιά η μοντελοποίηση του αρχικού μας σχεδίου.



Σχήμα 3.8. Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση για τον δίσκο πέδησης.

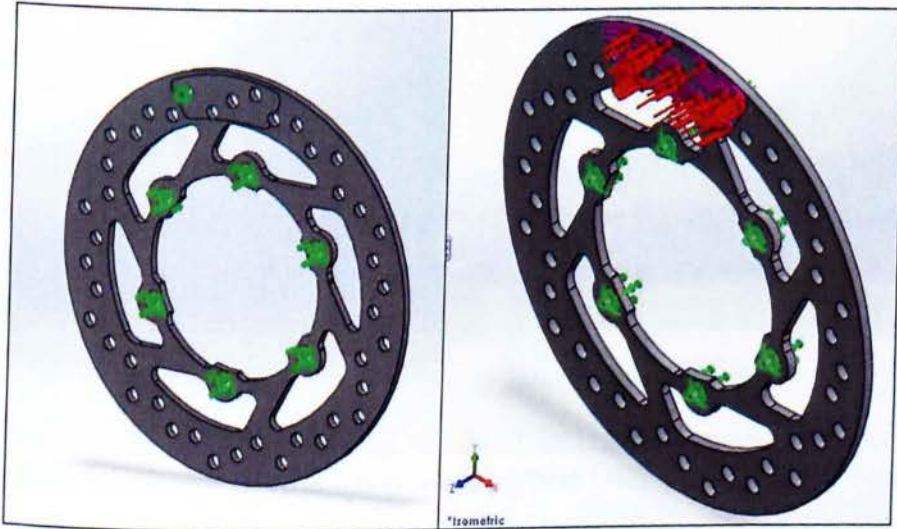


Σχήμα 3.8. Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση για το πέδιλο τριβής.



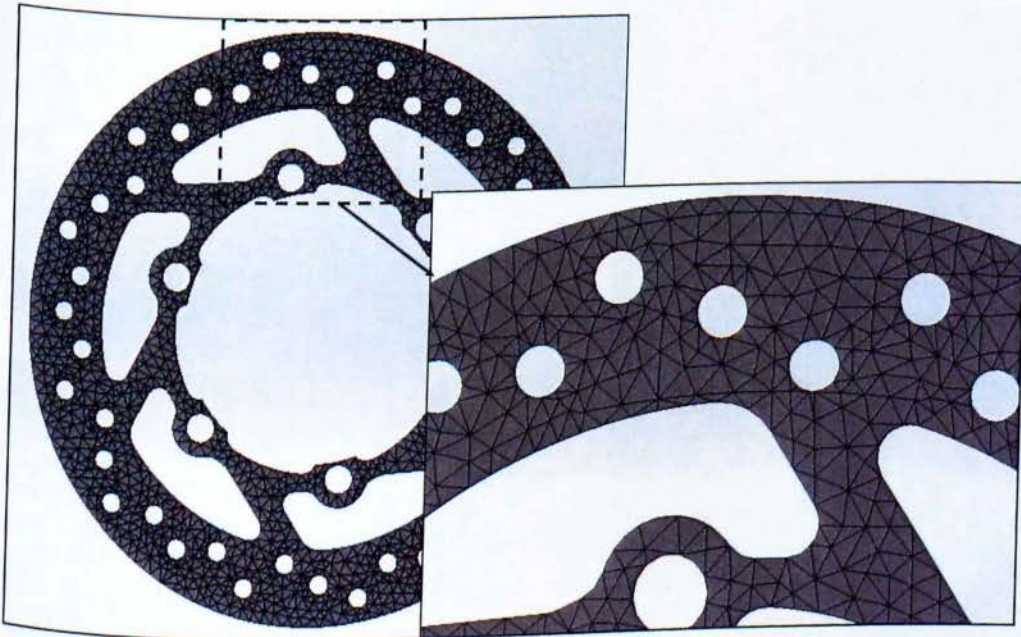
Σχήμα 3.9. Το κατασκευαστικό σχέδιο για το δίσκο πέδησης.

Αφού ολοκληρώσαμε την στερεά μοντελοποίηση μας ακολούθησε η διαδικασία της προσομοίωσης για την εύρεση των τάσεων στο δίσκο πέδης. Ανοίγοντας την καρτέλα του simulation επιλέγουμε Static. Στην συνέχεια Επιλέγουμε αφού έγινε λεπτομερής ανάλυση, από τους καθηγητές μας και εμάς, για το διάγραμμα ελευθέρου σώματος και τις δυνάμεις όπου ασκούνται σε αυτό, έγινε η εφαρμογή τους στο λογισμικό.



Σχήμα 3.10. Η εισαγωγή των δυνάμεων.

Με πράσινο η πάκτωση. Με κόκκινο η πίεση. Με μωβ η δύναμη.



Σχήμα 3.11. Το Πλέγμα μας για την ανάλυση του δίσκου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αποτελέσματα διερεύνησης

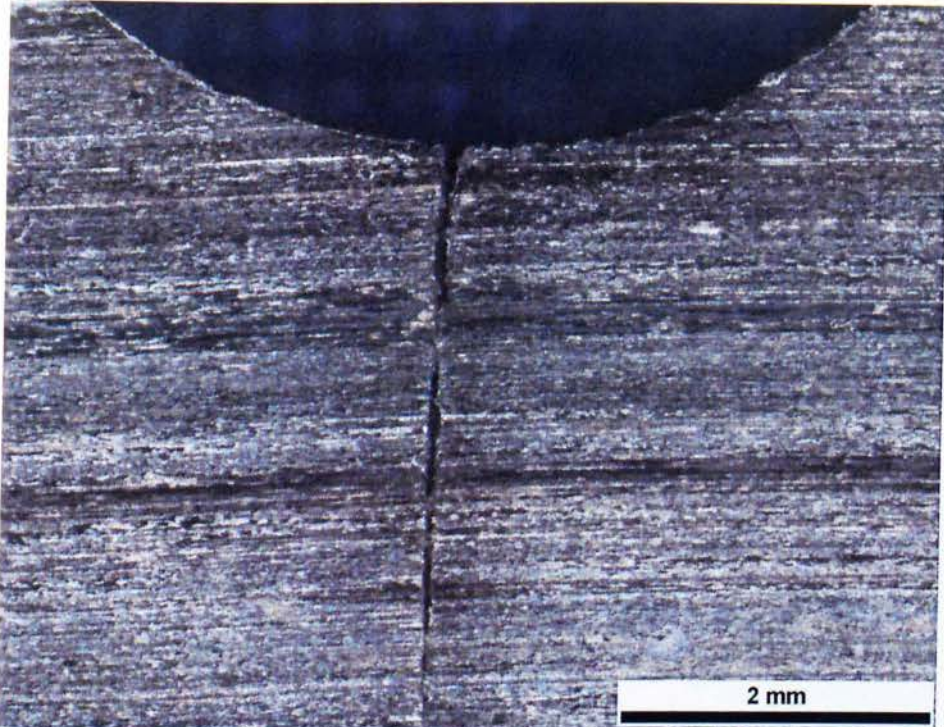
4.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

Η μακροσκοπική παρατήρηση του δίσκου πέδης, μετά την απομάκρυνσή του από το χώρο λειτουργίας του έδειξε ως κρίσιμα αίτια της τελικής του αστοχίας δυο παράγοντες που έδρασαν ταυτόχρονα κατά την λειτουργία του.

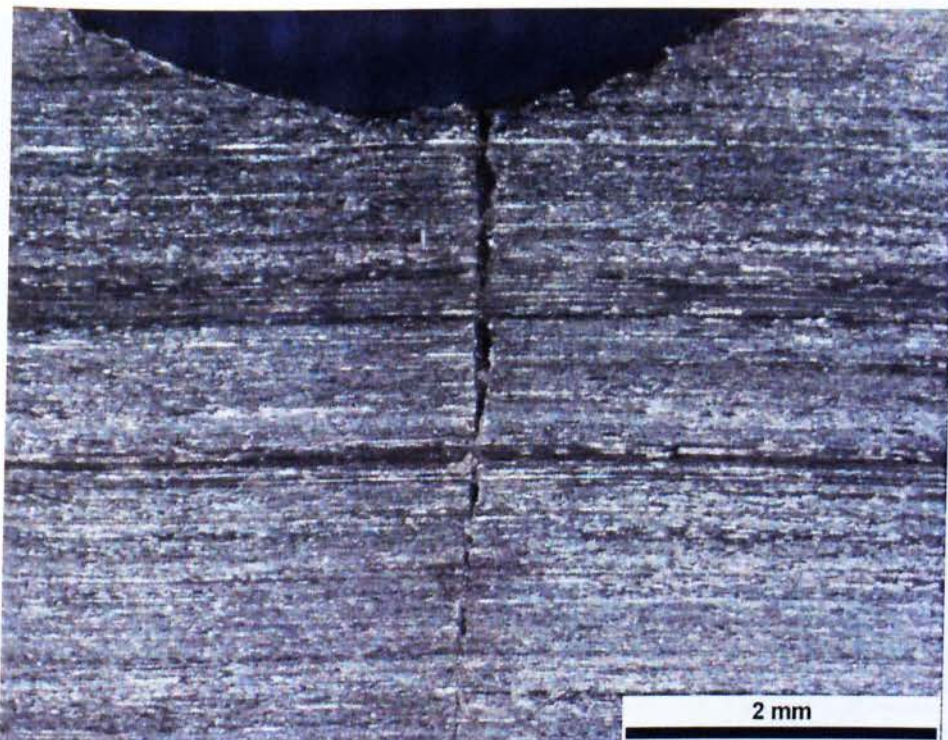
- Σε πρώτο στάδιο η ρωγμή δημιουργείται σε περιοχή όπου βρίσκεται η πιο απομακρυσμένη οπή αερισμού του δίσκου. Παρατηρείται η επανάληψη του φαινομένου της ρωγμής για αντίστοιχής γεωμετρίας οπή.
- Σε δεύτερο στάδιο οι διατμητικές τάσεις όπου επιβλήθηκαν κατά την λειτουργία του δίσκου ήταν τέτοιες όπου επέκτειναν προοδευτικά την εξέλιξη των ρωγμών.
- Επόμενο στάδιο η θερμική κόπωση όπου αναπτύσσεται, κάθε φορά όπου ενεργοποιείτε ο μηχανισμός, λειτούργησε για την επιτάχυνση του μηχανισμού της φθορά καθώς παρατηρείται αισθητή μείωση του πάχους του υλικού εκεί όπου υπάρχει τριβή με το πέδλο τριβής. και της εξέλιξης των ρωγμών.
- Στο τελευταίο στάδιο παρατηρείται η πλήρης διάδοση της ρωγμής για μεγάλο μήκος(οπή N3).



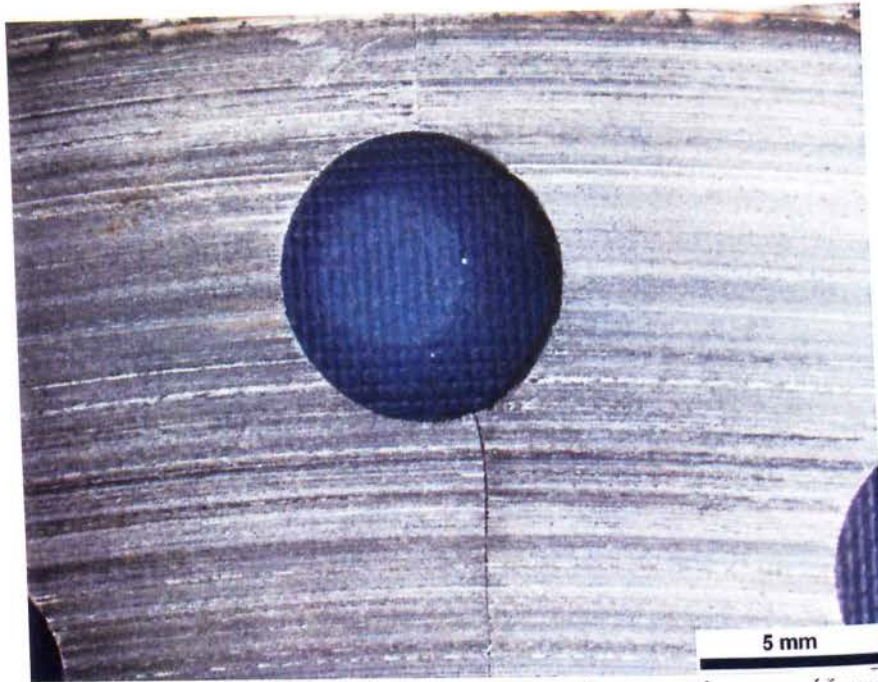
Σχήμα 4.1. Ο μεταχειρισμένος δίσκος και τα σημεία όπου εμφανίστηκαν οι ρωγμές.



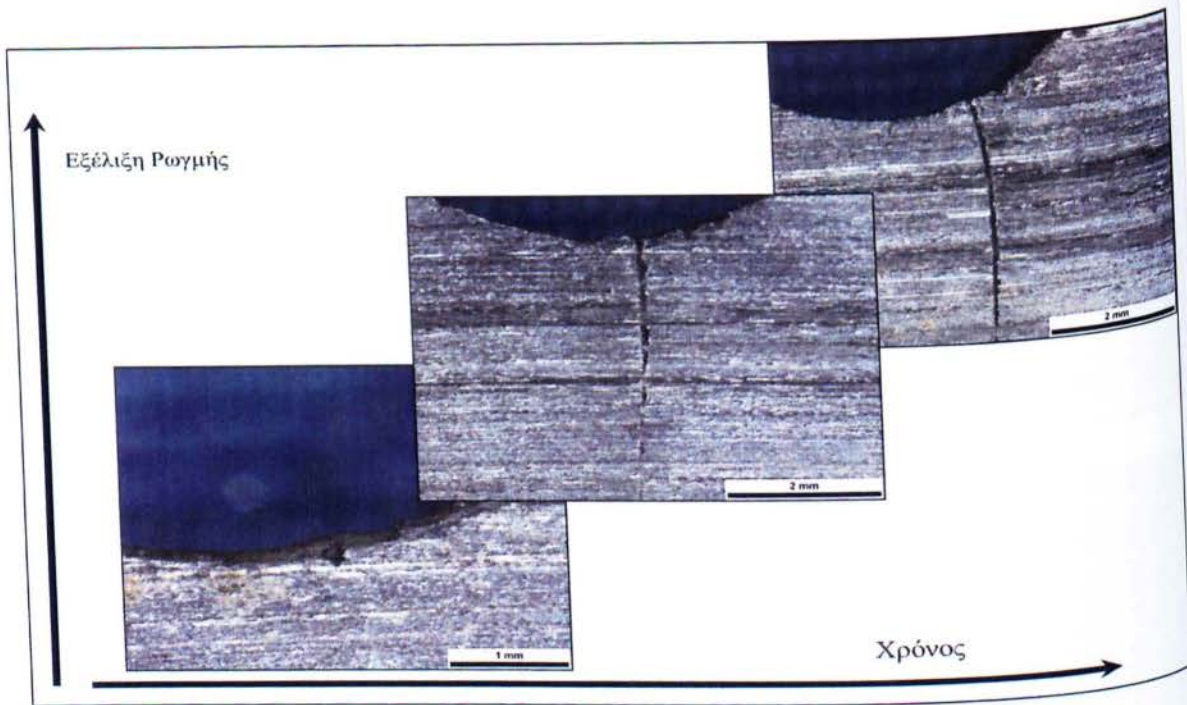
Σχήμα 4.2. Η ρωγμή (N1) και η εξέλιξή της ακτινικά προς το κέντρο του άξονα.



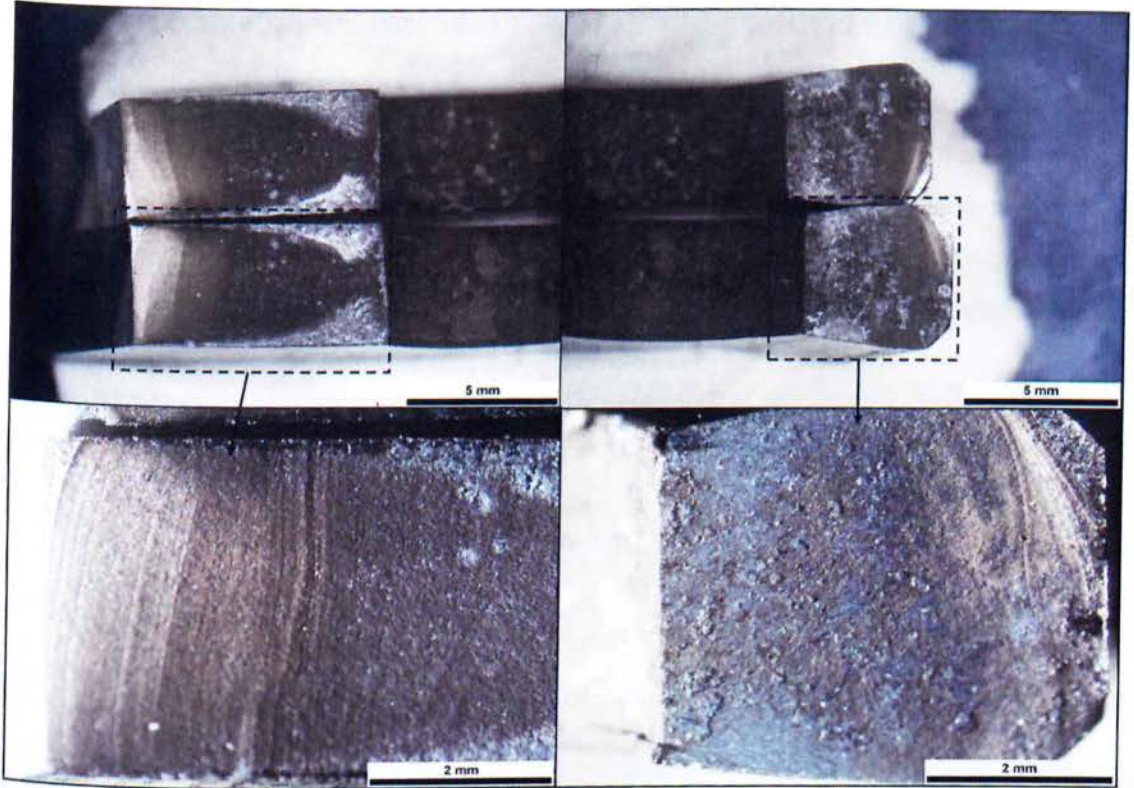
Σχήμα 4.3. Η ρωγμή (N2) και η εξέλιξή της ακτινικά προς το κέντρο του άξονα.



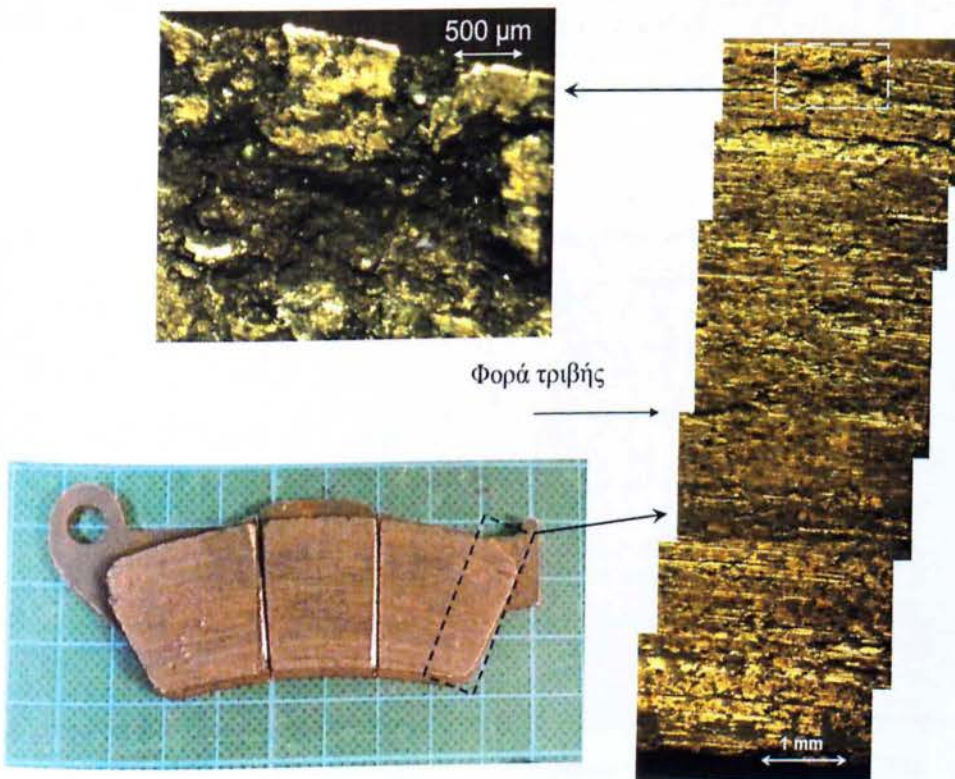
Σχήμα 4.4. Η ρωγμή (N3) και η εξέλιξή της ακτινικά προς το κέντρο του άξονα.



Σχήμα 4.5. Δίσκος Πέδης όπου παρατηρήθηκε έναρξη ρωγμών και επέκταση - εξέλιξη για μεγάλο μήκος επί του δίσκου. Παρατηρείτε η έναρξη θυλάκων και η δημιουργία ρωγμής κατά μήκος.



Σχήμα 4.7. Η επιφάνεια θραύσης από την οπή αερισμού.



Σχήμα 4.8. Η Φθορά Λείανσης (abrasive wear) στο πέδιλο τριβής και η χαρακτηριστική φθορά για το μαλακό υλικό του τριβοσυστήματός μας.

4.2 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για την εξακρίβωση της χημικής σύστασης του μεταχειρισμένου δίσκου πέδησης αλλά και του νέου πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση στα εργαστήρια της SOVEL Α.Ε. για δύο δείγματα από κάθε ένα δίσκο. Εκεί είχαμε τα εξής αποτελέσματα (πίνακας 4.1) από την διαδικασία και τα αντιπαραθέτουμε με ορισμένα από το *stahlschlüssel* [2] (πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.1 : Σύγκριση χημικής σύστασης κ.β. των δίσκων πέδησης.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	V	Sn
AX1	0.060	0.286	1.525	0.031	0.013	12.690	0.159	0.048	0.018	0.002	0.006	0.019	0.020
AX2	0.058	0.029	1.520	0.031	0.014	12.730	0.163	0.049	0.018	0.002	0.006	0.019	0.021
BX1	0.053	0.305	1.567	0.025	0.011	12.540	0.074	0.038	0.017	0.002	0.014	0.026	0.020
BX2	0.056	0.293	1.564	0.026	0.011	12.440	0.069	0.037	0.016	0.002	0.013	0.025	0.018

Όπου AX1 και AX2 τα δείγματα από το μεταχειρισμένο δίσκο πέδησης και BX1, BX2 για τον καινούργιο δίσκο.

Πίνακας 4.2 : Χημική σύσταση χαλδύβων σύμφωνα με το *stahlschlüssel*.

A/A	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
F 405	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 1.00	≤ 0.040	≤ 0.030	11.5-14.5	≤ 0.60
M 410	≤ 0.15	≤ 1.00	≤ 1.00	≤ 0.040	≤ 0.030	11.5-13.5	≤ 0.75
FM 410 S	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 1.00	≤ 0.040	≤ 0.030	11.5-13.5	≤ 0.60
F 405	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 1.00	≤ 0.040	≤ 0.030	11.5-14.5	≤ 0.60

4.3 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

4.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΔΙΣΚΟΥΣ ΠΕΔΗΣΗΣ

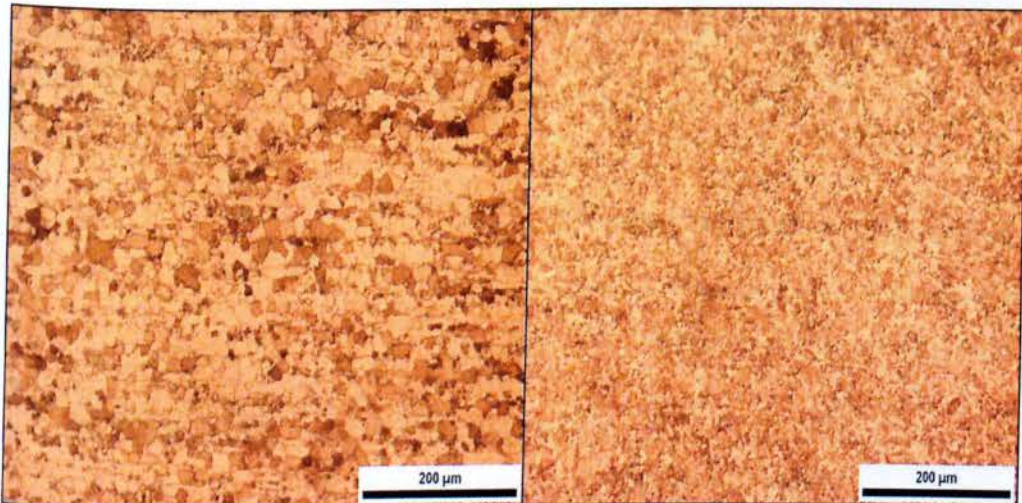
Δείγματα από το σημείο επαφής του δίσκου με το πέλδilo τριβής, αλλά και το υπόλοιπο μέρος, επιλέχθηκαν και λήφθηκαν για μελέτη έπειτα από αφαίρεση των επιφανειακών συσσωρευτών, με τη χρήση υπερήχων. Τα δείγματα εξετάστηκαν διεξοδικά στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.



Σχήμα 4.9. Η μικροδομή για το μεταχειρισμένο δίσκο πέδης με μεγέθυνση X200.

Αριστερά : Η περιοχή όπου δεν συμμετέχει στο τριβοσύστημα (brige).

Δεξιά : Η περιοχή όπου συμμετέχει στο τριβοσύστημα (flange).

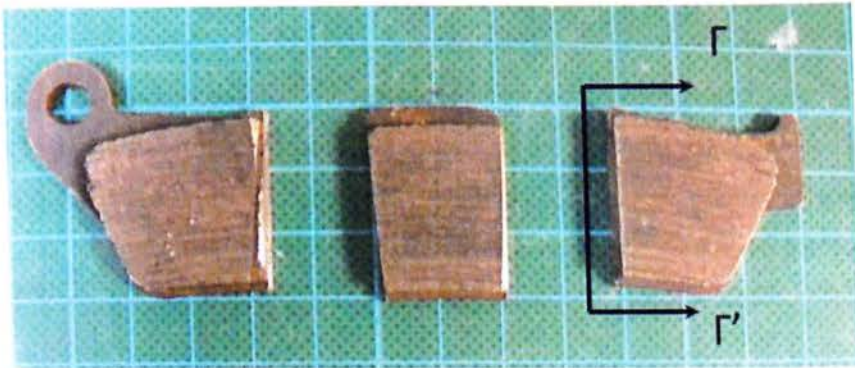


Σχήμα 4.10. Η μικροδομή για το νέο δίσκο πέδης με μεγέθυνση X200.

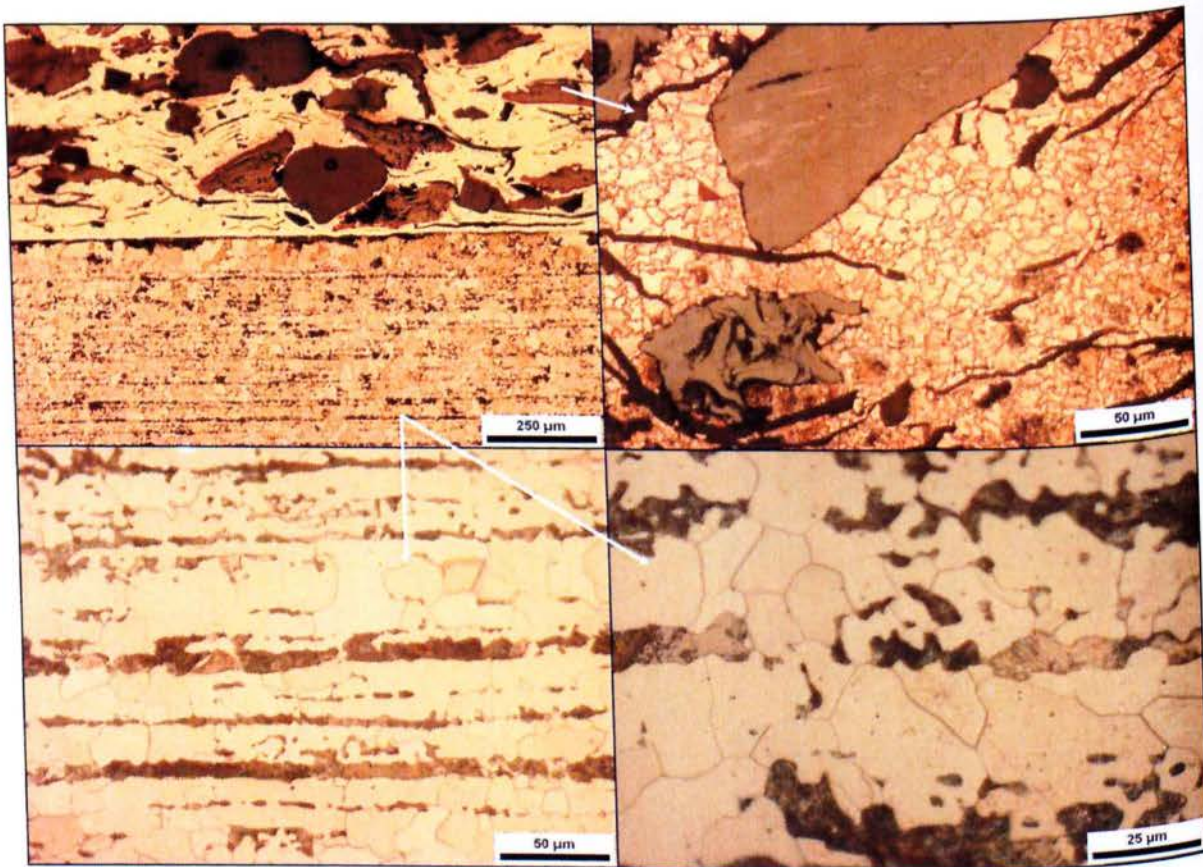
Αριστερά : Η περιοχή όπου δεν συμμετέχει στο τριβοσύστημα (brige).

Δεξιά : Η περιοχή όπου συμμετέχει στο τριβοσύστημα (flange)

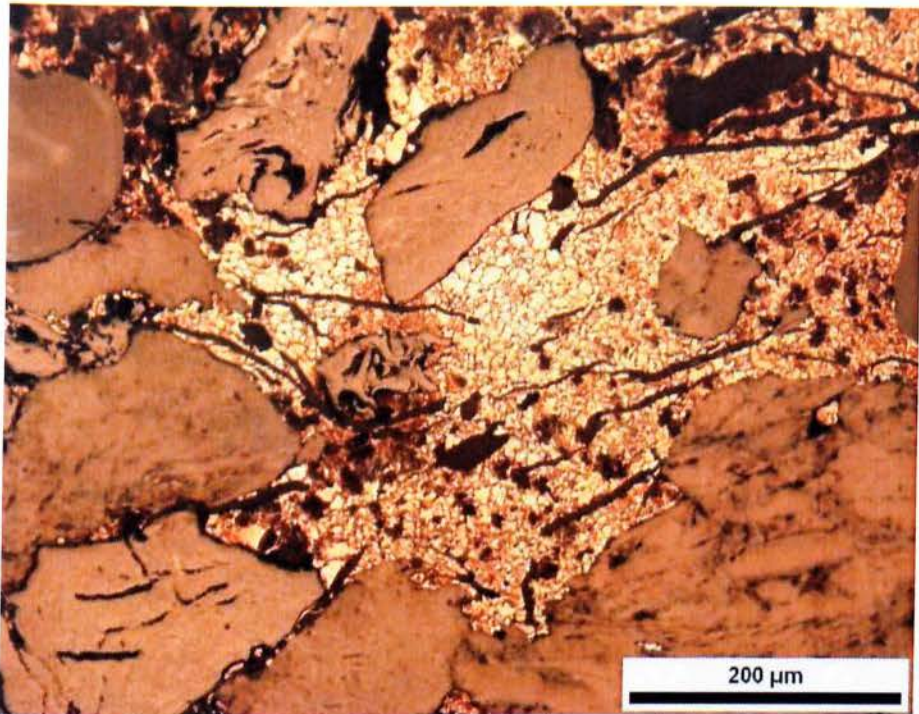
4.3.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ, ΓΙΑ ΤΟ ΠΛΑΚΙΔΙΟ ΤΡΙΒΗΣ.



Σχήμα 4.11. Το υλικό τριβής πριν εγκιβωτιστεί.

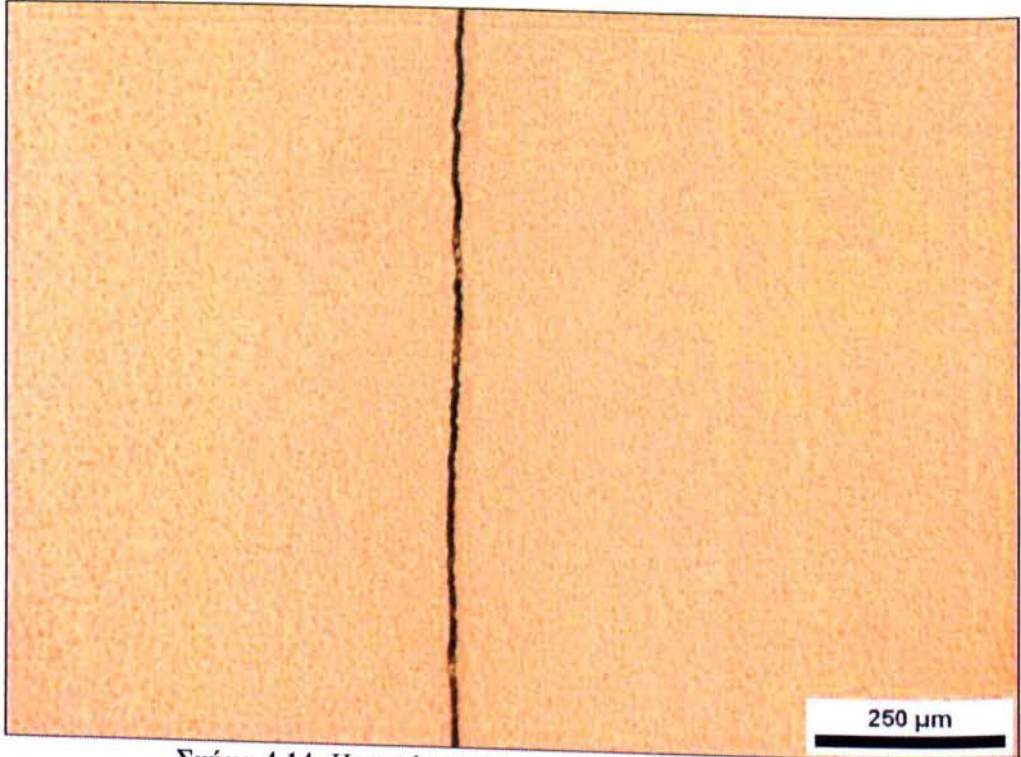


Σχήμα 4.12. Η μικροδομή για το πέδιλο τριβής (τακάκι).
 Πάνω αριστερά : το υλικό τριβής και από κάτω ο χάλυβας X100.
 Πάνω Δεξιά : Το υλικό τριβής X 500.
 Κάτω Αριστερά: Ο χάλυβας για μεγέθυνση X 500.
 Κάτω Δεξιά: Ο χάλυβας για μεγέθυνση X1000.

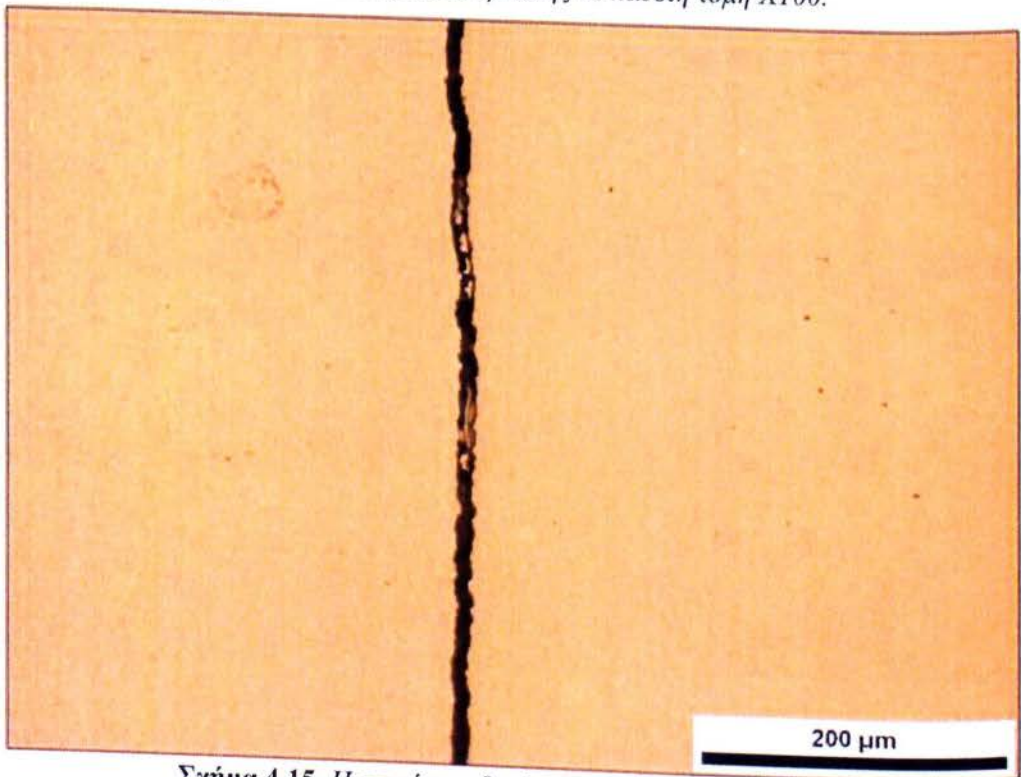


Σχήμα 4.13. Η μικροδομή για το πέδιλο τριβής (τακάκι). Οι κόκκοι χαλκού του υλικού τριβής. X200

4.3.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΡΩΓΜΗΣ



Σχήμα 4.14. Η επιφάνεια θραύσης σε κάθετη τομή X100.



Σχήμα 4.15. Η επιφάνεια θραύσης σε κάθετη τομή X200.

4.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ (SEM)

Προκειμένου να ερμηνευτούν οι παρατηρήσεις στο οπτικό μικροσκόπιο, από τα ίδια δοκίμια υλικού εξετάστηκαν με τη χρήση Ηλεκτρονικού μικροσκοπίου Σάρωσης, το οποίο επιτρέπει αφενός τη λεπτομερέστερη παρατήρηση των επιφανειών, σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, αφετέρου δε τη σημειακή μικροανάλυση επιλεγμένων περιοχών που η σημειακή μικροανάλυση επιλεγμένων περιοχών που η μορφολογία τους υποδηλώνει διαφοροποιήσεις στη χημική σύσταση του υλικού.

Η στοιχειακή μικροανάλυση πραγματοποιήθηκε τόσο στην επιφάνεια τριβής-φθοράς, όσο και στο πέδιλο τριβής (τακάκι). Παρατηρήσαμε αναμενόμενα αποτελέσματα, με βάση τα δεδομένα μας από την χημική ανάλυση όπου έχει προηγηθεί, καθώς συλλέξαμε και πληροφορίες για το πέδιλο τριβής (τακάκι) από την στοιχειακή ανάλυση με την βοήθεια του EDAX όπου θα μας βοηθήσουν αργότερα στην κρυσταλλογραφική ανάλυσή του.

4.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ



Σχήμα 4.16. Η μικροδομή για τον χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που δεν συμμετέχει σαν τριβοσύστημα.



Σχήμα 4.17. Η μικροδομή για τον χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που δεν συμμετέχει σαν τριβοσύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.16



Σχήμα 4.18. Η μικροδομή για τον χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που δεν συμμετέχει σαν τριβασύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.17



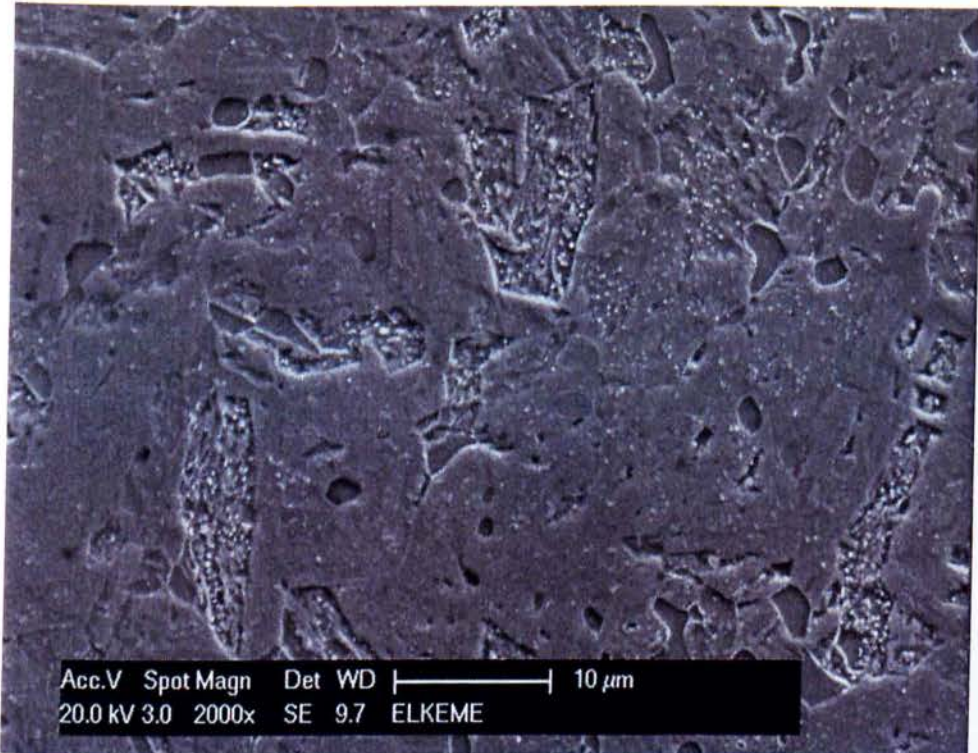
Σχήμα 4.19. Η μικροδομή για τον χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που δεν συμμετέχει σαν τριβασύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.18



Σχήμα 4.20. Η μικροδομή για τον χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβασύστημα.



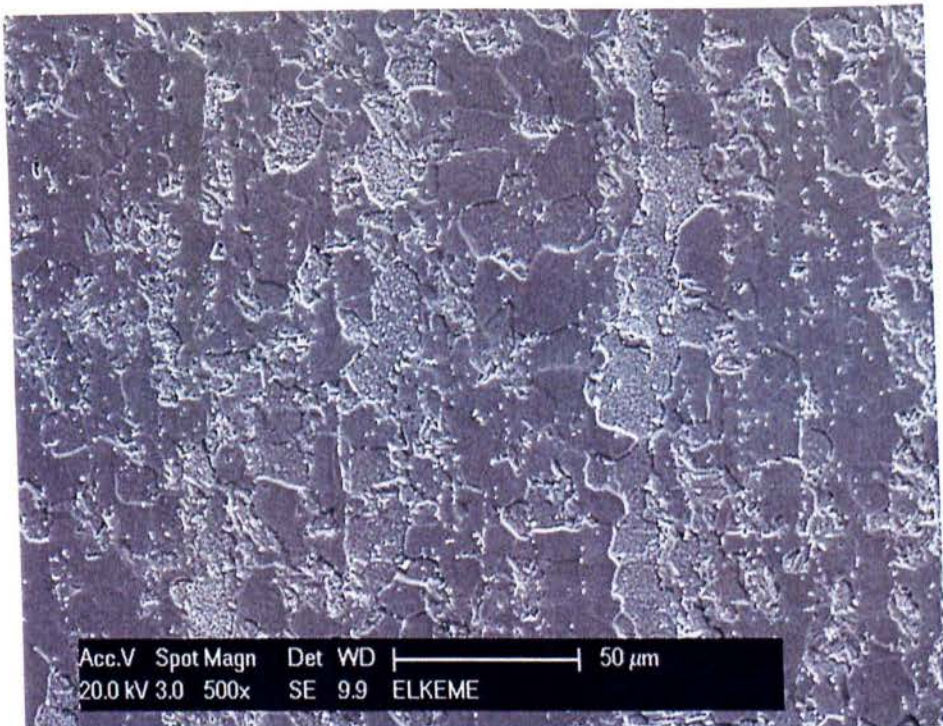
Σχήμα 4.22. Η μικροδομή για τον χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβασύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.21



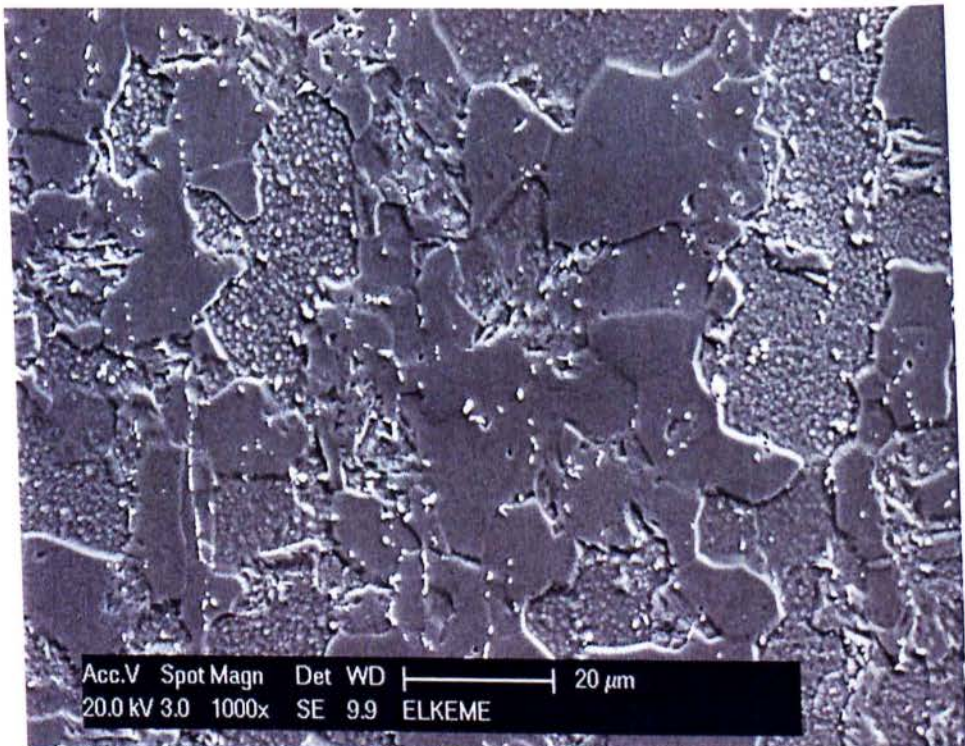
Σχήμα 4.23. Η μικροδομή για τον χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβοσύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.22



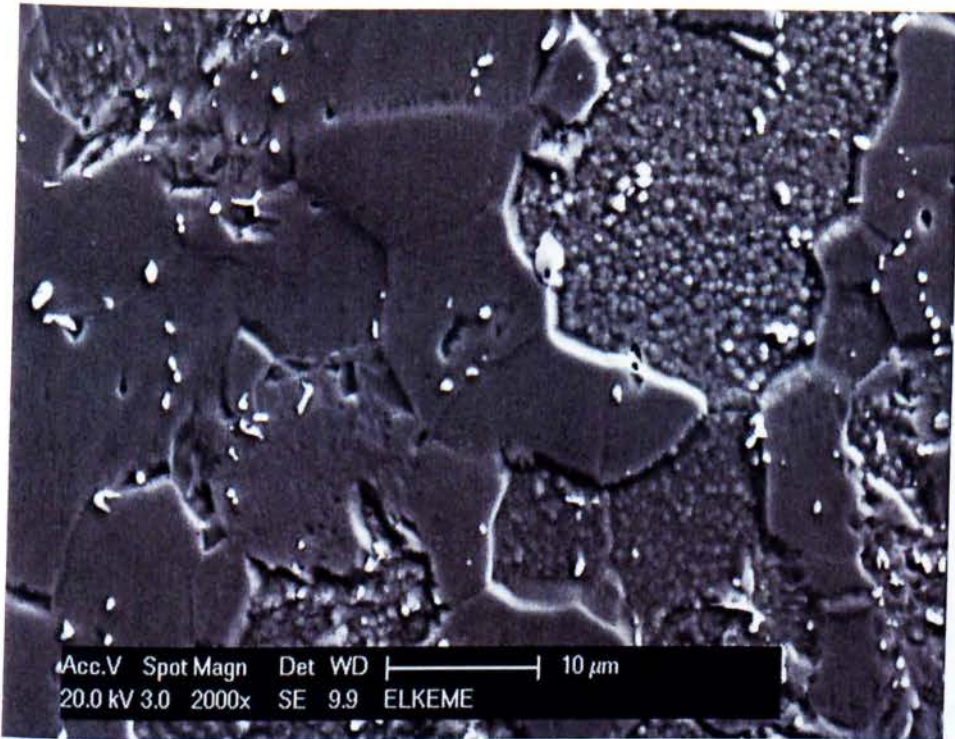
Σχήμα 4.24. Η μικροδομή για τον χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβοσύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.23



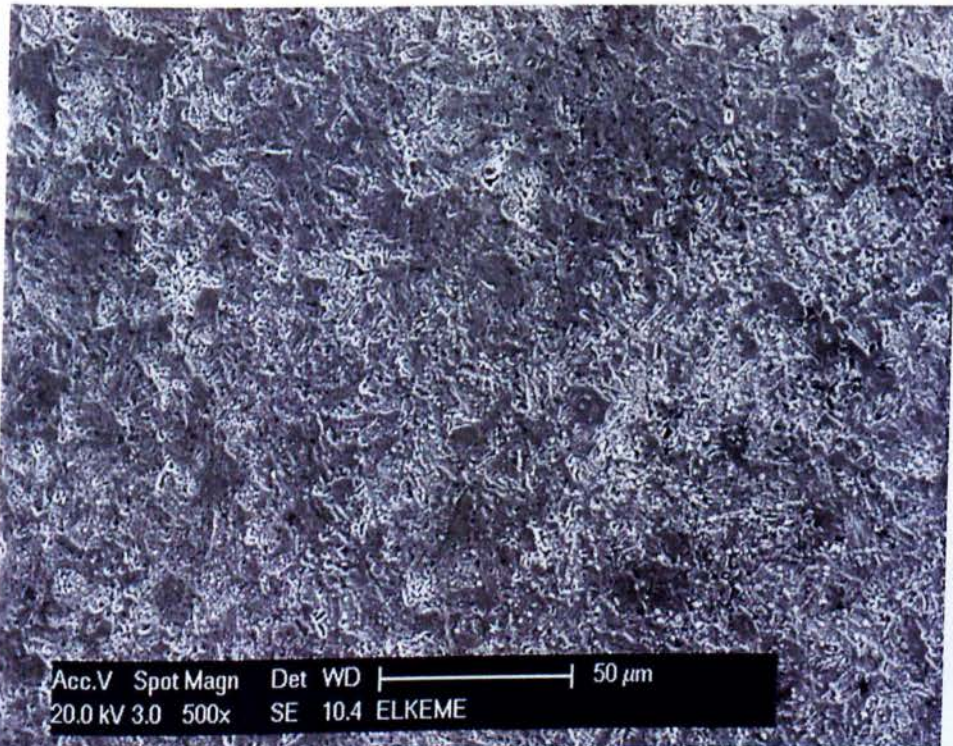
Σχήμα 4.25. Η μικροδομή για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που δεν συμμετέχει σαν τριβοσύστημα.



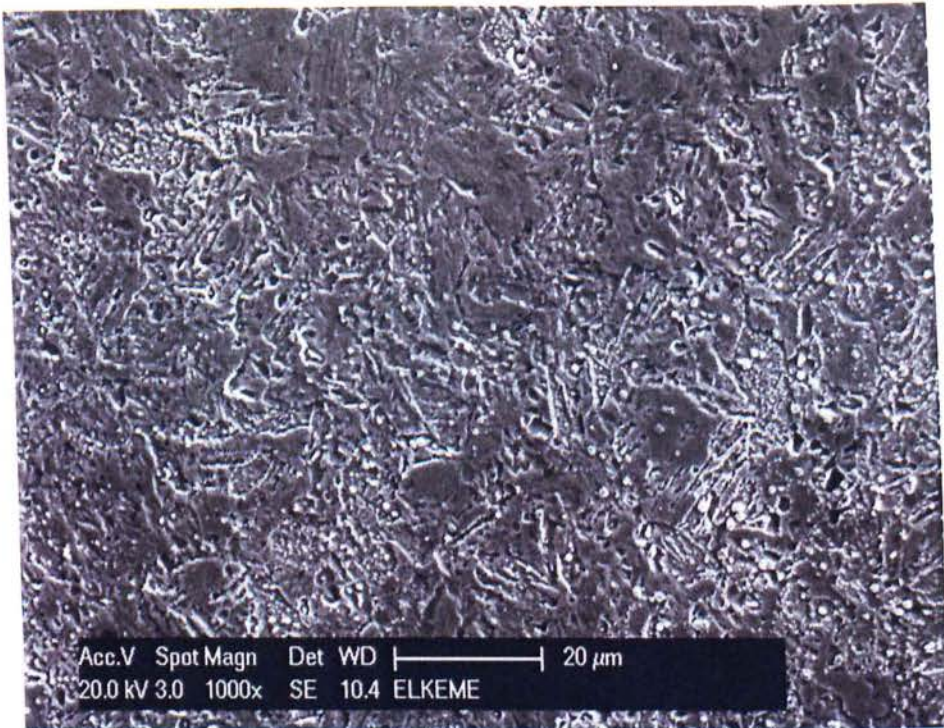
Σχήμα 4.26. Η μικροδομή για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που δεν συμμετέχει σαν τριβοσύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.25



Σχήμα 4.27. Η μικροδομή για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που δεν συμμετέχει σαν τριβοσύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.26



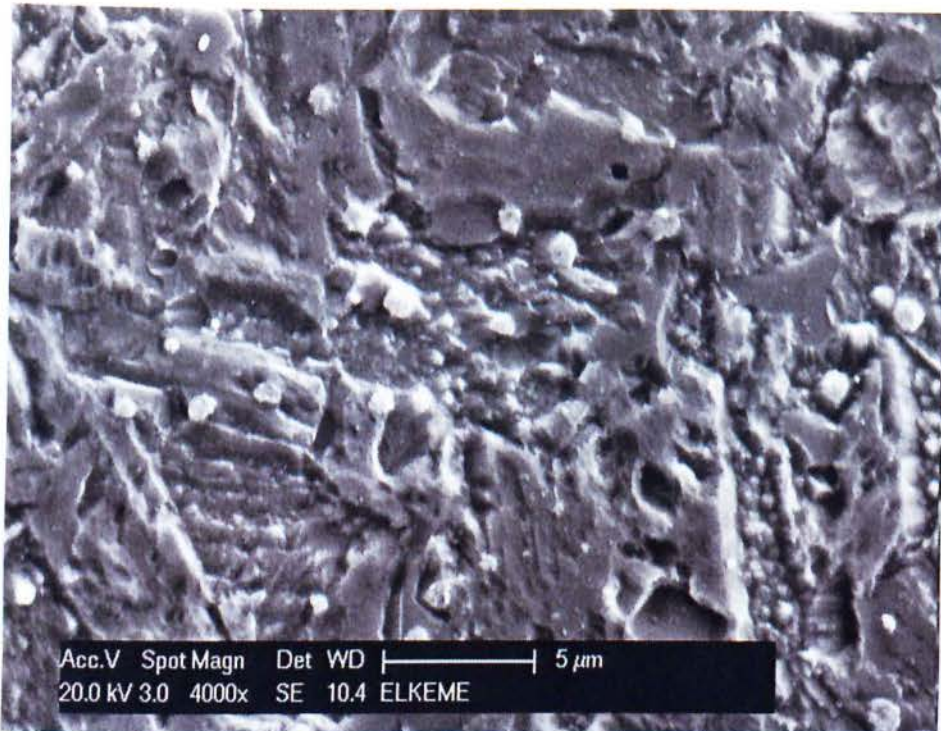
Σχήμα 4.28. Η μικροδομή για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβοσύστημα.



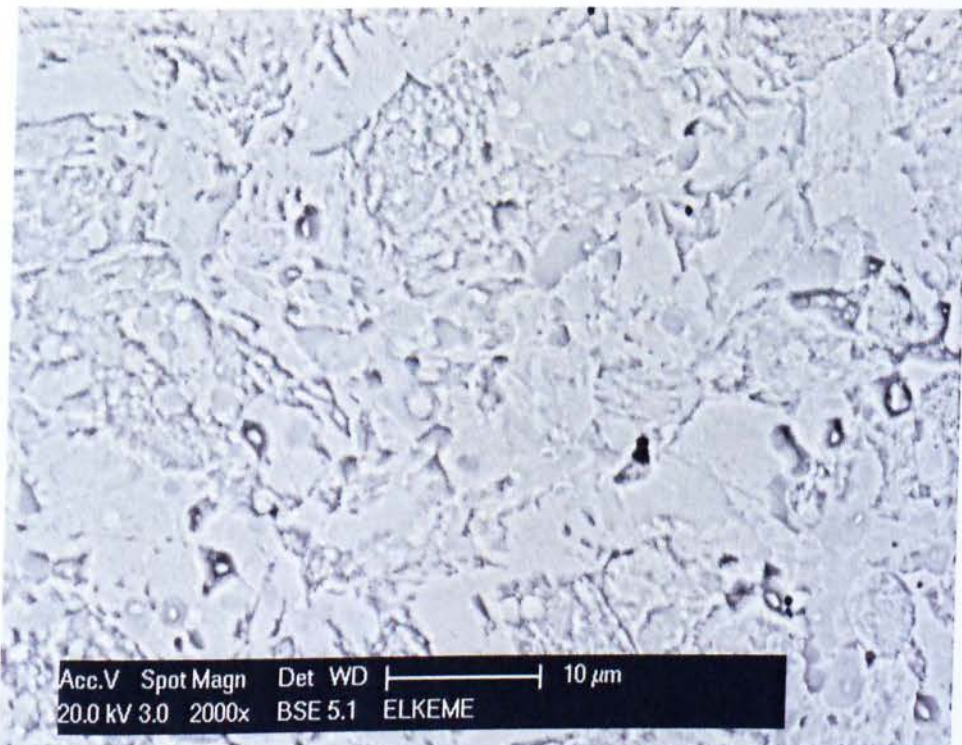
Σχήμα 4.29. Η μικροδομή για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβοσύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.28



Σχήμα 4.30. Η μικροδομή για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβοσύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.29



Σχήμα 4.31. Η μικροδομή για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβασύστημα. Λεπτομέρεια τις 4.30

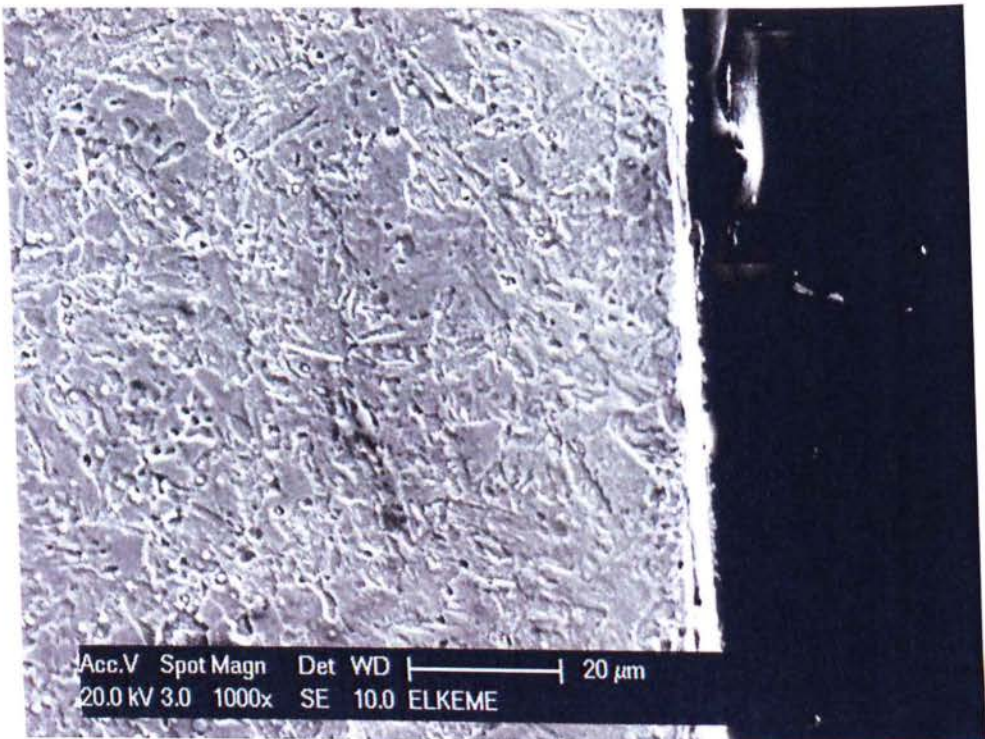


Σχήμα 4.32. Η μικροδομή για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο στην περιοχή που συμμετέχει σαν τριβασύστημα με τον backscatter αναλυτή..

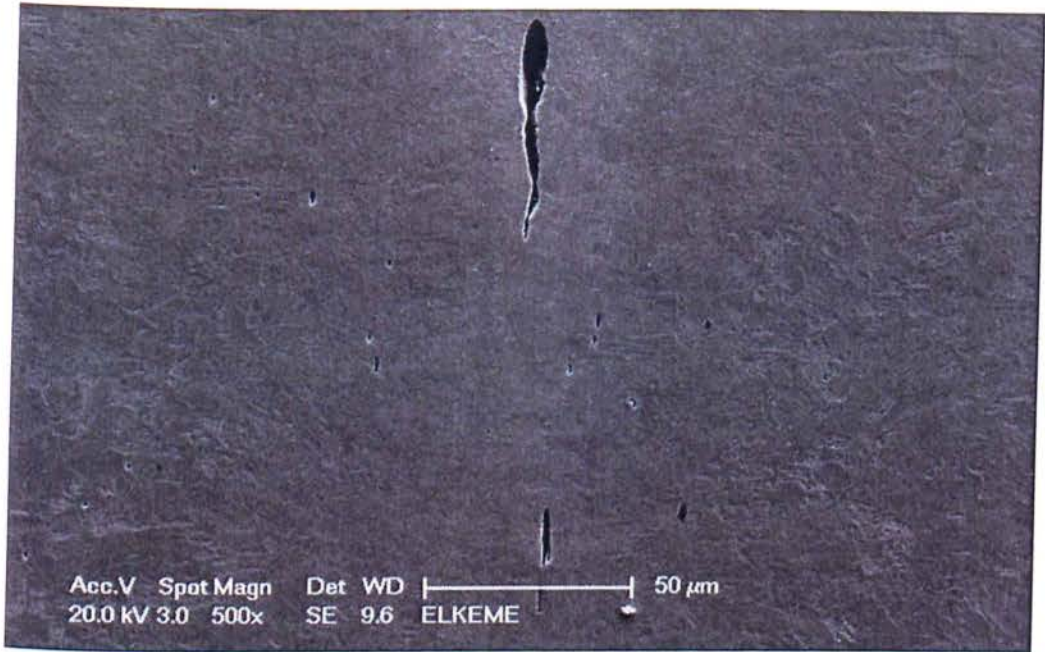
4.4.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΡΙΒΗΣ-ΦΘΟΡΑΣ.



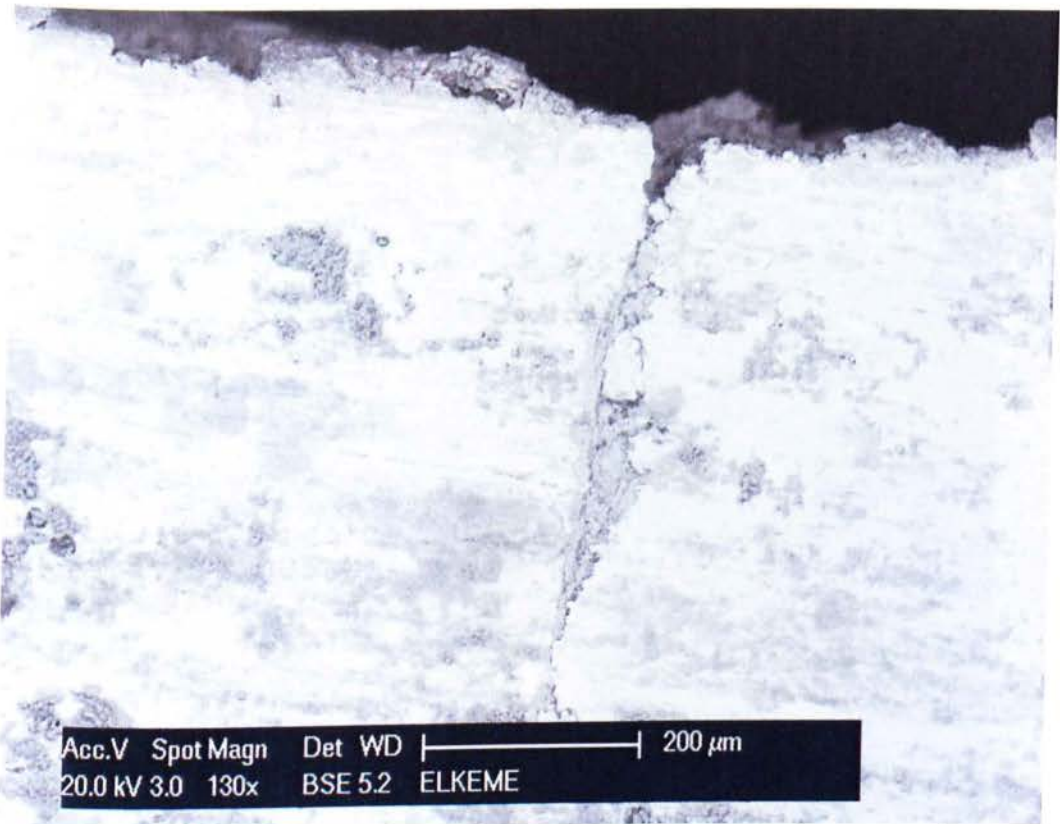
Σχήμα 4.33. Η άκρη της επιφάνειας τριβής του χρησιμοποιημένου δίσκου με το πέδιλο τριβής. Παρατηρείται διαφορά της μικροδομής από την ανάπτυξη της θερμοκρασίας.



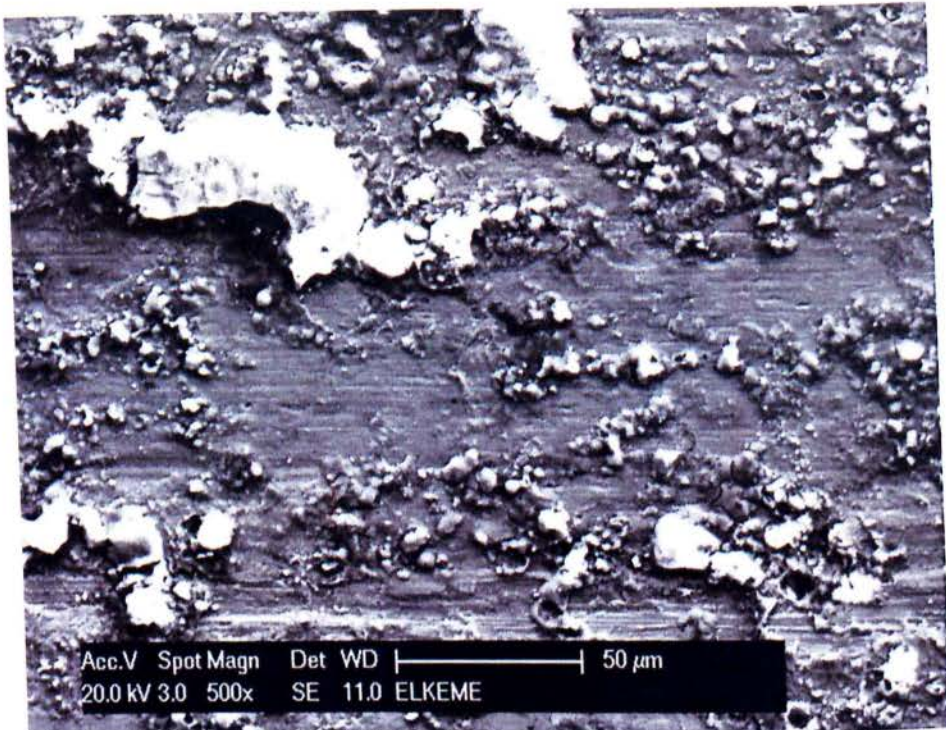
Σχήμα 4.34. Η άκρη της επιφάνειας τριβής του μη χρησιμοποιημένου δίσκου με το πέδιλο τριβής. Παρατηρείται η μικροδομή ανεπηρέαστη.



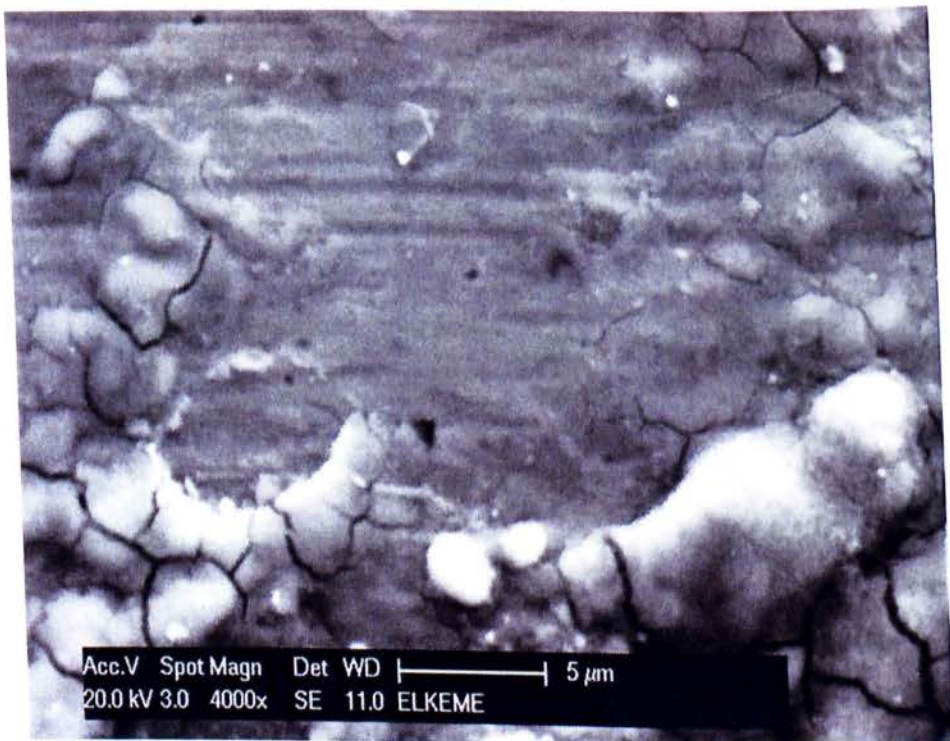
Σχήμα 4.35. Στην μέση του χρησιμοποιημένου δίσκου εγκλείσματα από την έλαση.



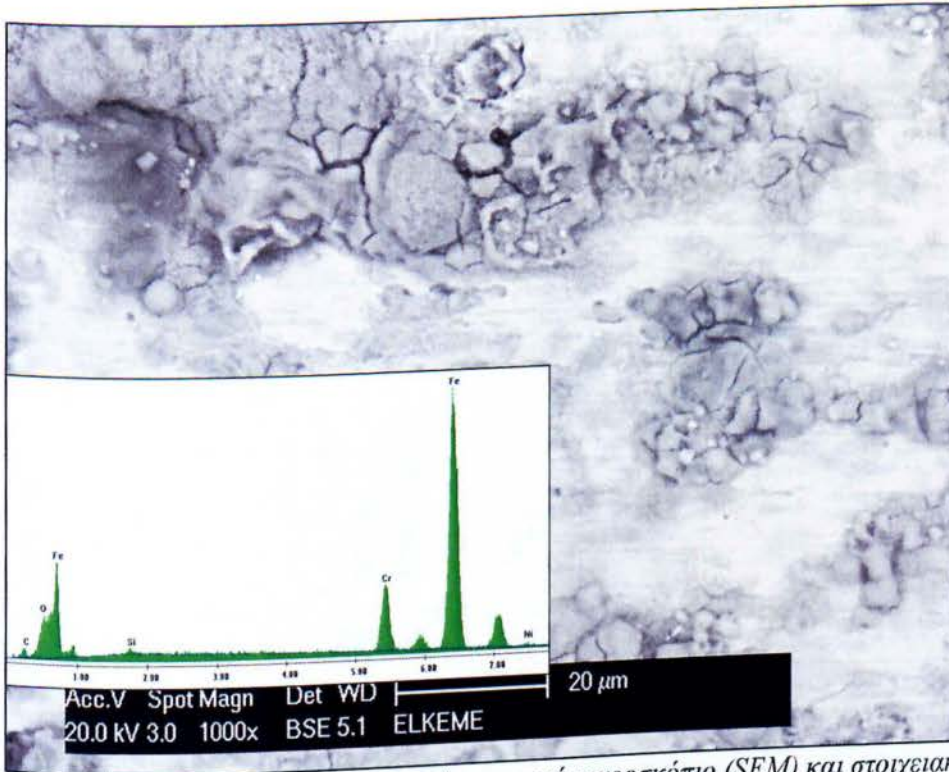
Σχήμα 4.36. Η επιφάνεια τριβής του χρησιμοποιημένου με τον Backscatter αναλυτή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM).



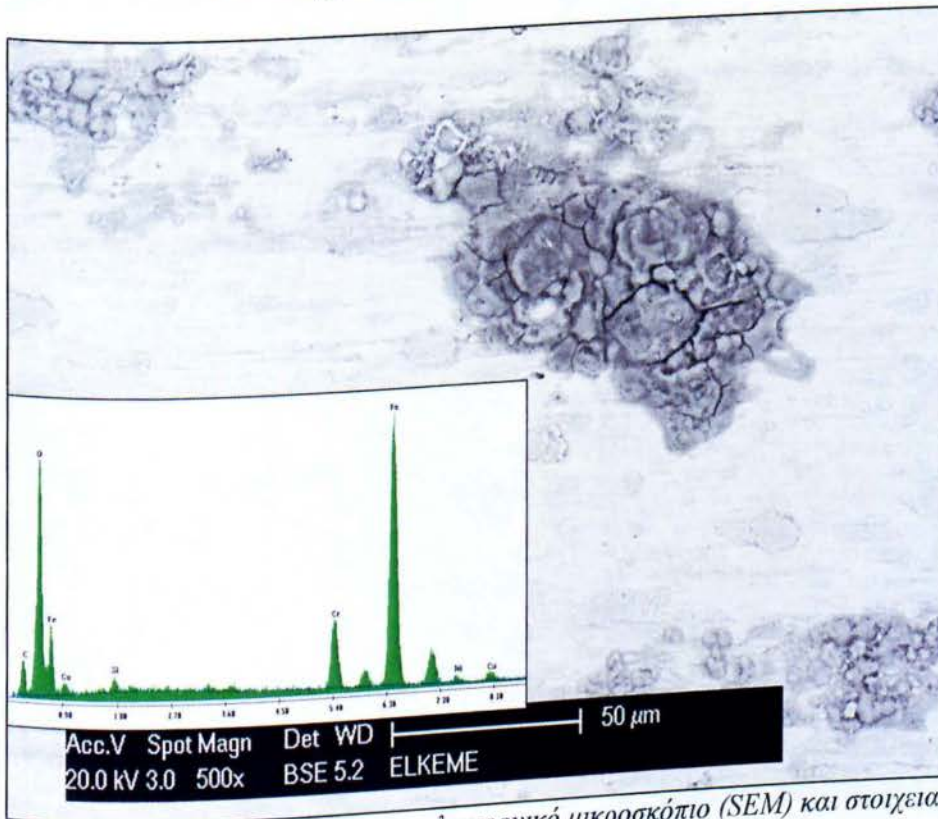
Σχήμα 4.37. Η επιφάνεια τριβής και ίχνη από το ανταγωνιστικό υλικό στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM).



Σχήμα 4.38. Η επιφάνεια τριβής και δείγματα περικρυσταλλικής διάβρωσης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM).

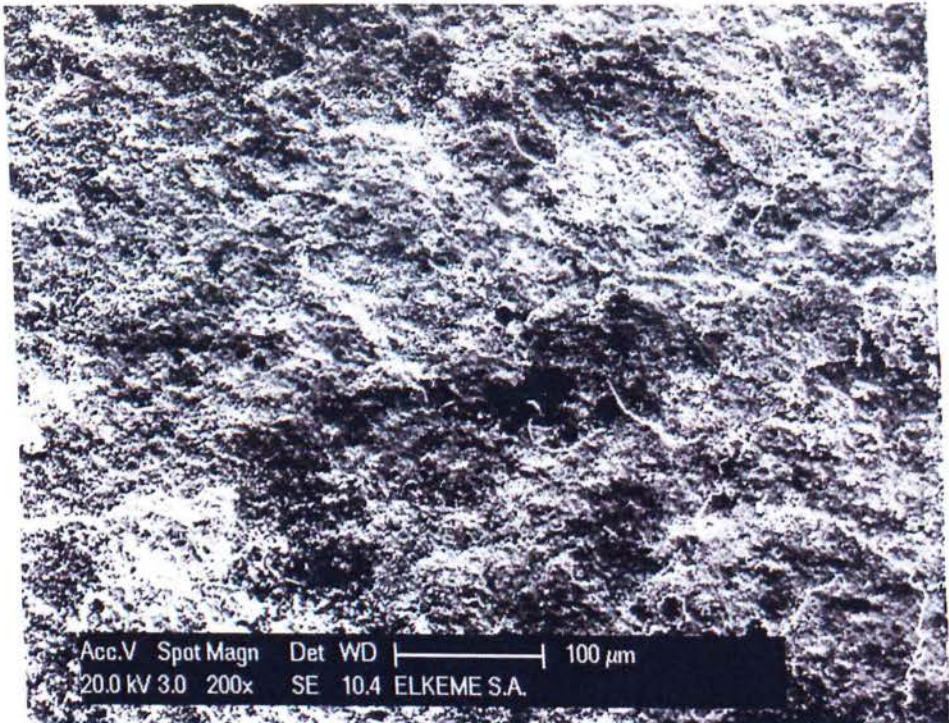


Σχήμα 4.39. Η επιφάνεια τριβής στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) και στοιχειακή ανάλυση με το EDAX. Λεπτομέρεια τις 4.19.

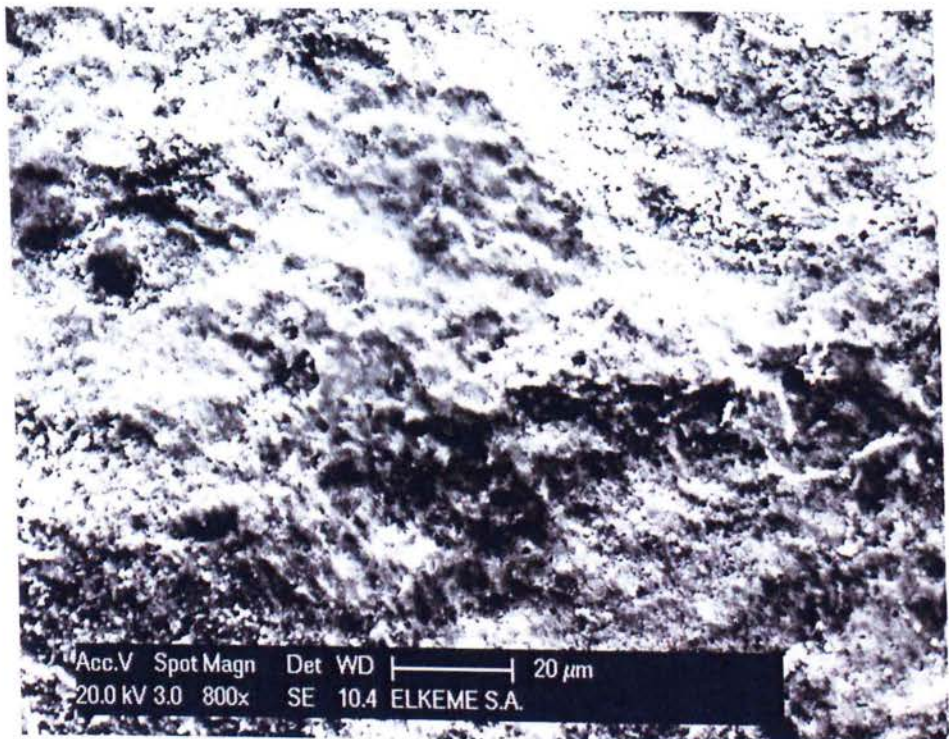


Σχήμα 4.40. Η επιφάνεια τριβής στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) και στοιχειακή ανάλυση με το EDAX.

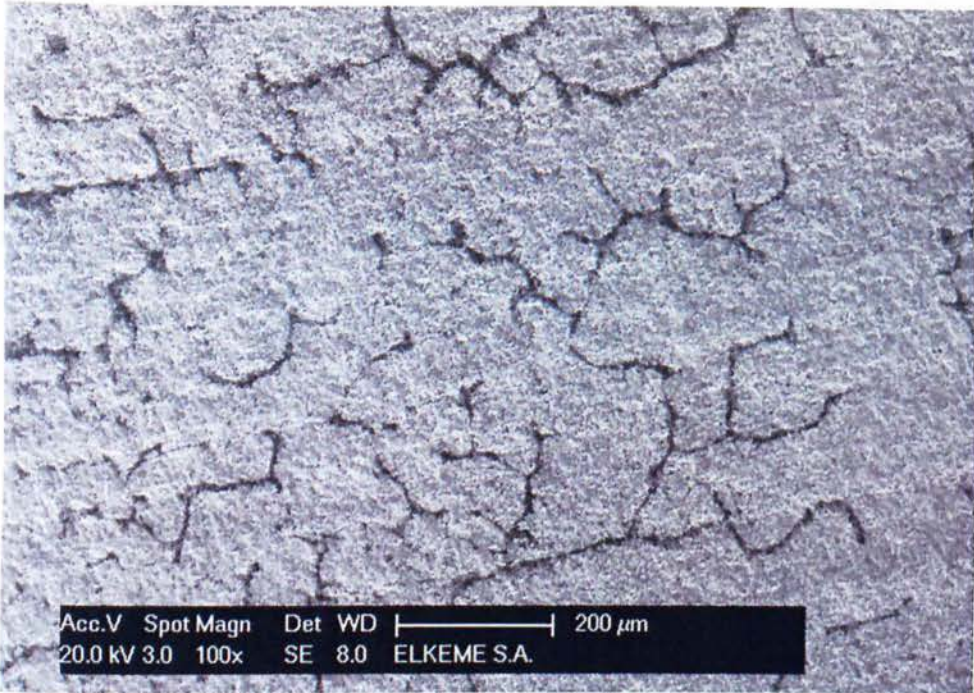
4.4.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΘΡΑΥΣΗΣ (FRACTURE SURFACE)



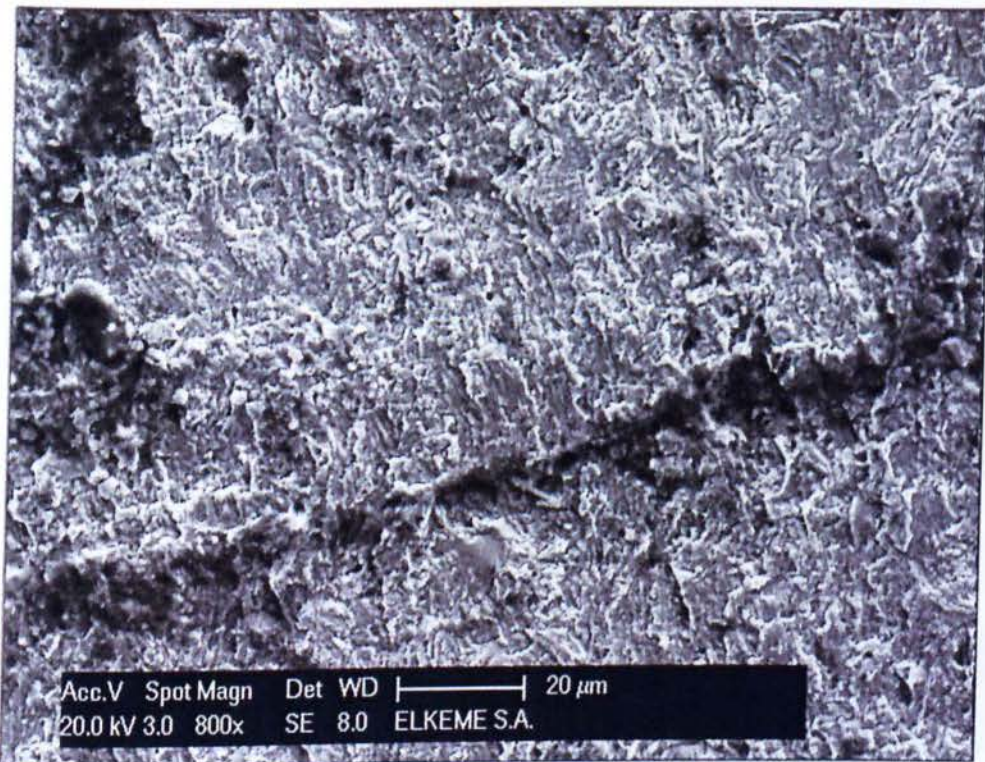
Σχήμα 4.41. Η επιφάνεια θράυσης.



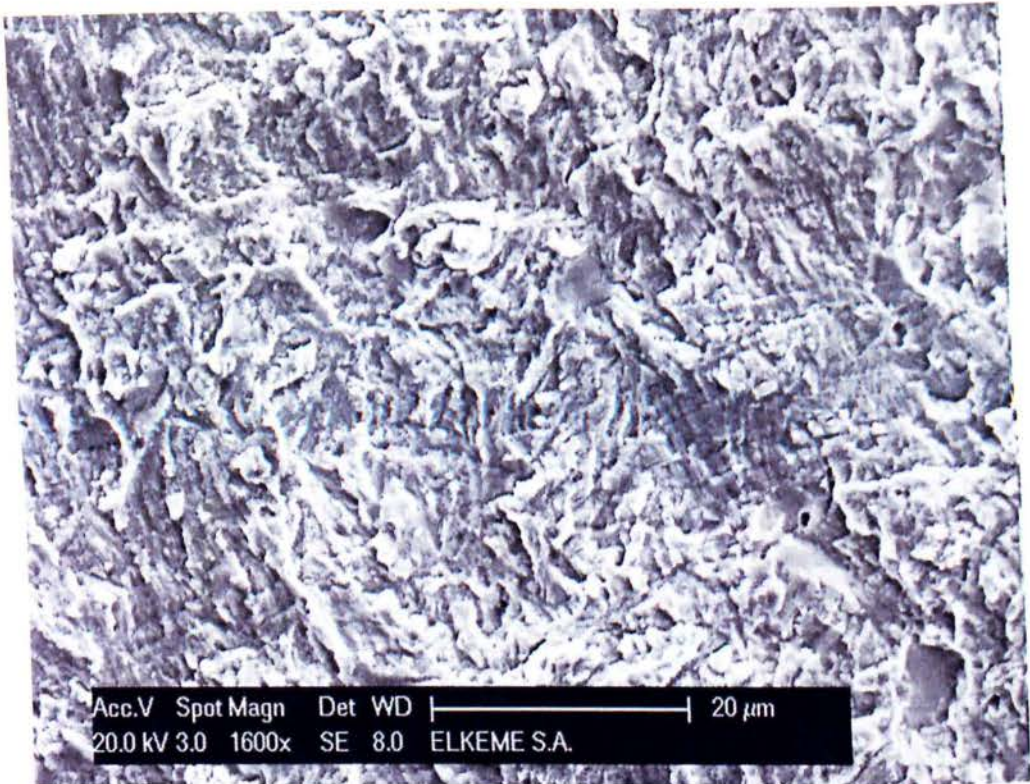
Σχήμα 4.42. Η επιφάνεια θράυσης. Στη Λεπτομέρεια τις 4.41



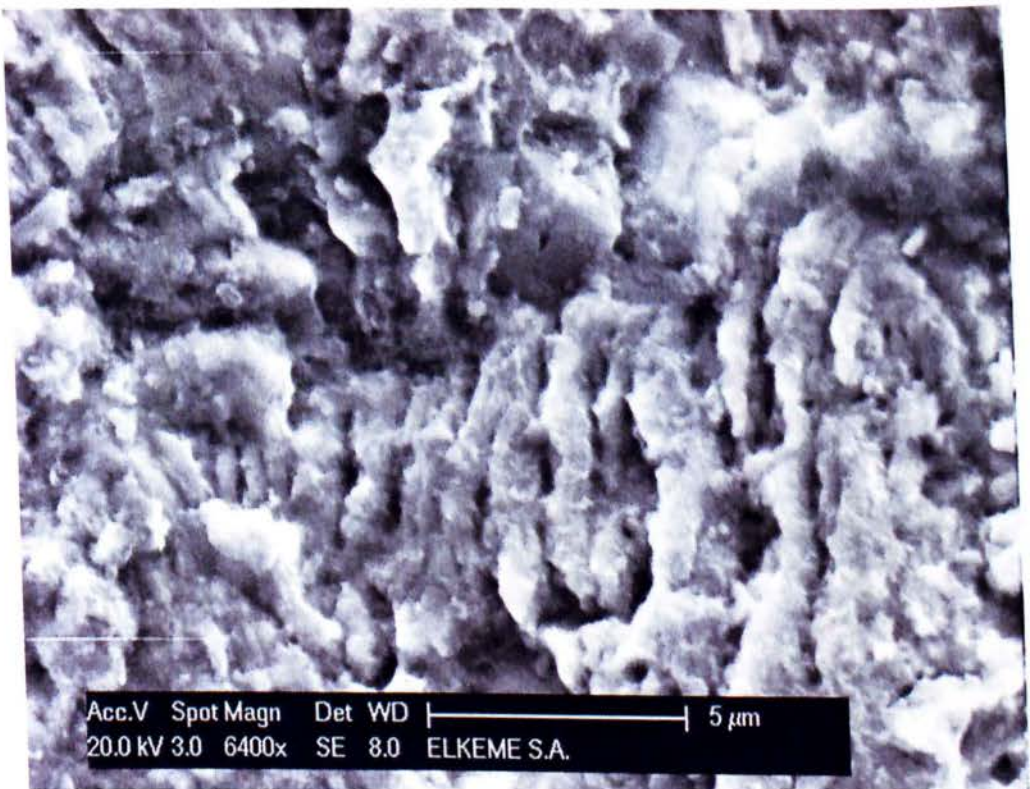
Σχήμα 4.43. Η περικρυσταλλικές ρωγμές (*intergranular fracture*).



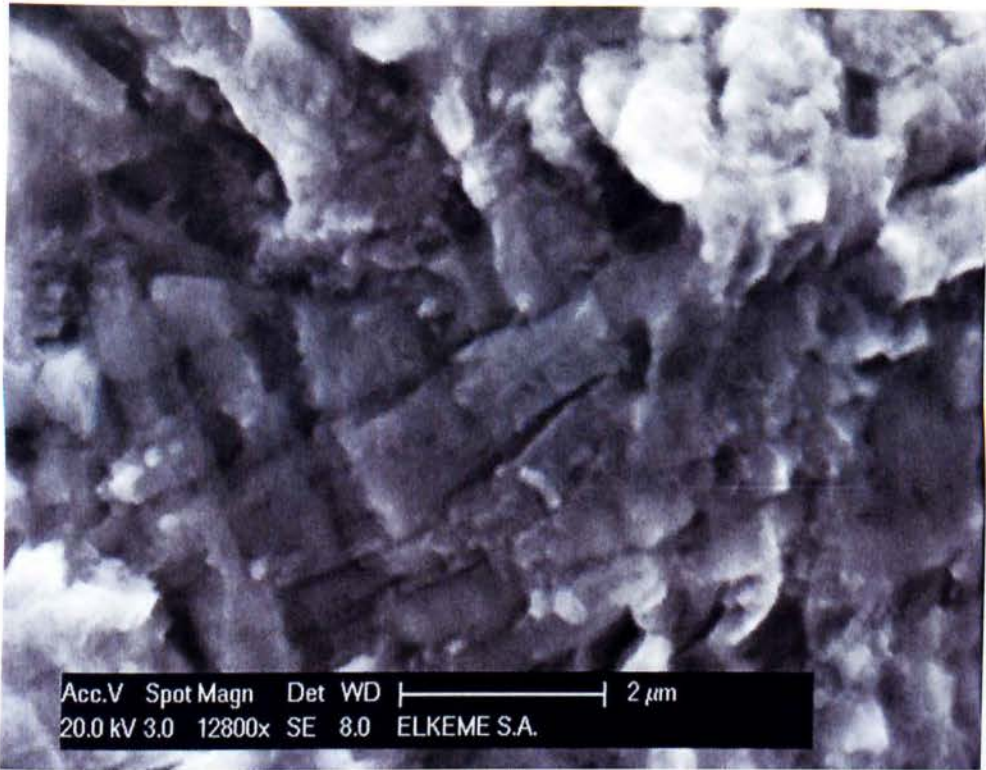
Σχήμα.4.44. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Λεπτομέρεια της 4.43



Σχήμα.4.45. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Λεπτομέρεια της 4.44



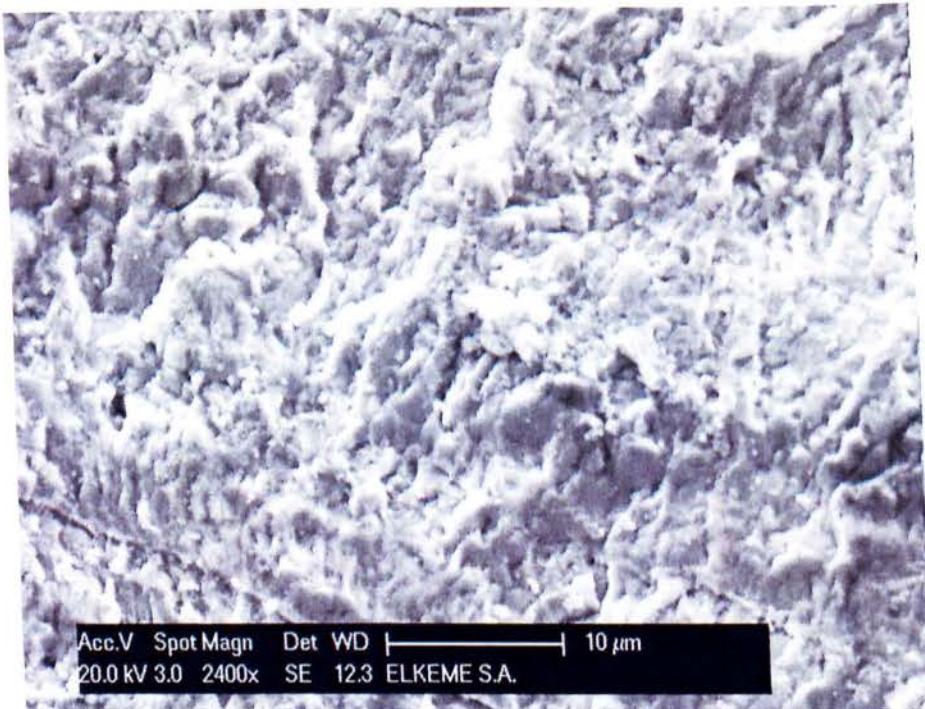
Σχήμα.4.46. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Λεπτομέρεια της 4.45



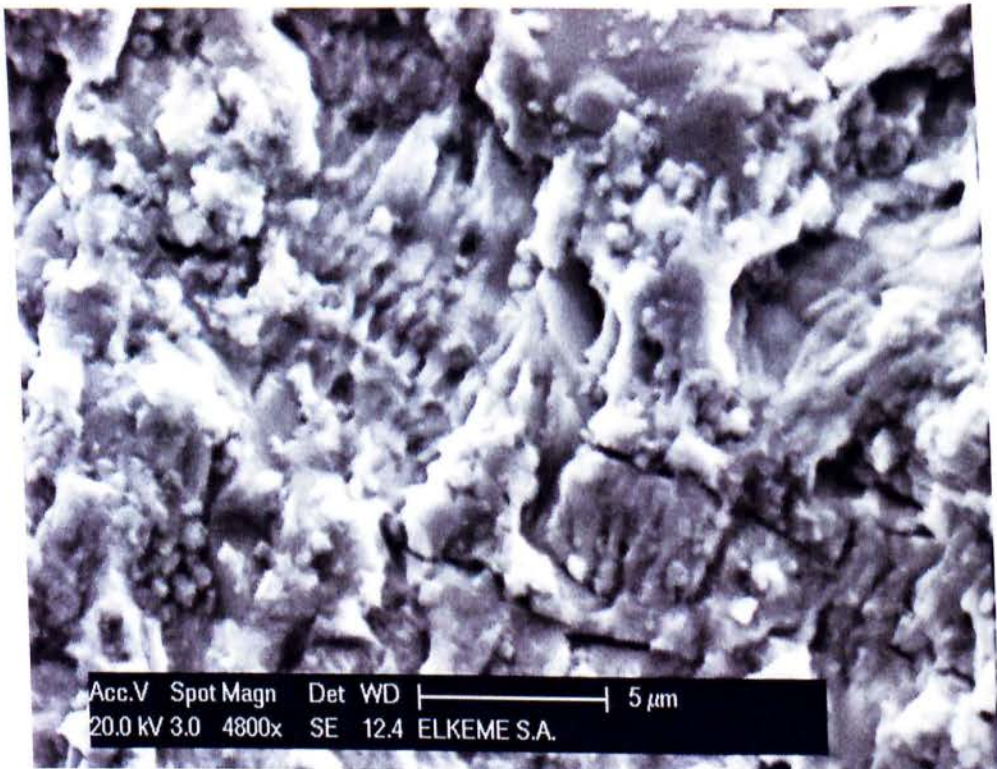
Σχήμα.4.47. Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Λεπτομέρεια της 4.46.



Σχήμα 4.48. Τα σημάδια της κόπωσης (Beach marks).

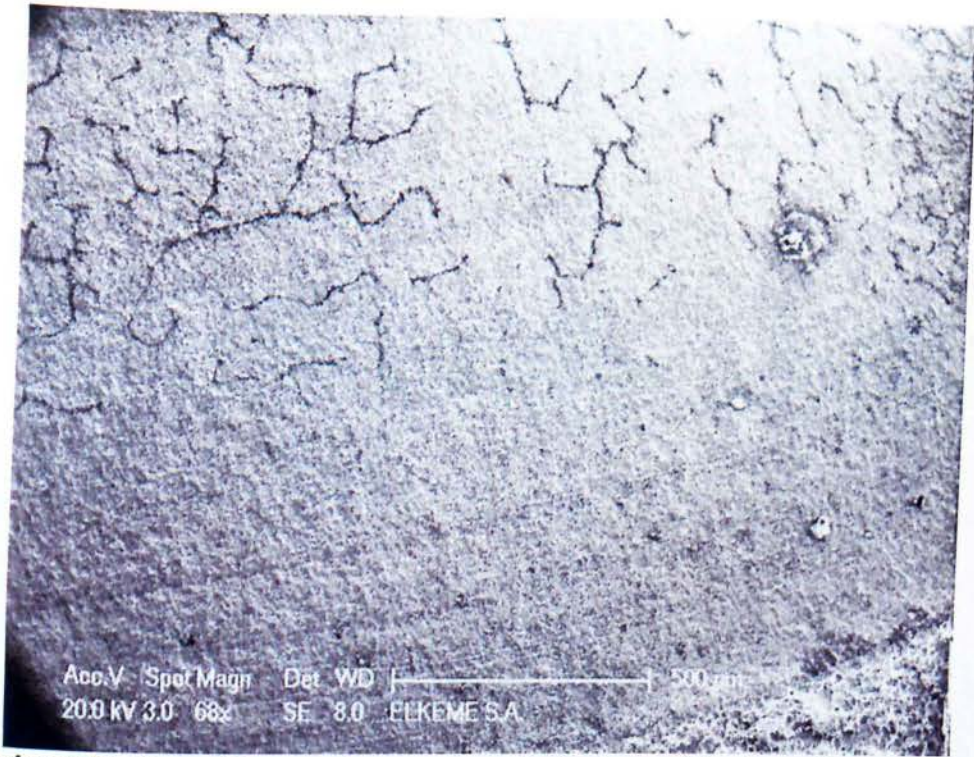


Σχήμα.4.49. Τα σημάδια κόπωσης για μεγαλύτερη μεγέθυνση. Λεπτομέρεια της 4.48.



Σχήμα 4.50. Τα σημάδια κόπωσης σε ακόμη μεγαλύτερη μεγέθυνση. Λεπτομέρεια της

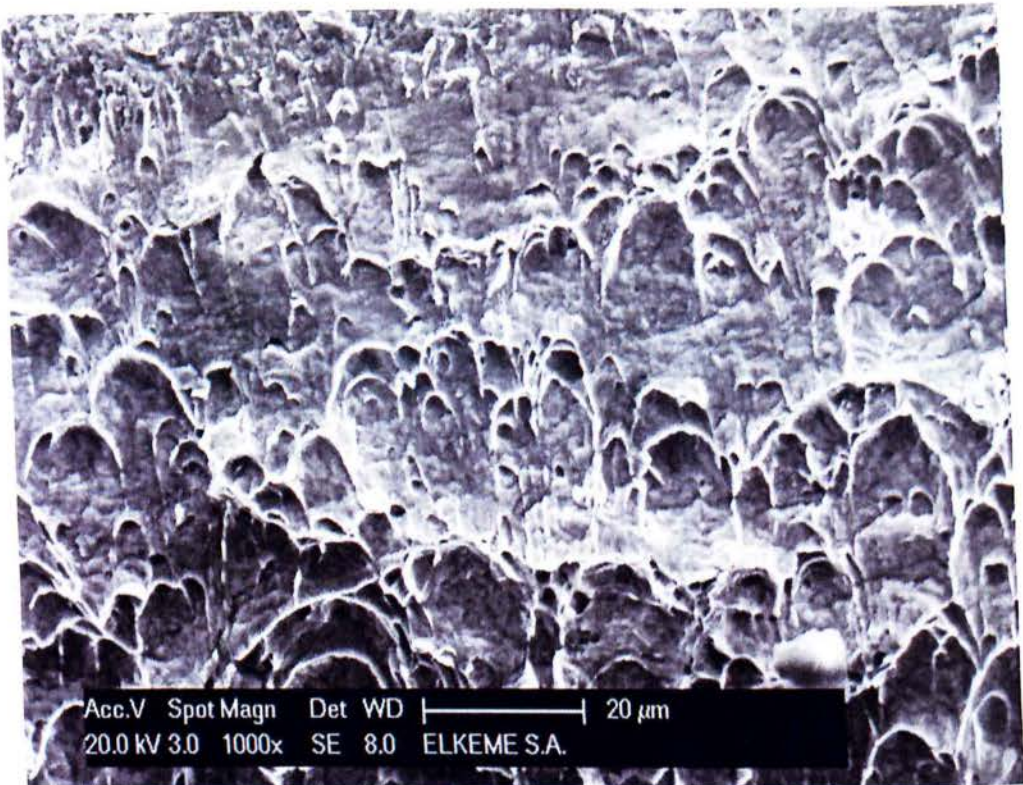
4.49



Σχήμα 4.51. Τα σημάδια της κόπωσης και η τελική φόρτιση. Στη Λεπτομέρεια φαίνεται η επιφάνεια όλκιμης θραύσης(ductile dimples) της τελικής φόρτισης.



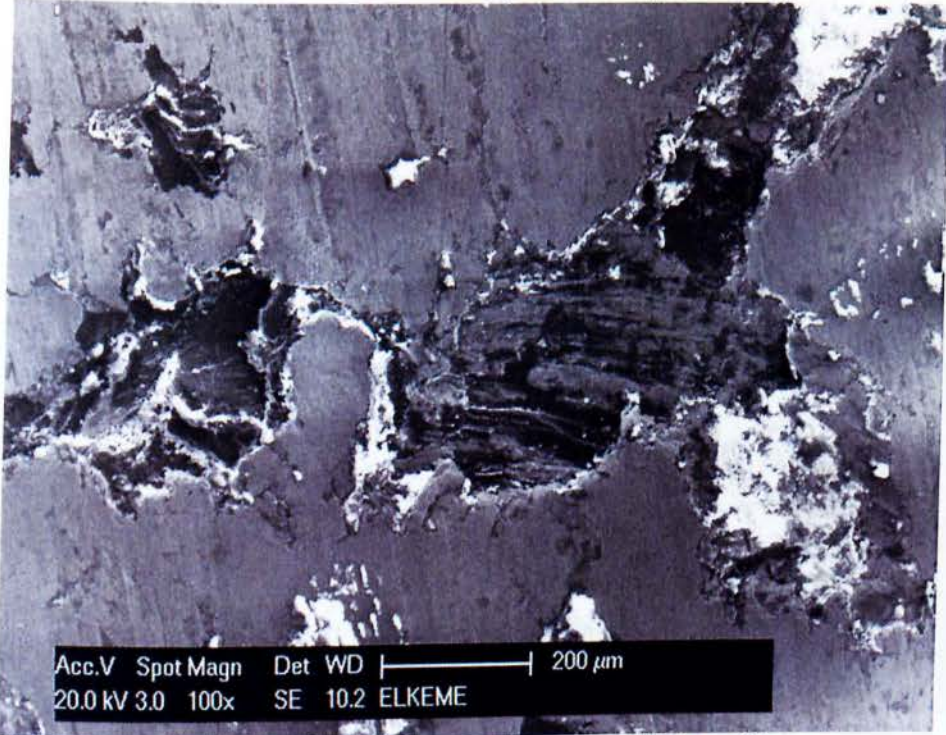
Σχήμα 4.52. Η επιφάνεια όλκιμης θραύσης(ductile dimples) της τελικής φόρτισης. Λεπτομέρεια της 4.51



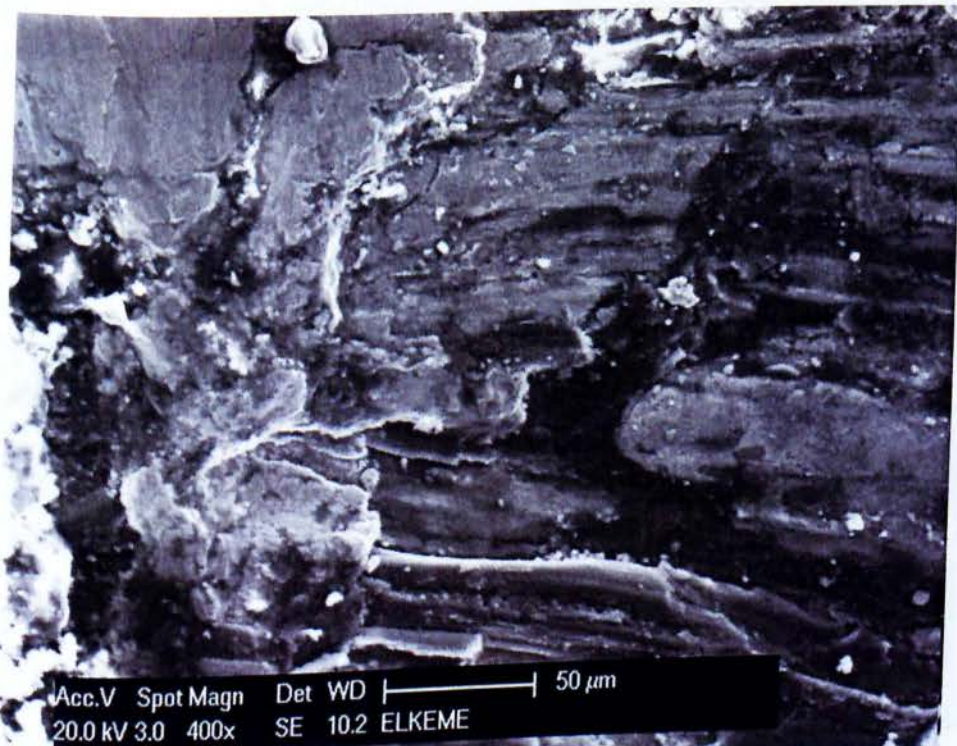
Σχήμα 4.53. επιφάνεια όλκιμης θραύσης (*ductile dimples*) της τελικής φόρτισης.

Λεπτομέρεια της 4.52

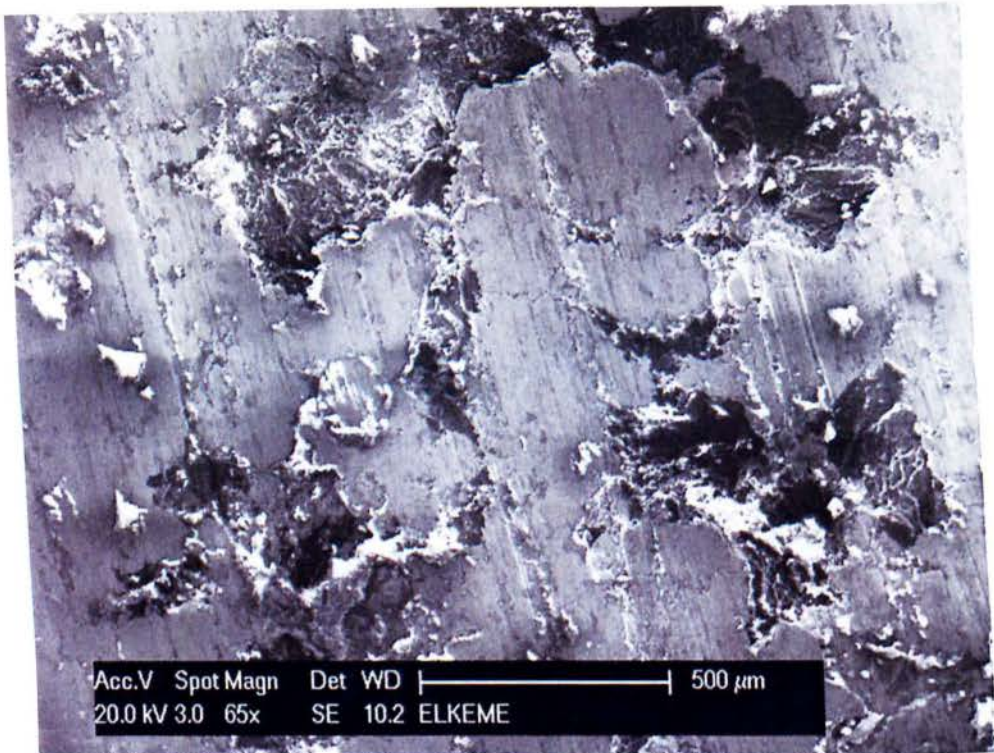
4.4.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΛΟΥ ΤΡΙΒΗΣ (BRAKE PAD)



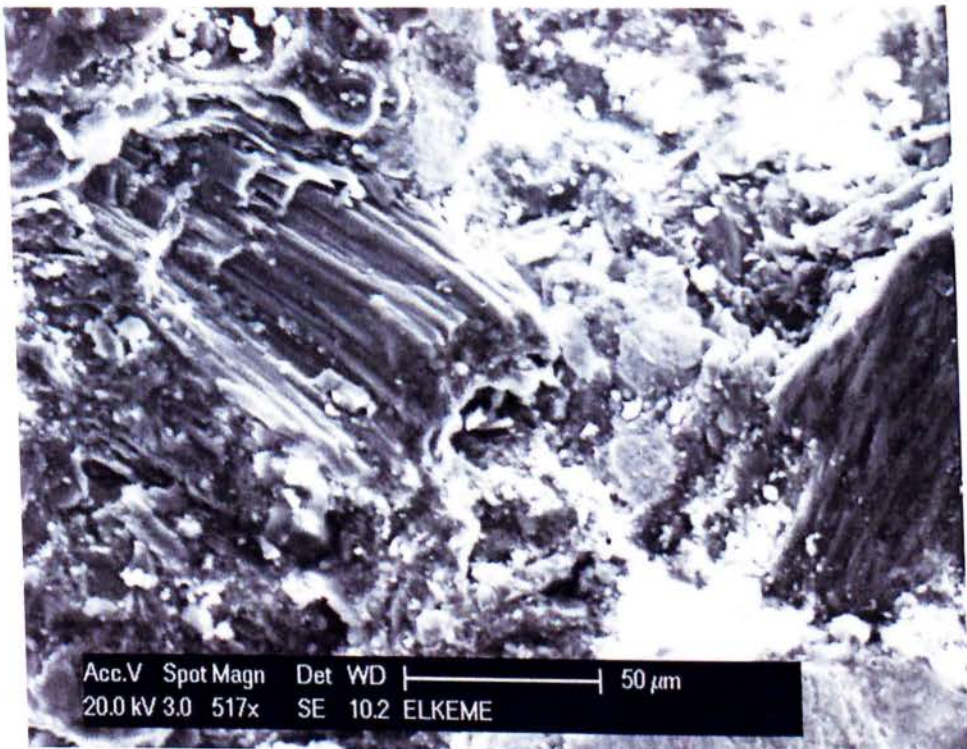
Σχήμα 4.54. Η επιφάνεια φθοράς για το πέδιλο τριβής.



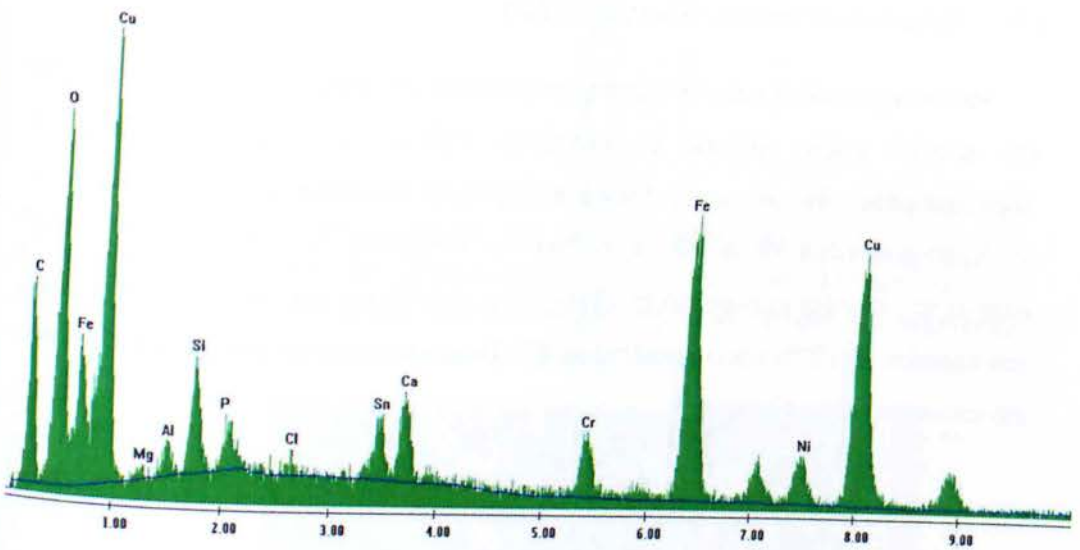
Σχήμα 4.55. Η επιφάνεια φθοράς για το πέδιλο τριβής. Λεπτομέρεια της 4.54



Σχήμα 4.56. Η επιφάνεια φθοράς για το πέδιλο τριβής.



Σχήμα 4.57. Η επιφάνεια φθοράς για το πέδιλο τριβής Λεπτομέρεια της 4.56



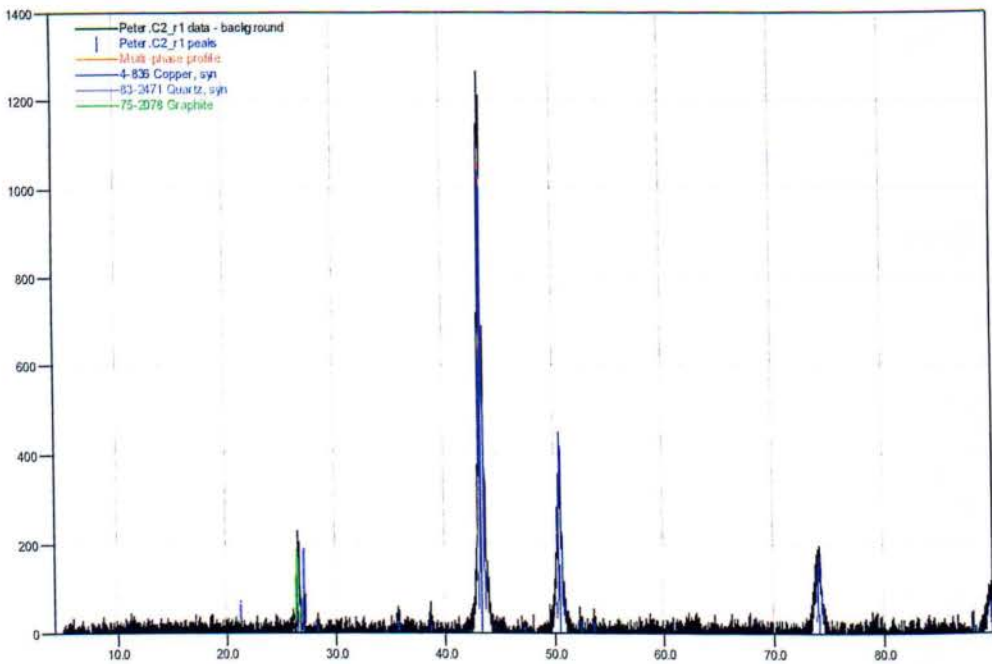
Σχήμα 4.58. Η στοιχειακή ανάλυση (EDAX) στην επιφάνεια φθοράς για το πέδιλο τριβής.

Πίνακας 4.3. : Τα στοιχεία κ.β. και κ.α. από το EDAX

Στοιχείο	κ.β. %	κ.α. %
C	18.800	41.660
O	16.020	26.980
Mg	0.480	0.540
Al	0.870	0.870
Si	2.290	2.200
P	0.860	0.750
Cl	0.310	0.230
Sn	3.970	0.900
Ca	1.370	0.920
Cr	2.710	1.410
Fe	16.650	8.200
Ni	4.670	2.150
Cu	31.000	13.190

4.5 ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (XRD)

Με την κρυσταλλογραφική παρατήρηση ακτίνων X για δείγμα από την επιφάνεια του πέδιλου τριβής λάβαμε το παραπάνω σχήμα. Το σχήμα 4.59 είναι το ακτινοδιάγραμμα έτσι όπως μας έδωσε το λογισμικό του περιθλασιομέτρου ακτίνων X. Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο αυτή για την ανίχνευση των φάσεων. Ο χαλκός κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό στο διάγραμμα με 63% και στην συνέχεια το οξείδιο του πυριτίου έχει 22% και ο γραφίτης με 8%. Οι φάσεις όπου ανιχνεύτηκαν φαίνονται πιο αναλυτικά στον πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.59. Το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων X για το πέδιλο τριβής.

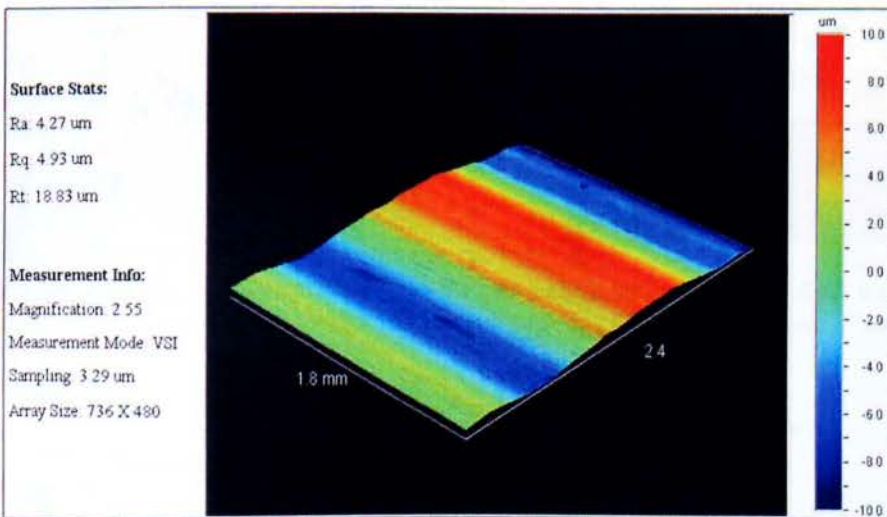
Πίνακας 4.4 : Τα στοιχεία κ.β. για το πέδιλο τριβής.

	Cu	Si-O ₂	C
Πέδιλο τριβής	63%	22%	8%

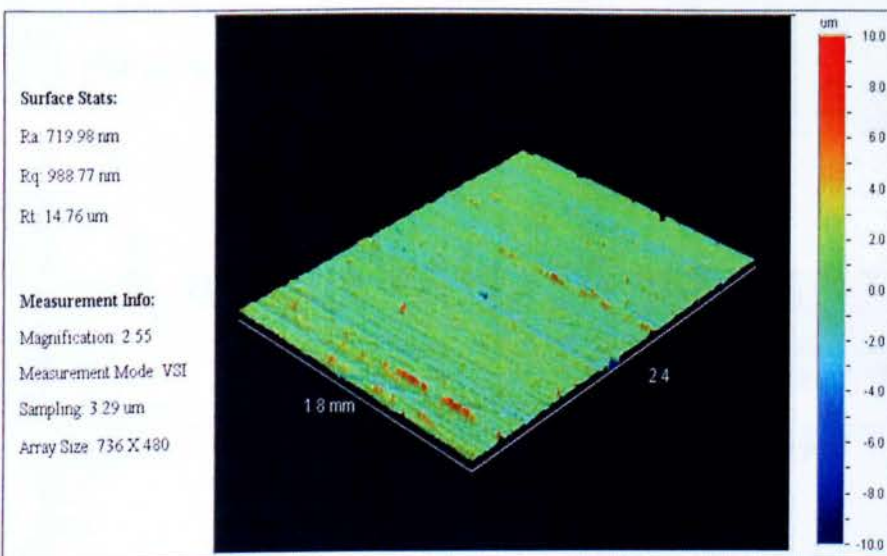
4.6 ΟΠΤΙΚΗ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΙΑ

4.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΤΡΙΒΗΣ.

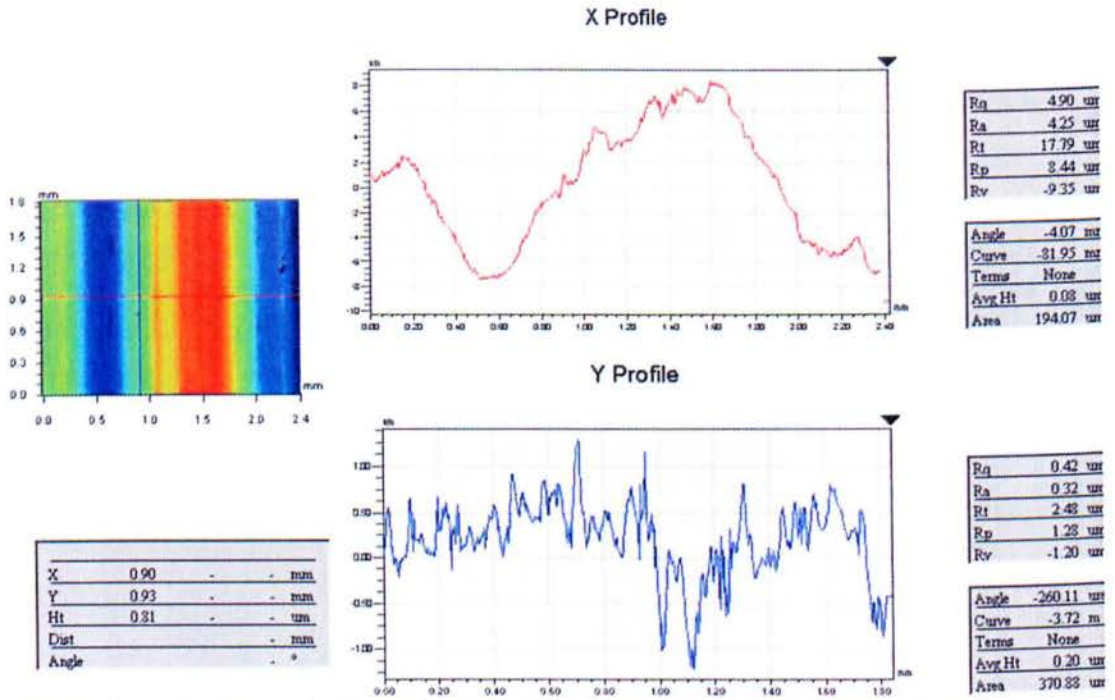
Για την παρατήρηση της επιφάνειας τριβής και την εύρεση των χαρακτηριστικών των επιφανειών για τον μεταχειρισμένο δίσκο πέδησης και το καινούργιο έγινε χρήση του προφιλόμετρο. Έπειτα από παρατήρηση για ένα αντιπροσωπευτικό σημείο φθοράς των δίσκων πέδησης έγινε επιλογή των παρακάτω εικόνων όπου μας έδωσε το λογισμικό του προφιλόμετρο.



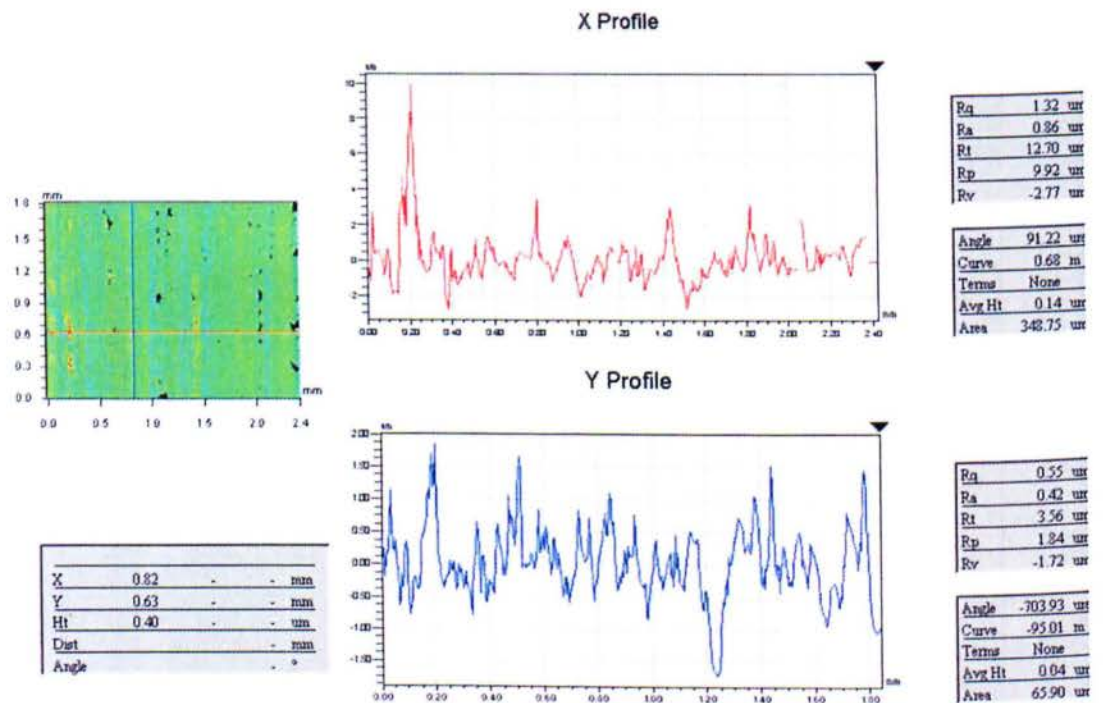
Σχήμα 4.60. Η κατανομή της τραχύτητας σε τρεις διαστάσεις χρησιμοποιημένο δίσκο πέδησης.



Σχήμα 4.61. Η κατανομή της τραχύτητας για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο πέδησης.



Σχήμα 4.62. Η κατανομή της τραχύτητας για δυο διαστάσει, για τον χρησιμοποιημένο δίσκο πέδησης.



Σχήμα 4.63. Η κατανομή της τραχύτητας για δυο διαστάσει, για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο πέδησης.

Statistics:

tp1: 0.0 %

tp2: 100.0 %

Htp: 18.83 μm

Mr1: 2.24 %

Mr2: 96.78 %

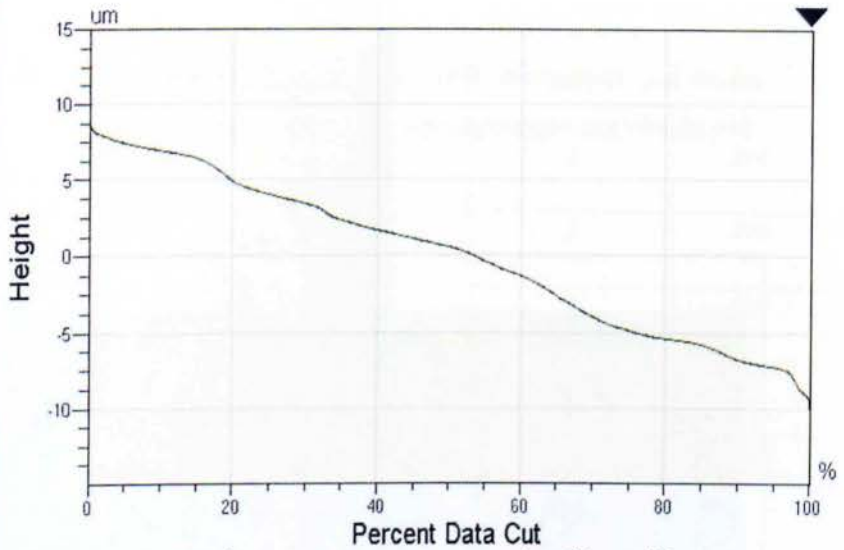
RK: 15335.06 nm

Rpk: 482.72 nm

Rvk: 1994.91 nm

V1: 5.41 nm

V2: 32.10 nm

Ra: 4.27 μm Rq: 4.93 μm Rz: 18.46 μm **Bearing Ratio**

Σχήμα 4.64. Η καμπύλη φέρουσας επιφάνεια για τον χρησιμοποιημένο δίσκο πέδησης.

Statistics:

tp1: 0.0 %

tp2: 100.0 %

Htp: 14.76 μm

Mr1: 9.81 %

Mr2: 92.02 %

RK: 2241.16 nm

Rpk: 1640.03 nm

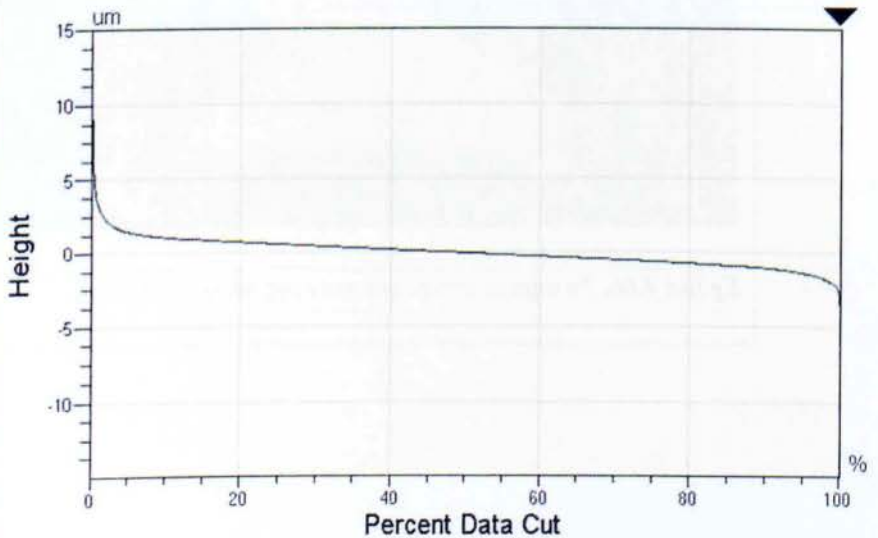
Rvk: 865.32 nm

V1: 80.41 nm

V2: 34.52 nm

Ra: 719.98 nm

Rq: 988.77 nm

Rz: 14.29 μm **Bearing Ratio**

Σχήμα 4.65. Η καμπύλη φέρουσας επιφάνεια για τον μη χρησιμοποιημένο δίσκο πέδησης.

4.7 Η ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΟ.

Για να ερμηνεύσουμε τη μεταλλουργική κατεργασία όπου έχουν υποστεί τα υλικά μας, πραγματοποιήθηκε μικροσκληρομέτρηση κατά το ακτινικό μήκος και των δύο υλικών και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα.

Πίνακας 4.5 : Οι τιμές των σκληρομετρήσεων.	
<i>Χρησιμοποιημένος δίσκος</i>	
<i>A/A</i>	<i>HV</i>
<i>1</i>	<i>408</i>
<i>2</i>	<i>405</i>
<i>3</i>	<i>430</i>
<i>4</i>	<i>417</i>
<i>5</i>	<i>369</i>
<i>6</i>	<i>317</i>
<i>7</i>	<i>279</i>
<i>8</i>	<i>304</i>



Σχήμα 4.66. Τα σημεία των μετρήσεων της σκληρομέτρησης.



Πίνακας 4.6 : Οι τιμές των σκληρομετρήσεων.

Μη χρησιμοποιημένος Δίσκος

A/A	HV
1	394
2	394
3	389
4	405
5	395
6	323
7	320
8	300

Σχήμα 4.67. Τα σημεία των μετρήσεων της σκληρομέτρησης.

Μικροσκληρομέτρηση έγινε για το πέδιλο τριβής στο υλικό τριβής και τον χάλυβα όπου ανήκουν σε αυτό. Οι τιμές της σκληρομέτρησης ήταν 90 HV για το υλικό τριβής και ~115HV για τον χάλυβα.

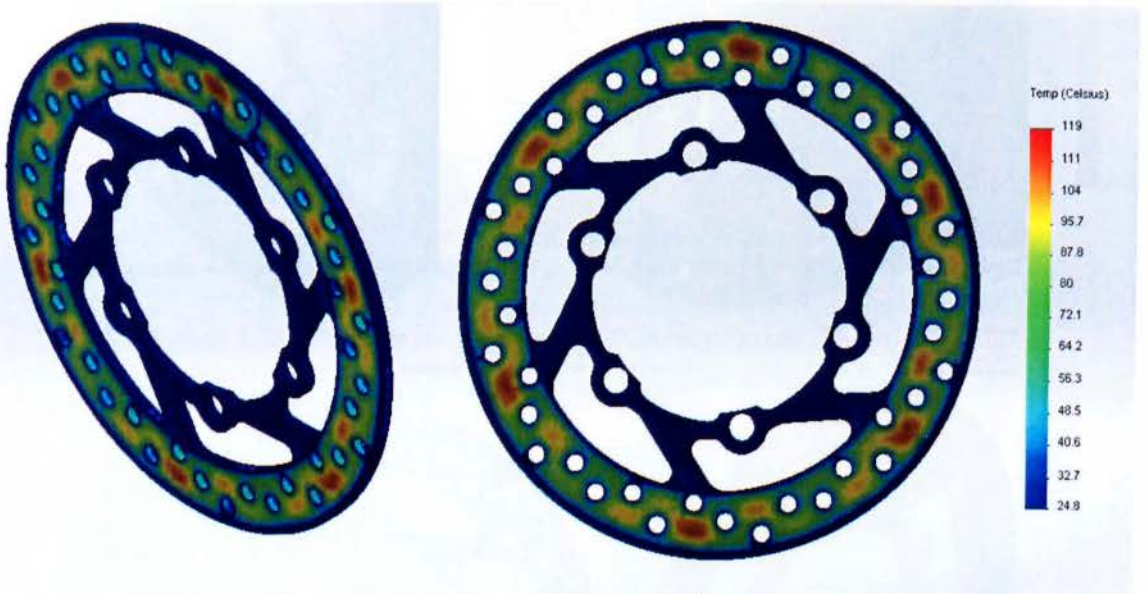
4.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEM)

Για την ανάλυση με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων έγιναν υπολογισμοί όπου φαίνονται αναλυτικά όπως και τα δεδομένα μας στον πίνακα 4.7. Στα αποτελέσματα στις επόμενες σελίδες φαίνονται το μοντέλο με την κατανομή θερμοκρασιών της πέδησης, τις τάσεις και τις μετατοπίσεις. Παραδοχή ήταν ότι δεν δέχεται μόνο 25 bar πίεση αλλά πιο μεγάλη τιμή. Για την κατανομή των θερμοκρασιών και τα φαινόμενα όπου είχαμε οι τιμές του μοντέλου επαληθεύτηκαν από τους υπολογισμούς στον πίνακα σύμφωνα με τις αρχές μετάδοσης της θερμότητας[22].

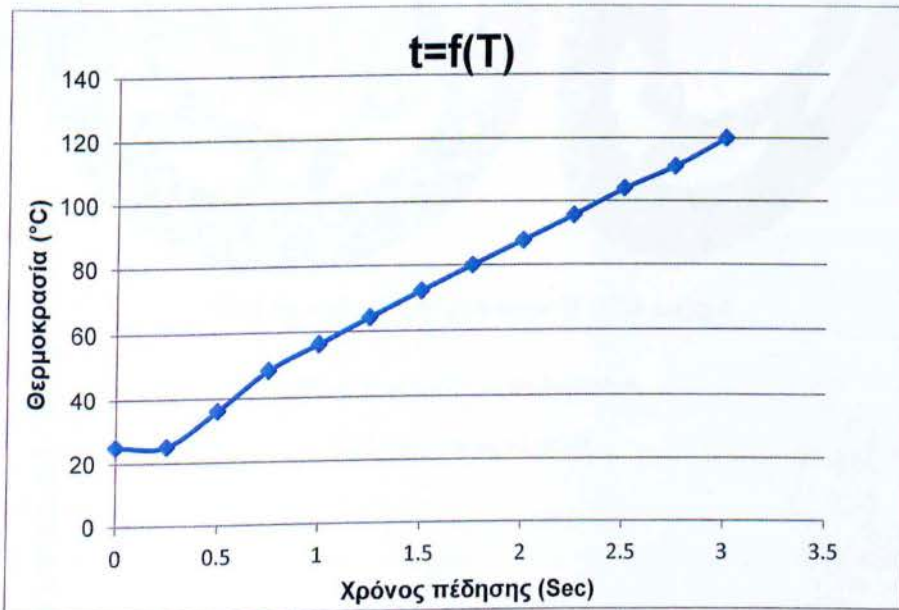
Πίνακας 4.7 : Δεδομένα και υπολογισμοί για την ανάλυση.

Μάζα μοτοσυκλέτας m (Kg)	275.00
Ταχύτητα μοτοσυκλέτας u (m/sec)	22.00
μ (άσφαλτο – γόμας ελαστικού)	0.72
Επιτάχυνση της βαρύτητας g (m/sec ²)	9.81
Τριβή $F_f = \mu * m * g$ (N)	1942.38
Επιβράδυνση $a_x = (F_f / m)$ (m/sec ²)	7.06
Χρόνος πέδησης $t = (u_x / a_x)$	3.11
Θερμική συναγωγιμότητα $Q_{convection}$ W/m ²	90.00
Θερμοκρασία αέρα T_{air} (°C)	25.00
Κινητική ενέργεια $KE = (1/2) * m * u^2$ (Joule)	66550.00
Θερμική ενέργεια = $(KE / \Delta t)$ (W)	21366.18
Κατανομή πέδησης 60% πίσω	0.60
Αριθμός αναλίσκόμενων στοιχείων	2
$HP_{one} = ((\text{Θερμική ενέργεια}) * 0.6/2)$	6.41
Μάζα δίσκου πέδησης m(Kg)	1.1

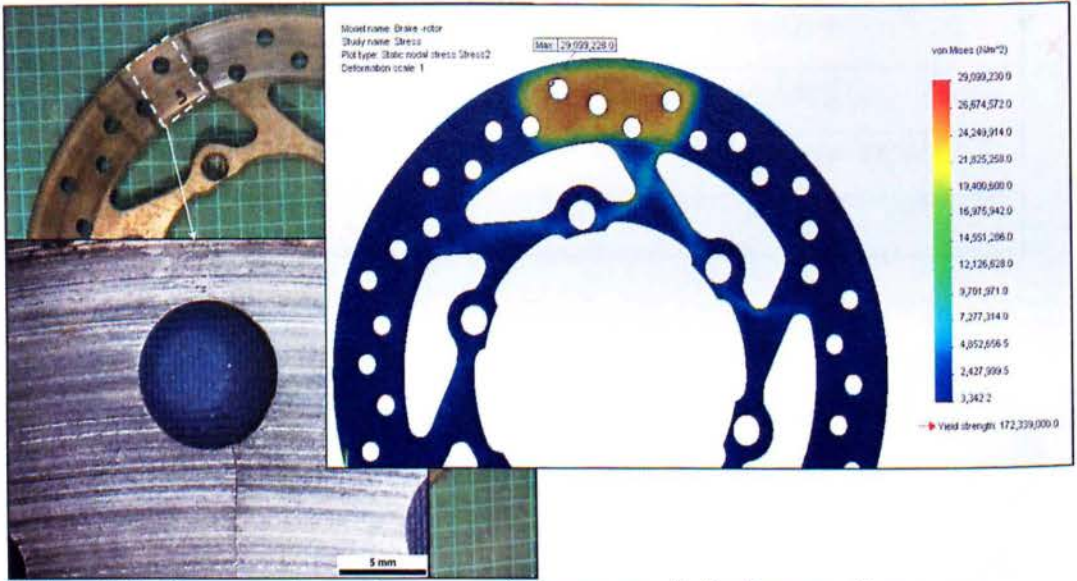
CP (J/kg/K)	418
$Q=m C_p \Delta t$	
$\Delta T=Q/(mC_p)$ (°C)	144
Tmax (°C)	119



Σχήμα 4.68. Η κατανομή της θερμοκρασίας για το δίσκο πέδησης.



Σχήμα 4.69. Η θερμοκρασιακή ανάπτυξη για χρόνο πέδησης 3 sec.



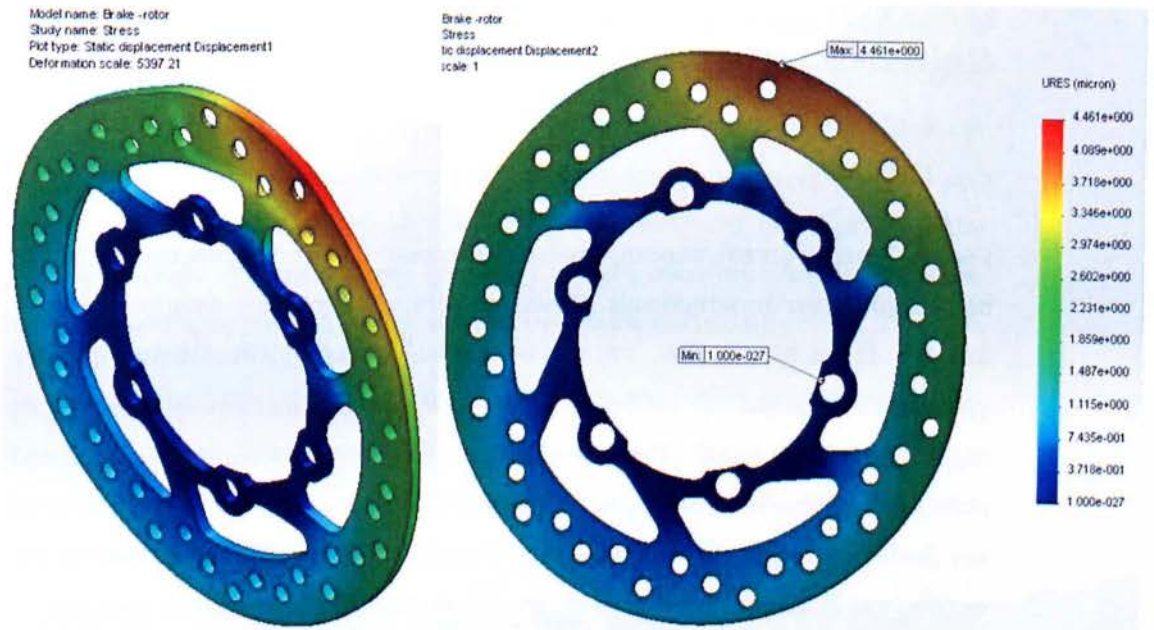
Σχήμα 4.70. Η κατανομή των τάσεων σε σχέση με το σημείο θραύσης του δίσκου μας.



Σχήμα 4.71. Η κατανομή των τάσεων σε N/m^2 .

Αριστερά σε μεγέθυνση X 5400.

Δεξιά σε μεγέθυνση X1.



Σχήμα 4.32. Η μετατόπιση για τον δίσκο πέδησης σε μικρά (10^{-6} m).

Αριστερά σε μεγέθυνση X 5400.

Δεξιά σε μεγέθυνση X1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

5.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.

Για την μακροσκοπική παρατήρηση του φθαρμένου δίσκου χρησιμοποιήσαμε το στερεοσκόπιο και παρατηρήσαμε ρωγμές σε τρεις (3) οπές όπου απέχουν πιο πολύ από τον άξονα περιστροφής του δίσκου και πιο συγκεκριμένα 110mm. Οι οπές χρησιμοποιούνται για την καλύτερη ψύξη του υλικού μας από την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία λόγω τριβής. Έτσι η απαγωγή της θερμότητας γίνεται πιο γρήγορα από ότι αν ήταν συμπαγές το υλικό μας. Οι ρωγμές ξεκίνησαν από το εσωτερικό των οπών και διαδίδονται προς το εσωτερικό του δίσκου ακολουθώντας τη διεύθυνση της ακτίνας του. Η φθορά για το δίσκο πέδησης ήταν 200μm από την πλευρά όπου έχει το έμβολο και 100μm από την άλλη που αντιτίθεται στην πίεση.

Η μελέτη των επιφανειών θραύσης (θραυστογραφία) στο επίπεδο των ρωγμών έδειξε σημάδια κόπωσης και πιο συγκεκριμένα ήταν ορατοί και οι κύκλοι των φορτίσεων της κόπωσης έως και την τελική φόρτιση όπου έγινε η αποκόλληση των μεταξύ τους κομματιών με τις ρωγμές να εξελίσσονται περικρυσταλλικά.

5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ.

Από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης (φασματοσκοπία εκπομπής) για το φθαρμένο και τον καινούργιο δίσκο παρατηρήθηκε ότι είναι από ανοξείδωτο χάλυβα AISI/SAE 410 [2]. Συχνά χρησιμοποιείται τέτοιο υλικό για την συγκεκριμένη χρήση καθώς τα χαρακτηριστικά του είναι κατάλληλα για τις φορτίσεις, τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες όπου δέχεται. Τα βασικά κραματικά στοιχεία που περιέχονται στους ανοξείδωτους χάλυβες [4] είναι ο άνθρακας (C), το χρώμιο (Cr) και το νικέλιο (Ni).

Ο άνθρακας περιέχεται στους ανοξείδωτους χάλυβες σε ποσοστά 0,03-1% κ.β. Για τα δικά μας δείγματα το ποσοστό άνθρακα είναι 0,06% για το φθαρμένο και 0,05% για τον καινούργιο δίσκο. Τα υψηλά ποσοστά άνθρακα ευνοούν τη θερμική κατεργασία σκλήρυνσης των μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. Επιπλέον προσδίδουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά μειώνουν τη δυσθραυστότητα.

Το χρώμιο προσδίδει αντίσταση στη διάβρωση, λόγω του παθητικού επιφανειακού οξειδίου που σχηματίζει, παρουσία του οξυγόνου για ποσοστά του χρωμίου $\text{Cr} \geq 10.5\%$. Έως εκείνο το ποσοστό, το παθητικό φιλμ είναι πολύ συνεκτικό και προσφέρει αντιδιαβρωτική προστασία μόνο σε ήπιες θερμοκρασίες. Για τα δικά μας δείγματα το ποσοστό χρωμίου είναι 12,7% για το φθαρμένο και 12,5% για τον καινούργιο δίσκο. Για ποσοστά του χρωμίου έως 30%, αυξάνετε η σταθερότητα του παθητικού επιστρώματος και η αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα ποσοστά νικελίου ήταν 0,16% για το φθαρμένο και 0,07% για τον καινούργιο δίσκο. Το νικέλιο προσδίδει επιπλέον αντίσταση στην διάβρωση και ελαφρώς οξειδωτικά περιβάλλοντα. Επιπλέον αυξάνει την αντίσταση στη διάβρωση θερμοκρασιών, αντίσταση στον ερπυσμό και θερμικά σοκ.

Η προσθήκη άλλων κραματικών στοιχείων όπως μολυβδαίνιο (Mo), άζωτο (N), βολφράμιο (W), χαλκός (Cu) κ.ά. βελτιώνουν την αντίσταση στη διάβρωση, σε υψηλές θερμοκρασίες και θερμικά σοκ.

5.3 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.

Έχει μικροδομή μαρτενσιτική, όπως προσδιορίστηκε με μεταλλογραφική παρατήρηση σε οπτικό μικροσκόπιο και παρατήρηση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Οι κόκκοι ήταν ομοιόμορφοι, μεγέθους $G=11,5$, ενώ δεν παρατηρήθηκαν εγκλείσματα είτε στο εσωτερικό των κόκκων, είτε στα όρια τους.

5.4 ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ (XRD) ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.

Η μελέτη επιφανειών φθοράς του αναλυσκόμενου στοιχείου έγινε με την βοήθεια του περιθλασιομέτρου ακτίνων X. Το αναλυσκόμενο στοιχείο είχε σαν κύριο υλικό χαλκό (Cu), οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και γραφίτη (C). Αναμενόμενο από την μακροσκοπική παρατήρηση και το χρώμα όπου είχε το αναλυσκόμενο στοιχείο. Πιο πολύ επιβεβαιώνει την στοιχειακή ανάλυση με το EDAX από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM).

5.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟΥ.

Ο μεταλλικός δίσκος στα σημεία επαφής με το αναλίσκόμενο στοιχείο έδειξε ομαλή φθορά του με Η τατραχύτητα παριστάνει τη μέση τιμή των αποκλίσεων από την επιπεδότητα. Για συγκεκριμένο μήκος το πρόγραμμα μας έδωσε την κεντρική γραμμή και μας προσδιόρισε την τραχύτητα. Έτσι οι τιμές της τραχύτητας όπου πήραμε ήταν $Ra=4.27 \mu m$ για το μεταχειρισμένο και $Ra=720 \text{ nm}$ για το καινούργιο.

Η υψομετρική διαφορά τις υψηλότερης κορυφής των επιφανειακών ανωμαλιών από τη βαθύτερη κοιλάδα, δηλαδή το μέγιστο βάθος ή μέγιστη τραχύτητα $Rt=18.83 \mu m$ για το μεταχειρισμένο και $Rt=14.76 \mu m$ για το καινούργιο. Να σχολιάσουμε εδώ ότι είναι πιο χαμηλό σε γενικές γραμμές αλλά στην μέτρησή μας είχαμε στην αρχή μια κορυφή και αύξησε την τιμή του δείγματός μας.

Η καμπύλη φέρουσας παριστάνει την αθροιστική συχνότητα εμφάνισης ύψους ανωμαλίας μεγαλύτερου από δεδομένη στάθμη και μας δίνει πληροφορίες για την πραγματική επιφάνεια. Έτσι για την τιμή της μέγιστης τραχύτητας για τον καινούργιο δίσκο είναι $Rt=14.76 \mu m$ και παρατηρούμε πιο ομαλή καμπύλη σε σχέση με το μεταχειρισμένο όπου είναι $Rt=18.83 \mu m$ και πιο ανώμαλη κατανομή της καμπύλης όπου εξηγείται από την φθορά όπου έχουν τα δείγματά μας το καινούργιο καθόλου και το παλιό σημαντικά ποσοστά φθοράς.

5.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.

Οι μετρήσεις όπου πήραμε κυμαίνονται από τα 300 έως τα 430 HV και για τους δύο δίσκους πέδησης. Η μεγαλύτερη τιμή όπου πήραμε ήταν 430 HV για το μεταχειρισμένο δίσκο πέδησης και πιο συγκεκριμένα για την επιφάνεια όπου έρχεται σε επαφή με το πλακίδιο τριβής και συμμετέχει σαν τριβοςύστημα. Η μικρότερη τιμή όπου πήραμε ήταν 279 HV για την περιοχή που δεν συμμετέχει σαν τριβοςύστημα και κοντά στα σημεία σύνδεσης με τους κοχλίες. Οι υπόλοιπες τιμές όπου πήραμε σε εκείνη την περιοχή που συμμετέχει σαν τριβοςύστημα ήταν από 408-430 HV για το μεταχειρισμένο δίσκο πέδησης και για τον καινούργιο ήταν 389-405 HV.

Οι τιμές της σκληρότητας όπου λάβαμε και για τα δύο δείγματά μας είναι ένδειξη ότι στην περιοχή όπου συμμετέχει σαν τριβοςύστημα έχει υποστεί θερμική κατεργασία, συγκρινόμενα αυτά τα αποτελέσματα βέβαια με τις υπόλοιπες τιμές από την περιοχή

όπου δεν συμμετέχει σαν τριβυσύστημα εξάγουμε αυτό το συμπέρασμα. Ο λόγος είναι ότι θέλει ο κατασκευαστής να δώσει διαφορετική σκληρότητα στις δύο περιοχές αφού πρόκειται για δύο συστήματα με διαφορετική συμπεριφορά. Το ενεργό μέρος όπου συμμετέχει σαν τριβυσύστημα και έχει αυξημένη σκληρότητα, από τις πιέσεις όπου δέχεται και τις δυνάμεις τριβής πρέπει να είναι πιο ψαθυρό και με μεγάλη αντοχή. Το ανενεργό μέρος όπου δεν συμμετέχει σαν τριβυσύστημα πρέπει να είναι πιο όλκιμο και να έχει μεγαλύτερη ελαστικότητα καθώς πρέπει να απορροφά τη ροπή όπου δέχεται από την κίνηση.

5.7 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Από την ανάλυση με τη χρήση αλγορίθμου πεπερασμένων στοιχείων (SolidWorks) βρέθηκε ότι για τις συνήθεις συνθήκες πέδησης (πίεση 25 bar, δύναμη 400N , χρόνος πέδησης 3sec) σε κάθε «φρενάρισμα»:

- Η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία ήταν 120°C, στις περιοχές όπου έχουν υλικό και δεν υπάρχουν οπές αερισμού.
- Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ήταν στο άνω μέρος της εξωτερική οπής και οι τιμές 29 N/m².
- Η μέγιστη αναπτυσσόμενη μετατόπιση ήταν 4.46 μm, στην αρχή της περιοχής όπου είναι σε επαφή με το πέδιλο τριβής.

Από τη συγκριτική εξέταση του φθαρμένου και του μη χρησιμοποιημένου δίσκου, δε βρέθηκε απόκλιση των χαρακτηριστικών ποιότητας, στην οποία θα μπορούσε να αποδοθεί αίτιο αστοχίας σχετιζόμενο με την ποιότητα του υλικού. Συγκεκριμένα, ο δίσκος:

- Είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα AISI/SAE 410, όπως προσδιορίστηκε με τη χημική ανάλυση (φασματοσκοπία εκπομπής). Τα ποσοστά των κραματικών στοιχείων, καθώς και των ακαθαρσιών, είναι εντός των ορίων αποδοχής. Η χρήση τέτοιων χαλύβων επιβάλλεται από τις συγκεκριμένες συνθήκες χρήσης της κατασκευής: θερμοκρασία περιβάλλοντος, με ισχυρά κυμαινόμενες τιμές υγρασίας.

- Έχει μικροδομή μαρτενσιτική, όπως προσδιορίστηκε με μεταλλογραφική παρατήρηση σε οπτικό μικροσκόπιο και παρατήρηση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Οι κόκκοι ήταν ομοιόμορφοι, μεγέθους $G=11.5$, ενώ δεν παρατηρήθηκαν εγκλείσματα είτε στο εσωτερικό των κόκκων, είτε στα όρια τους.
- Έχει σκληρότητα γύρω στα 300HV, στην περιοχή με όπου δεν συμμετέχει σαν τριβούστημα ενώ στην περιοχή της του τριβουσυστήματος η σκληρότητα του υλικού ανέρχεται στα 400HV. Η επιφανειακή/ περιφερειακή σκλήρυνση επιβάλλεται από τη χρήση του δίσκου ως μέρος ενός τριβουσυστήματος, στο οποίο αποτελεί το μη αναλίσκόμενο στοιχείο Η υπερβολική θέρμανση από .

Από τη μακροσκοπική παρατήρηση του δίσκου, με τη βοήθεια στερεοσκοπίου, εντοπίστηκαν ρωγμές σε τρεις (3) οπές αερισμού. Οι τρεις οπές ήταν αυτές που απείχαν περισσότερο από τον άξονα περιστροφής του δίσκου και σε απόσταση 110mm, τα κέντρα τους βρισκόταν σε ακτίνες που σχημάτιζαν μεταξύ τους $\sim 120^\circ$. Οι ρωγμές ξεκινούσαν από το εσωτερικό των οπών και διαδιδόταν προς το εσωτερικό του δίσκου, ακολουθώντας τη διεύθυνση της ακτίνας του.

Η ανάλυση των επιφανειών θραύσης (θραυστογραφία) στο επίπεδο των ρωγμών έδειξε οι ρωγμές να εξελίσσονται περικρυσταλλικά και σημάδια κόπωσης να είναι ορατά παρατηρώντας καλύτερα τις επιφάνειες στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για τον προσδιορισμό-χαρακτηρισμό αυτών.

Η μελέτη των επιφανειών φθοράς, τόσο του δίσκου, όσο και των αναλίσκόμενων στοιχείων του τριβουσυστήματος, με μικροσκοπική παρατήρηση, ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X και προφίλομετρία, έδειξε ότι:

- Το αναλίσκόμενο στοιχείο ήταν από χαλκό. Στο στοιχείο αυτό δεν παρατηρήθηκε παρουσία ρωγμών ή σημεία που θα υποδείκνυαν «μη ομαλή φθορά» του.
- Ο μεταλλικός δίσκος στα σημεία επαφής με το αναλίσκόμενο στοιχείο έδειξε ομαλή φθορά του με μηχανισμούς. Από τη μείωση, λοιπόν, του πάχους του, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ασφαλώς γραμμική φθορά με ρυθμό $300\mu\text{m}/55000\chi\lambda\mu$ δηλαδή $\sim 5,4 \text{ nm} / \chi\lambda\mu$.

Από τη συν-αξιολόγηση των εργαστηριακών/ υπολογιστικών αποτελεσμάτων μπορούμε ασφαλώς να υποθέσουμε ότι η καταστροφική αστοχία του δίσκου με την ανάπτυξη ρωγμών σε περιφερειακές οπές αερισμού/ ψύξης του δίσκου, οφείλεται σε συνδυασμένη δράση τριών μηχανισμών:

- Υπερφόρτισης σε αρχικό στάδιο, η οποία οδήγησε σε έναρξη ρωγμάτωσης του στοιχείο και η οποία θα μπορούσε να αποδοθεί στην επιβολή υπερβολικής δύναμης πέδησης
- Κόπωσης καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, η οποία οδήγησε σε διάδοση της ρωγμής και η οποία συνδέεται με τις συγκεκριμένες συνθήκες καταπόνησης του συστήματος
- Φθοράς λόγω τριβής ολίσθησης, η οποία οδήγησε σε γραμμική μείωση του πάχους του δίσκου και η οποία επίσης συνδέεται με το ρόλο του συγκεκριμένου συστήματος στη συνολική κατασκευή. Θα πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι η μείωση του πάχους επιδρά και στους δυο άλλους μηχανισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα ανάλυσης

Στην παρούσα εργασία εξετάσαμε την περίπτωση καταστροφικής αστοχίας δίσκου πέδησης μηχανής υψηλού κυβισμού. Παρά τις διάφορες έρευνες όπου έχουν γίνει σε παρόμοιες περιπτώσεις δεν έχει βρεθεί κάποιο σύστημα όπου να μην προκαλεί την φθορά στο υλικό μας και να μην υπάρχει η περίπτωση να προκληθεί κάποια αστοχία (εμφάνιση ρωγμών για την περίπτωσή μας) ή οποιοδήποτε ατύχημα.

Ο δίσκος πέδησης όπου είχαμε στην κατοχή μας ήταν από ανοξείδωτο χάλυβα και εμφάνισε ρωγμές σε τρεις διαφορετικές οπές. Να σημειώσουμε ότι οι οπές, που εμφανίστηκαν οι ρωγμές, βρίσκονται στην πιο απομακρυσμένη ακτινικά από το κέντρο του άξονα και έγιναν αντιληπτές έπειτα από 55.000 χλμ λειτουργίας του συστήματος.

Η εργαστηριακή εξέταση των δειγμάτων για το φθαρμένο και το καινούργιο εξάρτημα έδειξαν ότι πρόκειται για μαρτενσιτική μικροδομή. Η θραυστογραφική ανάλυση των δειγμάτων έδειξε σημάδια κόπωσης στην επιφάνεια θραύσης όπου είχε εξελιχθεί ρωγμή. Ο χαρακτηρισμός της επιφάνειας τριβής έδειξε ικανοποιητική φθορά για τον δίσκο πέδησης.

Έτσι η καταστροφική αστοχία του δίσκου πέδησης στις περιφερειακές οπές αερισμού/ψύξης βρέθηκε να οφείλετε σε συνδυασμένη δράση μηχανισμών υπερφόρτισης. Κόπωσης και φθοράς λόγω ολίσθησης, η οποία οδηγεί σε μείωση του πάχους του δίσκου. Έτσι ως αίτιο αστοχίας δε μπορεί να θεωρηθεί η ποιότητα του δίσκου αλλά μόνον οι συνθήκες χρήσης της μηχανής από τον αναβάτη.

Η παρούσα μελέτη θα μπορούσε να συνεχιστεί και να περιλαμβάνει δοκιμές σε τριβοσύστημα μετρώντας τις παραμέτρους τριβής και φθοράς για υλικά που χρησιμοποιούνται για συστήματα πέδηση. Ένα ακόμα πεδίο που έχει ενδιαφέρον είναι αυτό της στατιστικής, συλλέγοντας δηλαδή πληροφορίες για τα διάφορα υλικά όπου χρησιμοποιούνται στα οχήματα και για τα ποσοστά φθοράς και εμφάνισης αστοχιών. Θα ήταν ενδιαφέρον και μια διαφορετική προσέγγιση του συστήματος πέδησης, εννοώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με κάποιο άλλο λογισμικό που να προσεγγίζει το πρόβλημά μας καλύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Joseph R. Davis, ASM Handbook "Stainless steels", 1994.
- [2] Claus W. Wegst, Micah Wegst, "Stahlschlüssel", 2007.
- [3] Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, "Επιστήμη και τεχνολογία υλικών", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008.
- [4] Αγγελική Λεκάτου, "Βιομηχανικά κράματα", Εκδόσεις Παπασωτηρίου Αθήνα 2005.
- [5] Δρ Πανδώρα Ψυλλάκη, Σημειώσεις εργαστηρίου τριβολογίας, "Τριβή-Φθορά", <http://meklab.teipir.gr/>.
- [6] Δρ Πανδώρα Ψυλλάκη, Σημειώσεις εργαστηρίου Θερμικών κατεργασιών, τεύχος Β "Επιλογή και αστοχία υλικών", Οκτώβριος 2009.
- [7] Kunwoo Lee "Βασικές αρχές συστημάτων CAD/CAM/CAE", Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- [8] Richard Stone Jeffrey K. Ball, "Automotive Engineering Fundamentals", SAE international, Warrendale Pa 2004.
- [9] Rudolf Limpert, "Brake, Design and Safety" SAE international, Warrendale Pa 1999.
- [10] George Krauss, "Principles of Heat Treatment of steel" ASM OHIO 1980.
- [11] M. Boniardi, F. D'Errico, C. Tagliabue, G. Gotti, G. Perricone, "Failure Analysis of a motorcycle brake disc" Engineering Failure Analysis, Volume 13, Issue 6, September 2006, Pages 933-945.
- [12] Ji-Hoon Choi, In Lee, "Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes", Wear 257 (2004) Pages 47-58.
- [13] Y. Yildiz, M. Duzgun, "Stress Analysis of Ventilated Brake Disks Using the Finite Element Method" International Journal of Automotive Technology, Volume 11, No. 1, January 2009, Pages 133-138.
- [14] Mohd Firdaus Abu Bakar, Muhd Ridzuan Mansor, Mohd Zaid Akop, Mohd Afzanizam Mohd Rosli, Mohd Azli Salim, "Thermal Analysis of Ventilated Disk Brake Rotor for Utem Formula Varsity Race Car" Journal of Engineering and Technology, No. 02, Issue 1, June 2011, Pages 119-128.

- [15] SAE Design and Analysis Project with SolidWorks Software.
- [16] KTM Owner's Manual 990 Adventure <http://www.ktm.com/dealer-service/service/manuals-documents.html>
- [17] ASTM E3-01, Standard Guide for preparation of metallographic specimens.
- [18] ASTM E 92 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials
- [19] ASTM E384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.
- [20] Εγχειρίδιο συσκευής οπτικού προφιλόμετρου, εταιρία Wyko, μοντέλο Wyko vision 32.
- [21] F. Bagnoli, F. Dolce, M. Bernabei "Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake disks" Engineering Failure Analysis, January 2008, Pages 152-163
- [22] Κ-Σ. Π.Νίκας, Ε. Σ. Παπάζογλου, "Αρχές μετάδοσης της θερμότητας για μηχανικούς. Συνοπτική θεωρία και ασκήσεις" έκδοση 1^η, Αθήνα 2010.

