



A.E.I. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση περιπτώσεων καταστροφικής αστοχίας σε μηχανές
εσωτερικής καύσης**

Σπουδαστής: Κώστας Χριστοδουλάκης

Αριθμός μητρώου: 37754

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Ψυλλάκη Πανδώρα

ΑΙΓΑΛΕΩ, Μάρτιος 2017

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία συντάχθηκε με σκοπό τη μελέτη και την συγκέντρωση πληροφοριών, όσον αφορά την αστοχία (κυρίως την καταστροφική αστοχία) στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Με αφορμή αυτήν την έρευνα, θα αποκτηθούν οι κατάλληλες γνώσεις, ώστε μελλοντικά να υπάρχει η δυνατότητα να προταθούν λύσεις για την ελαχιστοποίηση αστοχιών, όσο αυτό είναι δυνατόν, σε αυτό το είδος των μηχανών. Σε αυτή τη μελέτη, παρουσιάζονται τα είδη των αστοχιών στους στροφαλοφόρους άξονες, στους κυλίνδρους, στους πείρους και στα έμβολα των μηχανών (βασικά εξαρτήματα των μηχανών εσωτερικής καύσης), καθώς τα αίτια τους. Ειδικότερα, παρουσιάζεται η αστοχία στις παραπάνω κατηγορίες με βάση τις μηχανικές και τις χημικές διεργασίες. Επιπλέον, δίνεται μια ιστορική αναδρομή των μηχανών αυτών. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας. Συγκεντρωτικά, η έρευνα αυτή πληροφορεί τον αναγνώστη με ακρίβεια για τα σημαντικότερα αίτια της αστοχίας (καταστροφικής) στις μηχανές εσωτερικής καύσης και τον βοηθά να κατανοήσει τη σημαντικότητα των αιτιών αυτών, που επιφέρουν την τελική θραύση.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Δρ. Ψυλλάκη Πανδώρα, Μηχανικό Μεταλλείων – Μεταλλουργό, καθώς επίσης και το κ. Μουρλά, Μηχανολόγο Μηχανικό, για τις συμβουλές και την καθοδήγηση τους, μέσα σε ένα κλίμα συνεργασίας σε όλη τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας εργασίας. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους για την στήριξη και τη συμπαράστασή τους, ώστε να αποδώσω με τον καλύτερο τρόπο και να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία.

Χριστοδουλάκης Κων/νος

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων	2
Κεφάλαιο 1: Περί μηχανών εσωτερικής καύσης.....	5
Κεφάλαιο 2: Τι είναι αστοχία	14
2.1 Μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας	15
2. 3 Βασικοί μηχανισμοί αστοχίας	16
Κεφάλαιο 3° : Καταστροφικές αστοχίες στροφαλοφόρων αξόνων.....	19
3.1.: Περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας λόγω κόπωσης.....	19
3.2:Περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας λόγω λανθασμένων κατεργασιών.	31
Κεφάλαιο 4° : Περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας σε έμβολα.....	39
4.1.1 Αστοχίες σε πείρους εμβόλων.	56
Κεφάλαιο 5° : Καταστροφικές αστοχίες σε σύστημα κυλίνδρου - κεφαλής.	62
5.1 Αστοχίες κεφαλής κινητήρα.....	62
5.2 Αστοχίες κυλίνδρου κινητήρα	72
Βιβλιογραφία	79

Περίληψη

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Αρχικά, αναλύεται ο ορισμός της αστοχίας, ως τη παρέκκλιση από τον αρχικό στόχο ενέργειας ή αντικειμένου, για τον οποίο σχεδιάστηκε. Μελετώνται, ακόμα, κάποιες περιπτώσεις αστοχίας, καθώς και τα αίτια που τις προκάλεσαν (κόπωση, ερπυσμός, διάβρωση, τριβή κ.α.). Μεγαλύτερη συχνότητα καταστροφικής αστοχίας παρουσιάστηκε στους στροφαλοφόρους άξονες, καθώς και το σύστημα θαλάμου καύσης (τα έμβολα, τους κυλίνδρους και τις κεφαλές). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δόθηκε στα αίτια τα οποία οδήγησαν στην αστοχία προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως ο μηχανισμός μέσω του οποίου προκλήθηκε. Παρατηρήθηκε τελικά, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι, οι περισσότερες αστοχίες σε μηχανές εσωτερικής καύσης αφορούν τα εξαρτήματα που εξετάσαμε (στροφαλοφόροι, έμβολα κ.ά.), λόγω των εξαιρετικά έντονων συνθηκών λειτουργίας (π.χ. υψηλές πιέσεις, θερμοκρασίες, κυκλικά φορτία κτλ.).

Abstract

The current research presents case studies of destructive failure in internal combustion engines. Firstly, the definition of engineer failure is analyzed as deviance from the initial purpose of the manufactured object, for which it has been designed. Furthermore, other cases of engineer failures are being studied, also the causes of engineer failures are being studied as well (fatigue, creep, corrosion, wear etc.). Higher frequency of destructive failure in engines has been displayed on the crankshafts as well as in the combustion chamber (pistons, cylinders, piston heads). Special interest has been ascribed to the causes that led to engineer failure so the mechanism, through which the failure has been caused, could be fully understood. Eventually, it is observed as expected, that the most failures in internal combustion engines regarding the mechanical parts, have already been mentioned (crankshafts, pistons etc), due to the extreme conditions of function (for instance: excessive pressure, cyclic loads etc).

Κεφάλαιο 1: Περί μηχανών εσωτερικής καύσης

Θερμικές μηχανές ή θερμοκινητήρες, λέγονται οι διατάξεις που μετατρέπουν τη θερμότητα, που δημιουργείται από τη χημική ενέργεια της καύσης, σε μηχανικό έργο. Οι θερμικές μηχανές χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τις μηχανές εσωτερικής και εξωτερικής καύσης, ανάλογα με την πραγματοποίηση της καύσης [1].

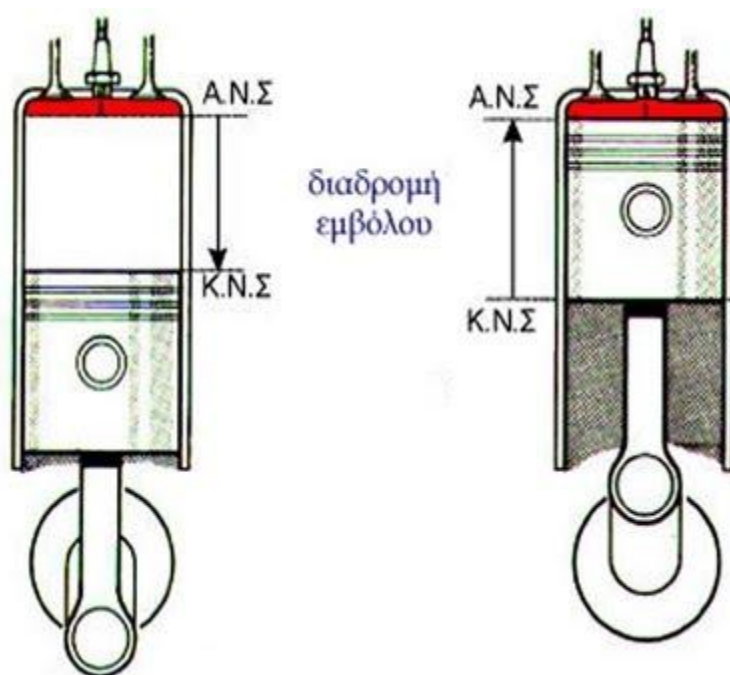
Μηχανή εσωτερικής καύσης, ή αλλιώς κινητήρια θερμοκή μηχανή, ονομάζεται η μηχανή, στο εσωτερικό της οποίας, λαμβάνει χώρα η καύση. Από αυτό το κύριο χαρακτηριστικό έχει πάρει το όνομα της, προκύπτοντας έτσι και το αρκτικόλεξο Μ.Ε.Κ. που έχει καθιερωθεί ευρέως [2,3]. Το μέσο για την παραγωγή του έργου, (το εργαζόμενο μέσο) είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας (ρευστό). Οι θεωρούμενες γενικά, ως μηχανές εσωτερικής καύσης είναι οι εξής: οι βενζινομηχανές, οι πετρελαιομηχανές, οι αεριομηχανές και οι αεροστρόβιλοι [3].

Μηχανή εξωτερικής καύσης λέγεται η θερμοκή μηχανή, στην οποία η καύση δεν υλοποιείται μέσα στο χώρο παραγωγής έργου, αλλά έξω από αυτόν. Το εργαζόμενο μέσο, σε αυτού του τύπου τις μηχανές δεν είναι τα καυσαέρια, αλλά κάποιο άλλο ρευστό, όπως για παράδειγμα το νερό. Τύποι τέτοιων μηχανών είναι: η ατμομηχανή, ο ατμοστρόβιλος, η μηχανή Stirling και άλλες [3].

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Οι θερμικές αυτές μηχανές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις παλινδρομικές (εμβολοφόρες) και τις περιστροφικές (στρόβιλους). Αυτός ο διαχωρισμός σχετίζεται με τον τρόπο, με τον οποίο γίνεται η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο [2].

Στην πρώτη κατηγορία, των παλινδρομικών (εμβολοφόρων) μηχανών, έχουμε ένα σύστημα εμβόλου – κυλίνδρου, μέσα στο οποίο δρα το εργαζόμενο μέσο και

κινεί το έμβολο παλινδρομικά μεταξύ δύο σταθερών σημείων, του άνω και του κάτω νεκρού σημείου.



Σχ. 1.1 άνω και κάτω νεκρό σημείο.

Η καύση του πραγματοποιείται, είτε με σπινθήρα (μπουζί), είτε με αυτανάφλεξη λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που δημιουργούνται (κινητήρας diesel). Η διάταξη αυτή, εμβόλου - κυλίνδρου συναντάται, τόσο στις μηχανές εσωτερικής καύσης, όσο και στις μηχανές εξωτερικής καύσης [4,2].

Στη δεύτερη κατηγορία των περιστροφικών μηχανών (στροβίλων), το εργαζόμενο μέσο, κινεί ένα στρόβιλο (τουρμπίνα), μέσω της οποίας παράγεται το έργο, αξιοποιώντας τη στροφορμή που αναπτύσσεται. Τέτοιου είδους μηχανές συναντάμε κι εδώ, τόσο στις μηχανές εσωτερικής, όσο και στις μηχανές εξωτερικής καύσης. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης αυτού του τύπου καλούνται αεριοστρόβιλοι, λόγω του ότι η περιστροφή επιτυγχάνεται από τα καυσαέρια. Οι δε μηχανές εξωτερικής καύσης αυτού του τύπου, ονομάζονται ατμοστρόβιλοι λόγω της περιστροφής αυτών από την πίεση του δημιουργούμενου ατμού [4].

Πρόδρομος του βενζινοκινητήρα θεωρείται η ατμομηχανή, η οποία εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 18^ο αιώνα και πιο συγκεκριμένα το 1712. Η πρώτη “ατμομηχανή” στην ιστορία (ουσιαστικά ο πρόδρομος της σημερινής ατμομηχανής) είναι η αιολόσφαιρα ή ατμοστρόβιλος, που αποτελεί την πιο διάσημη εφεύρεση του Ήρων του Αλεξανδρινού όπως φαίνεται παρακάτω [2,3].



Σχ. 1.2: Αιολόσφαιρα του Ήωνα

Όπως είναι φυσικό, δεν έλειψαν και οι προσπάθειες για ένα κινούμενο όχημα με τη δική του ισχύ. Ο πρώτος που τα κατάφερε ήταν ο Γάλλος Nicholas Cugnot το 1769, με το όχημα του σχήματος 1.2. Στο συγκεκριμένο όχημα δεν επιτράπηκε καμία εξέλιξη λόγω του εξαιρετικά μεγάλου βάρους του, της δυσκολίας στην οδήγηση και της χαμηλής απόδοσής του (3 km/h) [5].



Σχ. 1.2: Ατμοκίνητο όχημα Κινιό (1769)

Η μηχανή εσωτερικής καύσης, από το 19^ο αιώνα και μετά, ήταν αποτέλεσμα μακροχρόνιων προσπαθειών πολλών πειραματιστών και γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο δεν μπορούμε να την αποδώσουμε σε ένα μόνο εφευρέτη. Στα τέλη του αιώνα αυτού, οι ατμομηχανές είχαν φτάσει στο ζενίθ της εξέλιξης και της δυναμικότητάς τους, με τη συνεχόμενη και ολοένα πιο επιτακτική ανάγκη για μικρότερους, ισχυρότερους, και αποδοτικότερους κινητήρες, να έχει ως αποτέλεσμα την έρευνα και την ανάπτυξη των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. [2,3].

Το 1820, λειτουργούσε κινητήρας με καύση μίγματος αέρα – υδρογόνου στην Αγγλία [2]. Το 1824 κυκλοφορεί το σύγγραμμα του Sadi Carnot « Σκέψεις πάνω στην ωστική δύναμη της φωτιάς» [6]. Ο Sadi Carnot ήταν Γάλλος φυσικός και θεωρείται ο πατέρας της θερμοδυναμικής, λόγω του ότι διατύπωσε μέσα από το σύγγραμμά του τις βασικές αρχές της θεωρίας της εσωτερικής καύσης. Τα χρόνια που ακολούθησαν υπήρξε βελτίωση σε όλους τους τομείς, καθώς επίσης αναπτύχθηκαν και κινητήρες, που το καύσιμο συμπιεζόταν, πριν αναφλεγεί [6,2].

Το 1860 ο Γαλλοβέλγος Jean-Josef Etienne Lenoire (1822-1900) έκανε την παρουσίαση ενός κινητήρα που λειτουργούσε με φωταέριο – αέρα. Τοποθέτησε αυτόν τον κινητήρα σε ένα μικρό όχημα και έτσι δημιούργησε, ένα πολύ μικρότερον διαστάσεων όχημα, σε σχέση με τα ογκώδη, βαριά και δυσκίνητα ατμοκίνητα

οχήματα της εποχής. Ο κύκλος λειτουργίας του Lenoire ήταν δίχρονος, όμως ο βαθμός απόδοσης του (περίπου 2,6%) δεν ήταν αρκετός, ώστε να αξιοποιηθεί οικονομικά ο κινητήρας αυτός [5] .

Σημαντική παρακαταθήκη άφησε και ο Γάλλος μηχανικός Alphonse Beau de Rochas (1815-1893), που διατύπωσε τις βασικές αρχές της τετράχρονης λειτουργίας κινητήρα εσωτερικής καύσης το 1861, σε αντίθεση με τον κύκλο του Λενουάρ που ήταν δίχρονος. [7,2].

Αξίζει να αναφερθεί και ο αυστριακός εφευρέτης Siegfried Marcus (1831-1898), ο οποίος το 1864 τοποθέτησε σε μια χειράμαξα μια μηχανή εσωτερικής καύσης, που χρησιμοποιούσε ως καύσιμο της την βενζίνη. Κατά πολλούς, είναι αυτός ο πρώτος που θεωρείται ότι κατασκεύασε το πρώτο κινούμενο με βενζίνη όχημα. Λόγω της μη ικανοποιητικής απόδοσης δεν κατάφερε η εφεύρεση αυτή να αξιοποιηθεί [8,5].

Αντί αυτού, ο πρώτος που κατασκεύασε όχημα με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης (περίπου 16%) θεωρείται ο Nikolaus August Otto (1832-1891). Το 1867 παρουσίασε στην παγκόσμια έκθεση του Παρισιού έναν ατμοσφαιρικό κινητήρα, που του χάρισε το χρυσό βραβείο, λόγω της μειωμένης κατανάλωσης καυσίμου. Έτσι, αποδόθηκε στον Otto η κατασκευή του πρώτου κινητήρα. Λόγω του ότι αυτοί οι κινητήρες δεν μπορούσαν να καλύψουν τις απαιτήσεις σε ισχύ κάποιων βιοτεχνιών, ο Otto οδηγήθηκε στην κατασκευή ενός «νέου κινητήρα» με τετράχρονη λειτουργία το 1876. Ο επονομαζόμενος κινητήρας Otto, αποτέλεσε τεράστια εξέλιξη σε σχέση με τον κινητήρα του Lenoire και είχε μεγάλη εμπορική επιτυχία. Οι βασικές αρχές σχεδίασης και λειτουργίας είναι ίδιες ακόμη και σήμερα, παρά την πληθώρα βελτιώσεων και εξελίξεων των σημερινών Μ.Ε.Κ.[2].

Αφότου έγινε ευρέως γνωστός ο κινητήρας Otto, οι έρευνες προσανατολίστηκαν στην ανεύρεση καλύτερων μεθόδων ανάφλεξης του μίγματος. Η μεγάλη συμπίεση μέσα στο θάλαμο καύσης ήταν μια από τις μεθόδους που δοκιμάστηκαν για την επίτευξη υψηλότερης θερμοκρασίας και κατά συνέπεια, καλύτερης απόδοσης. Το καύσιμο ψεκαζόταν μέσα στο θάλαμο και, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, αναφλέγονταν. Αυτού του είδους κινητήρες ονομάζονταν «κινητήρες συμπίεσεως- αναφλέξεως». Τα άμεσα προβλήματα που εμφανίστηκαν σχετίζονταν με την αντοχή των υλικών κατασκευής, λόγω των αυξημένων πιέσεων και θερμοκρασιών. Βασικό, ακόμα, πρόβλημα αποτελούσε η δυσκολία έγχυσης του καυσίμου μέσα στο θάλαμο καύσης, λόγω των μεγάλων πιέσεων. Τη λύση των προβλημάτων αυτών, έδωσε ο Γερμανός μηχανικός Rudolph Diesel (1858-1913), που πέτυχε μεγάλη αξιοπιστία χρησιμοποιώντας ένα κλάσμα απόσταξης ορυκτού πετρελαίου, ως υγρό καύσιμο. Το καύσιμο αυτό πήρε το όνομα του, όπως επίσης και ο συγκεκριμένος κινητήρας. Η πρώτη, με καλή απόδοση (~ 20%), μηχανή του Diesel παρουσιάστηκε το 1897. Έκτοτε, αυτού του είδους οι κινητήρες βρήκαν εφαρμογή σε όλες σχεδόν τις κατηγορίες των μηχανών εσωτερικής καύσης (Σχ. 1.3) [9,10].



Σχ. 1.3: Πρώτη μηχανή Diesel με ικανοποιητική απόδοση (1897)

Περίπου το 1930 ο Γερμανός Felix Wankel (1902-1988) παρουσίασε ένα νέο τύπο βενζινοκινητήρα, με διαφορετική κινηματική από τους κινητήρες Otto και Diesel. Η βασική διαφορά αυτού του τύπου κινητήρα είναι ότι η κίνηση του εμβόλου είναι περιστροφική, σε αντίθεση με την παλινδρομική κίνηση των κινητήρων Otto και Diesel. Το έμβολο του συγκεκριμένου κινητήρα είναι τριγωνικού σχήματος και περιστρέφεται μέσα στο θάλαμο καύσης (Σχ. 1.4) [3].



Σχ.1.4: Τομή κινητήρα Wankel

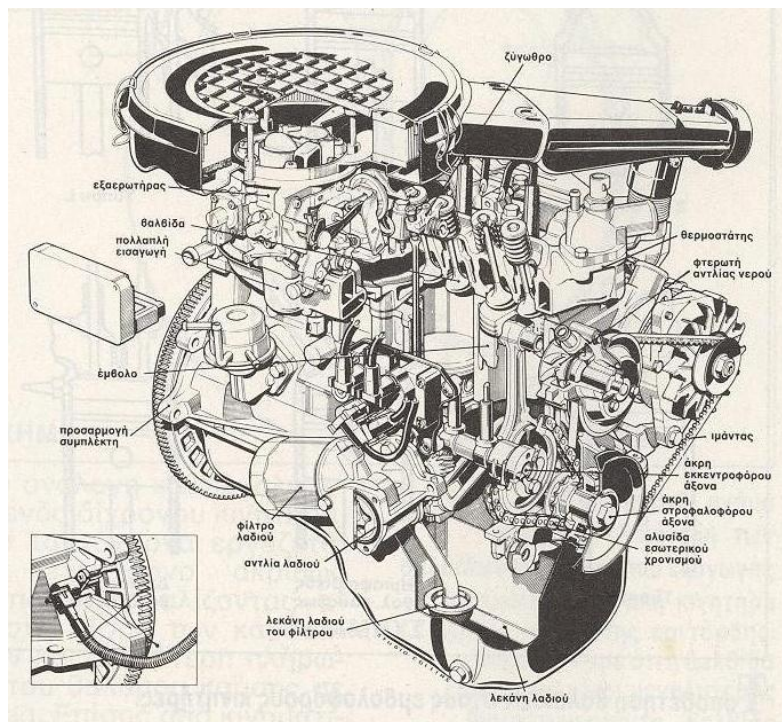
Ένας, διαφορετικού είδους, κινητήρας εφευρέθηκε το 1816, από τον Robert Stirling (1790-1878), από τον οποίο πήρε και το όνομα του (κινητήρας Stirling). Ο κινητήρας αυτός είναι μια θερμική μηχανή με αρκετά διαφορετικό τρόπο λειτουργίας από τις μηχανές εσωτερικής καύσεως. Λειτουργεί με υπέρθερμο αέρα και είναι οικολογικά άριστος, αφού δεν έχει εκπομπές καυσαερίων. Η χρήση του περιορίζεται σε πολύ ειδικές περιπτώσεις, κυρίως εκεί που προτιμάται αθόρυβη λειτουργία (Σχ1.5) [11].



Σχ.1.5: Λειτουργία μηχανής Stirling.

Από το 1940 κι έπειτα, κατασκευάζονταν και αναπτύσσονταν ραγδαία οι κινητήρες αερίωθης ή κινητήρες τζετ. Οι συγκεκριμένου τύπου κινητήρες χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε αεροπλάνα και έχουν διαφορετική αρχή λειτουργίας. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη συμπίκνωση του εισερχόμενου αέρα με καύσιμο και στη συνέχεια ανάφλεξη του. Γενικά οι κινητήρες αυτοί, είναι κινητήρες εσωτερικής καύσης [2,3].

Οι σημερινού τύπου κινητήρες εσωτερικής καύσης παρουσιάζουν, γενικά, την εξής μορφή του παρακάτω σχήματος.

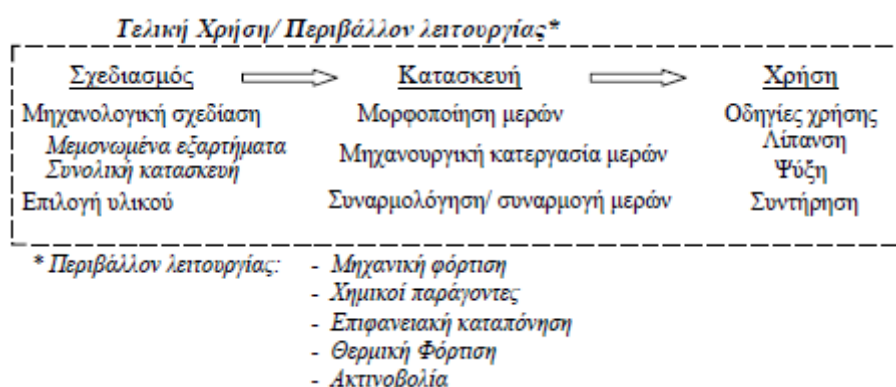


Σχ.1.4 Κινητήρας εσωτερικής καύσης.

Τα κύρια εξαρτήματα του σημερινού κινητήρα είναι: ο στροφαλοφόρος άξονας, τα έμβολα, οι διωστήρες, οι κύλινδροι, οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, ο εκκεντροφόρος άξονας κλπ. Οι αστοχίες που θα μελετηθούν παρακάτω αφορούν τους στροφαλοφόρους άξονες, τους κυλίνδρους, τους πείρους και τα έμβολα [12].

Κεφάλαιο 2: Τι είναι αστοχία

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO ως αστοχία ορίζεται «η διακοπή της ικανότητας ενός στοιχείου να εκτελέσει μια απαιτούμενη λειτουργία», η λέξη «αστοχία» δηλαδή, περιγράφει τη μη εκπλήρωση του αρχικού σκοπού/ στόχου μιας ενέργειας ή αντικειμένου, για τον οποίο σχεδιάστηκε. Η παρέκκλιση αυτή από το στόχο μπορεί να οφείλεται, είτε σε εσφαλμένο σχεδιασμό, είτε σε μη σωστή κατασκευή του αρχικού σχεδιασμού, είτε σε εξυπηρέτηση διαφορετικού σκοπού από τον αρχικό του κατασκευαστή. Ακόμα ένας λόγος που θα μπορούσε να επιφέρει την αστοχία είναι οι απρόβλεπτες συνθήκες λειτουργίας, όπως επίσης και οι περιβαλλοντικές συνθήκες που είναι δύσκολο να εκτιμηθούν [13].



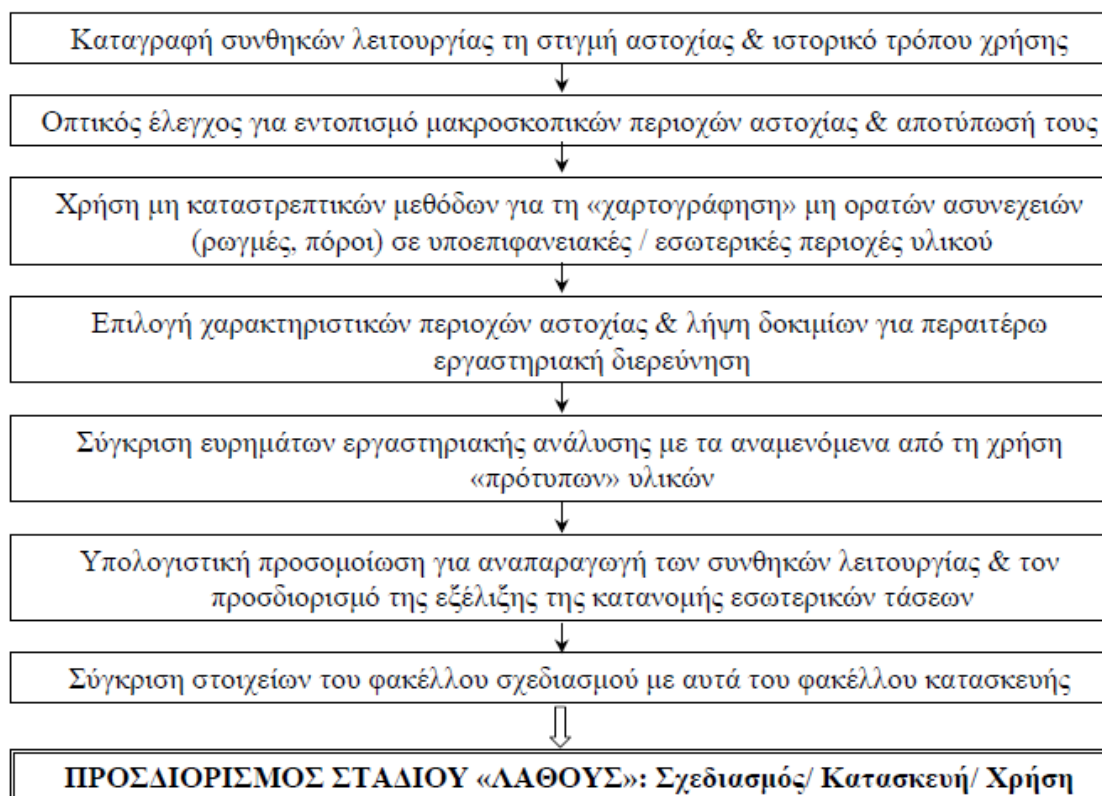
Σχ. 2.1 Στάδια μιας μηχανολογικής κατασκευής.

Σε ορισμένες μηχανολογικές κατασκευές, η αστοχία πιθανά να σχετίζεται με τη μη ικανοποιητική λειτουργία, τη μη ασφαλή λειτουργία και τέλος την παύση της λειτουργίας της μηχανής αυτής. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις (μη ικανοποιητική και μη ασφαλής λειτουργία) μπορεί να υπάρξει άμεση λύση, αφού με κάποια ρύθμιση, επιδιόρθωση ή αντικατάσταση κάποιου τμήματος/των της κατασκευής, πραγματοποιείται η ομαλή λειτουργία της. Στην τρίτη και πιο επικίνδυνη περίπτωση παρατηρείται παύση λειτουργίας της μηχανής, συνήθως λόγω καταστροφής κάποιου

από τα εξαρτήματά της. Ονομάζεται καταστροφική αστοχία και είναι η χειρότερη μορφή αστοχίας που υπάρχει, λόγω του ότι τις περισσότερες φορές εμφανίζεται εντελώς απροειδοποίητα. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε κυρίως με την καταστροφική αστοχία τμημάτων ή/και μηχανών εσωτερικής καύσης [13].

2.1 Μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας

Σχεδόν στις περισσότερες περιπτώσεις υλικών που έχουν υποστεί «καταστροφική αστοχία» τα αίτια που οδήγησαν σε αυτήν μπορούν να προσδιοριστούν από τις επιφάνειες θραύσης. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό μέσο της ανάλυσης αστοχίας, να προσδιοριστούν τα αίτια που οδήγησαν σε αυτή (κατά το σχεδιασμό, την κατασκευή ή/ και τη χρήση) , καθώς επίσης, και ο προσδιορισμός των κύριων επιβαρυντικών παραγόντων της. Η μεθοδολογία που ακολουθείτε γενικά σε αυτές τις περιπτώσεις, παρουσιάζεται παρακάτω ([13]).



Σχ. 2.2 Γενική μεθοδολογία ανάλυσης αστοχίας.

Τέλος, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω συγκρίσεως με άλλα παρόμοια/πρότυπα καθώς και με σχετικές βιβλιογραφίες, οδηγεί στον ασφαλή προσδιορισμό του αίτιου αστοχίας μιας μηχανολογικής κατασκευής [13].

2.3 Βασικοί μηχανισμοί αστοχίας

Η συμπεριφορά των υλικών σε διάφορες εφαρμογές της καθημερινής ζωής εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα όσον αφορά τις καταπονήσεις που δέχονται. Προκειμένου να προσδιοριστούν και να επεξηγηθούν οι επιβαλλόμενες φορτίσεις, εξετάζονται παρακάτω οι κύριοι μηχανισμοί που προκαλούν αστοχία, σε μηχανολογικές κατασκευές.

Αστοχία λόγω κόπωσης (fatigue)

Σε αυτού του είδους την αστοχία παρουσιάζεται περιοδικά μεταβαλλόμενη μηχανική φόρτιση. Η θραύση, εμφανίζεται πολύ ποιο πριν από το όριο αντοχής σε εφελκυσμό (σ_{TS}), πιθανά ακόμη και πριν το όριο διαρροής (σ_y), χωρίς να εμφανίζει ενδείξεις που να προμηνύουν αστοχία. Λόγω αυτού η θραύση που προκαλείται από κόπωση είναι η ποιο επικινδυνότερη από όλες τις άλλες. Επιπλέον είναι και η ποιο συνηθισμένη εξαιτίας του ότι, τα περισσότερα εξαρτήματα σε μια μηχανολογική κατασκευή, λειτουργούν κάτω από συνθήκες μεταβαλλόμενων φορτίσεων [13].

Αστοχία λόγω ερπυσμού (creep)

Στην εν λόγω αστοχία η τιμή της επιβαλλόμενης τάση παραμένει σταθερή, αλλά επενεργεί σε αυτό υψηλή θερμοκρασία ενεργοποιώντας τους μηχανισμούς ερπυσμού. «*Η μόνιμη παραμόρφωση ενός υλικού λόγω ερπυσμού δίνεται ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης, της θερμοκρασίας και του χρόνου: $\epsilon=f(\sigma, T, t)$.*» [13].

Αστοχία λόγω διάβρωσης (corrosion)

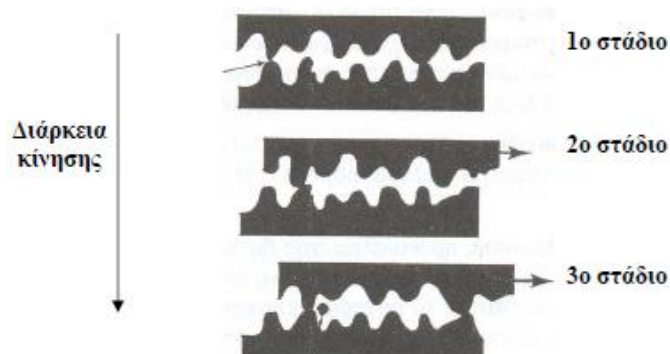
Η δράση χημικών παραγόντων μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων μιας κατασκευής, ακόμα και αστοχία αυτής. Μια μεταλλική κατασκευή/εξάρτημα μπορεί να υποστεί διάβρωση εξαιτίας ηλεκτροχημικών δράσεων (επαφή επιφάνειας με ηλεκτρολύτη). Επιπλέον, μπορεί να εμφανιστεί επιφανειακή οξείδωση λόγω επαφής, με υψηλής θερμοκρασίας αέριο [13].

Αστοχία λόγω τριβής (wear)

Σύμφωνα με την Ψυλλάκη, στη πλειονότητα των μηχανολογικών κατασκευών υπάρχουν κινούμενα τμήματα που εφάπτονται μεταξύ τους είτε σημειακά, είτε σε κάποιο τμήμα επιφανειακά. Η κίνηση αυτή των επιφανειών (ανταγωνιστικές επιφάνειες) δημιουργεί φαινόμενα φθοράς, μηχανικής ή χημικής φύσεως ή και συνδυασμό των δύο. Σημαντική βαρύτητα στις επιφάνειες επαφής έχουν παράγοντες του περιβάλλοντος τους όπως θερμοκρασία, υγρασία κλπ. Η φθορά τριβής διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Φθορά λόγω πρόσφυσης (adhesive wear).

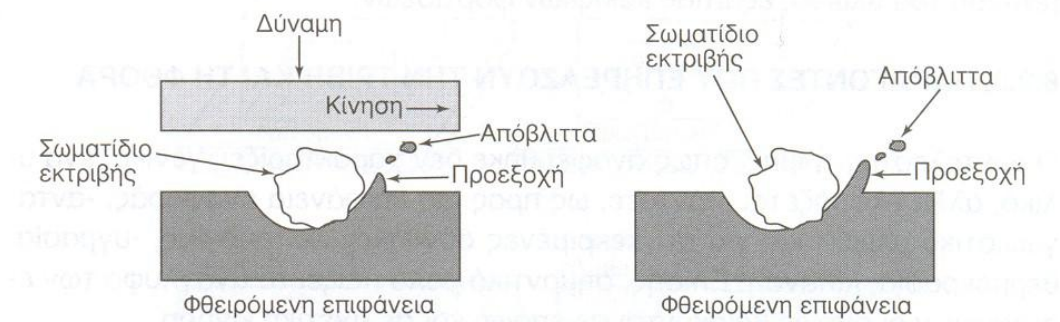
Αυτού του είδους τη φθορά παρατηρείτε, όταν οι εξοχές της μιας επιφάνειας έρχονται σε επαφή με τις εξοχές της άλλης, με ακόλουθη θραύση τους.



Σχ. 2.3. Στάδια φθοράς τριβής μέσω μηχανισμού πρόσφυσης.

- Φθορά λόγω εκτριβής (abrasive wear).

Αυτού του τύπου η φθορά παρουσιάζεται όταν σκληρά σωματίδια είτε του ανταγωνιστικού υλικού είτε σωματίδια που δημιουργούνται από τις επιφάνειες επαφής παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών [13].



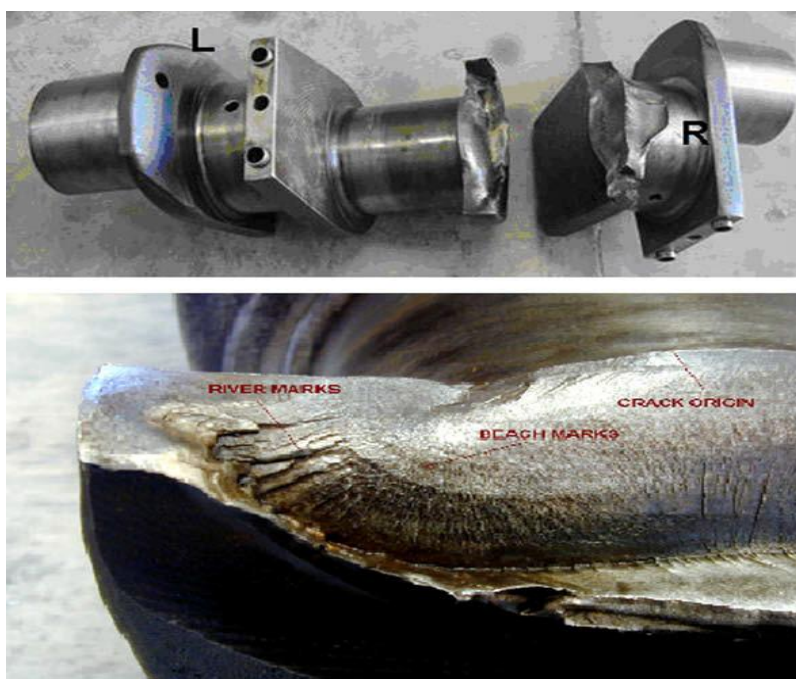
Σχ. 2.4. Φθορά τριβής μέσω μηχανισμού εκτριβής.

Κεφάλαιο 3^ο : Καταστροφικές αστοχίες στροφαλοφόρων αξόνων

Η αστοχία των στροφαλοφόρων αξόνων εμφανίζεται είτε λόγω κόπωσης, είτε κατά διαδικασία κατασκευής και επεξεργασίας. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας, οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον, γιατί η θραύση εμφανίζεται νωρίτερα από την αναμενόμενη διάρκεια ζωή τους. Οι περιπτώσεις αυτές αφορούν κόπωση, λανθασμένες κατεργασίες, κατασκευαστικά ελαττώματα, λανθασμένη επισκευή, συναρμολόγηση κ.ά.

3.1.: Περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας λόγω κόπωσης

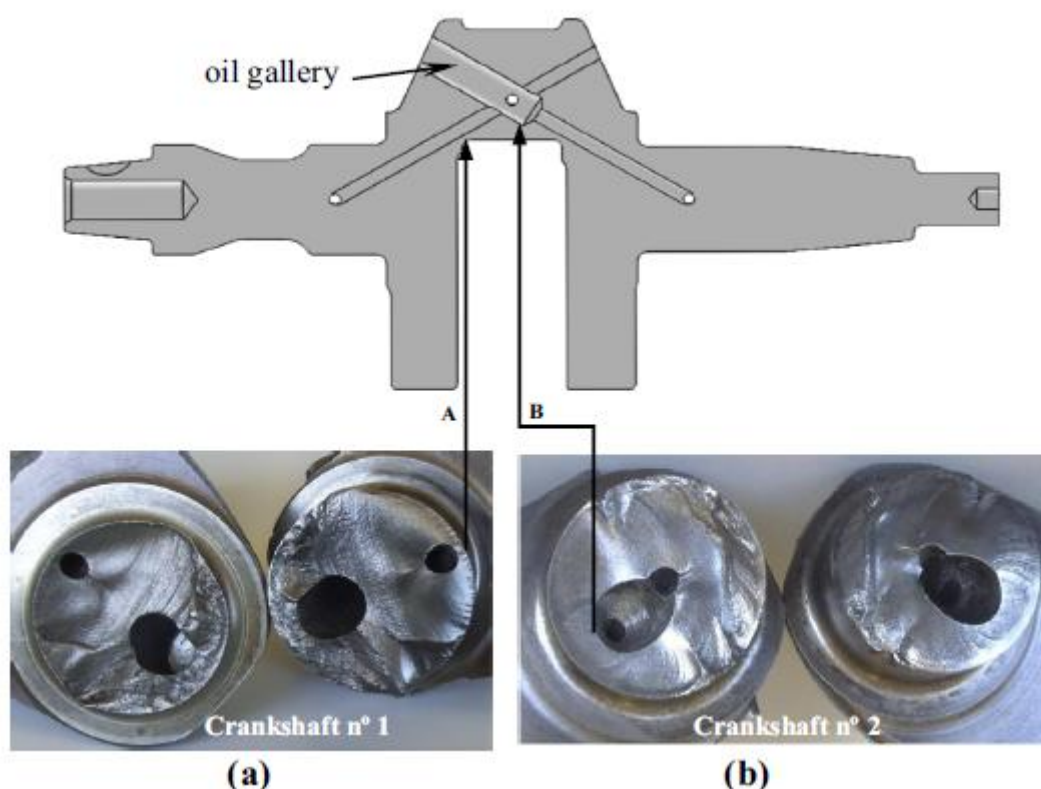
Η πρώτη περίπτωση αφορά τη θραύση ενός στροφαλοφόρου άξονα γεννήτριας πετρελαίου λόγω κόπωσης (υψηλός αριθμός κύκλων χαμηλών τάσεων).



Σχ. 3.1.1 Επιφάνεια θραύσης στροφαλοφόρου.

Το επίπεδο της θραύσης ήταν κεκλιμένο στις 45 μοίρες σε σχέση με τον άξονα του στροφαλοφόρου. Το σημείο έναρξης της θραύσης βρίσκεται μεταξύ του κομβίου και του εδράνου βάσης [14].

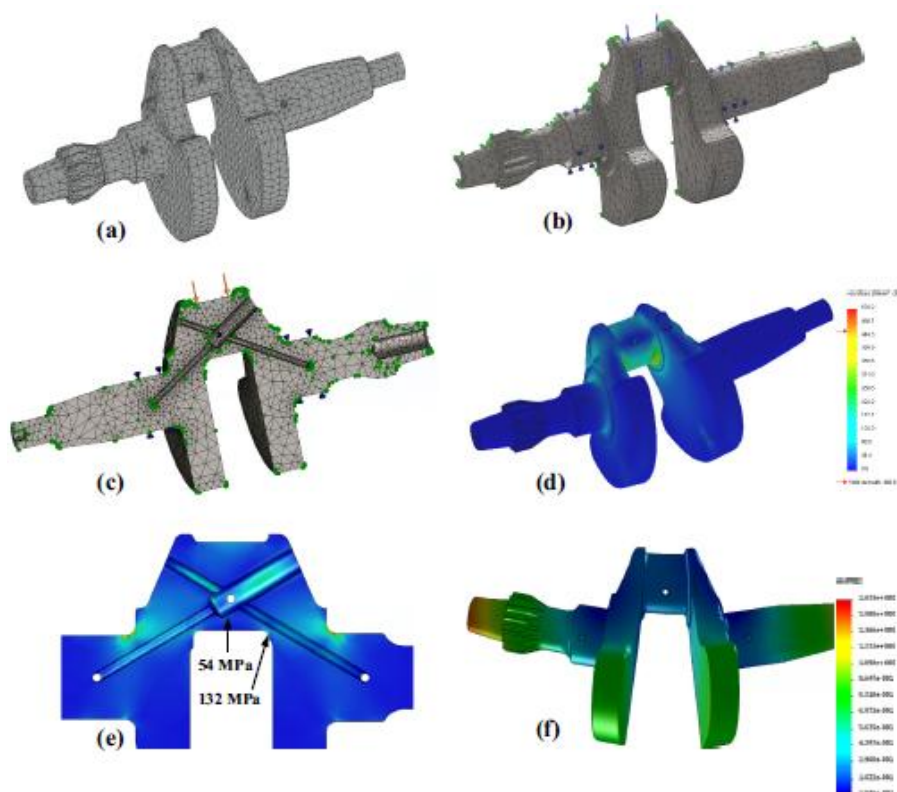
Ακόμα μια περίπτωση θραύσης λόγω κόπωσης είναι και η ακόλουθη, που αφορά δύο στροφαλοφόρους άξονες μονοκύλινδρων πετρελαιομηχανών. Τα σημεία έναρξης ρωγμής φαίνονται παρακάτω [15].



Σχ. 3.1.2 Περιοχές έναρξης ρωγμής στο στροφαλοφόρο 1&2 αντίστοιχα.

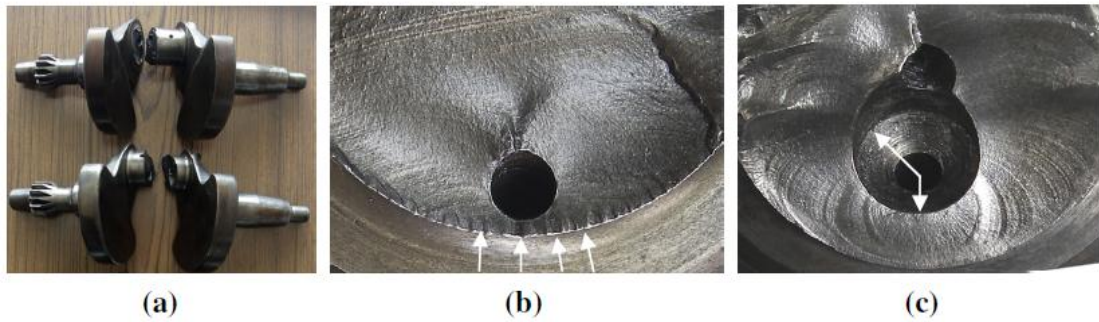
Παρατηρείται ότι, στον πρώτο άξονα το σημείο έναρξης της ρωγμής είναι ανάμεσα στο κομβίο και στο αντίβαρο, ενώ στον δεύτερο άξονα η ρωγμή ξεκινά από εκεί που αρχίζει η κωνικότητα της οπής λαδιού (σημείο μετάβασης από κυλινδρικό σε κωνικό σχήμα). Η εξέταση της μικροδομής των αξόνων δεν εμφανίζει κάποια

ανωμαλία. Προκειμένου να υπολογιστεί το μέγεθος των τάσεων στα κρίσιμα σημεία διεξήχθη μια μελέτη προσομοίωσης [15].



Σχ. 3.1.3 (a) ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, (b)&(c) πλέγμα οριακών συνθηκών σε $\frac{1}{2}$ του μοντέλου, (d) τάσεις στα «φιλεταρισμάτα» των κομβίων, (e) μέγιστη τάση σε κρίσιμες ζώνες όπου εμφανίστηκε η έναρξη της ρωγμής, (f) ανάλυση μοντέλου πεπερασμένων σημείων.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν ότι, οι περιοχές των «φιλεταρισμάτων» είναι τα πιο ευαίσθητα σημεία (λόγω της κλίσης τους) για θραύση, όπως φαίνεται στο σχ. 3.1.3 (d). Έπειτα από μια προσεκτική εξέταση της μορφολογίας της επιφάνειας του κατάγματος φαίνεται ότι, η ρωγμή αναπτύχθηκε αργά και στους δύο άξονες (χαμηλός ρυθμός αύξησης ρωγμής κόπωσης), και ως εκ τούτου υπήρχε χαμηλό επίπεδο τάσεων μέχρι την τελική θραύση. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρείται ότι, η αστοχία είναι εμφανής από γυμνό μάτι [15].

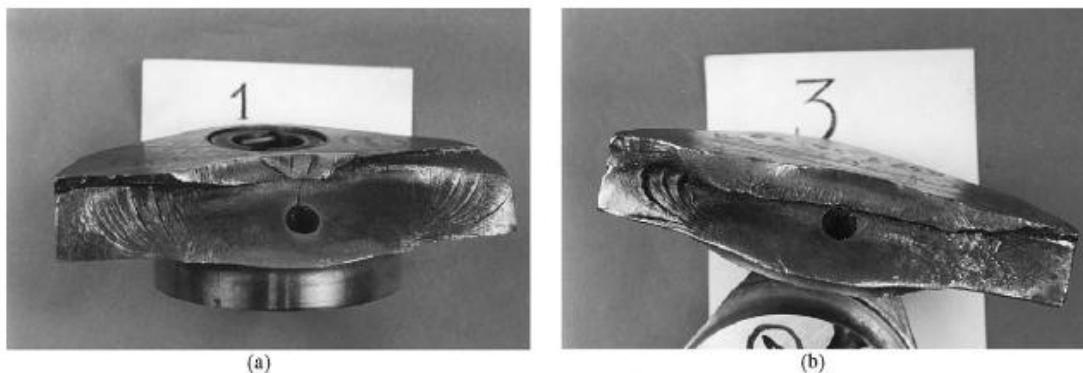


Σχ. 3.1.4 (a) Οι δύο κατεστραμμένοι στροφαλοφόροι άξονες, (b) και (c) Η μορφολογία και η θέση επιφάνειας ρωγμής (προσδιορίζεται από τα βέλη η αρχή των ρωγμών στην 1^η και στην 2^η περίπτωση).

Βάση της μορφολογίας της επιφάνεια θραύσης γίνεται αντιληπτό ότι, η κόπωση είναι ο κυρίως μηχανισμός αστοχίας για τους παραπάνω άξονες [15].

Οι άξονες που ακολουθούν είναι από σφυρηλατημένο χάλυβα C45. Είναι επαγωγικά σκληρυμένοι στην περιοχή των κομβίων και των κύριων στροφείων. Η ανάλυση αστοχίας των συγκεκριμένων στροφαλοφόρων διεξήχθη ως εξής:

1. Καθορισμός χημικής σύνθεσης και μικροδομής του υλικού.
2. Εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.
3. Οπτική ανάλυση ζώνης αστοχίας.
4. Εκτίμηση της ρωγμής κόπωσης υπό τον πολλαπλασιασμό των τάσεων.
5. Μελέτη μηχανισμού αστοχίας με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης [16].





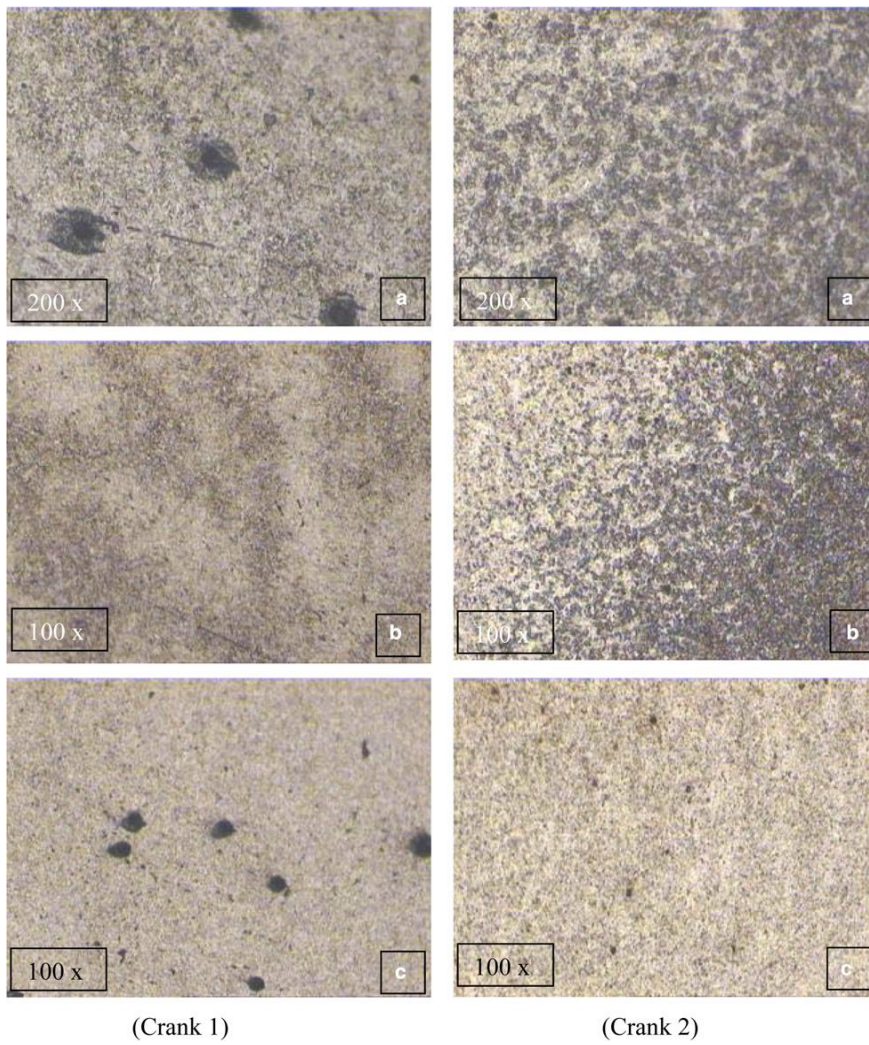
Σχ. 3.1.5 Μακροσκοπική όψη των κατεστραμμένων επιφανειών των στροφαλοφόρων αξόνων.

Έπειτα από την ανάλυση και τις παρατηρήσεις που έγιναν, συνεπάγεται το συμπέρασμα ότι, η χημική σύνθεση και οι μηχανικές ιδιότητες βρίσκονται εντός του προκαθορισμένου εύρους. Από τα συμπεράσματα των αναλύσεων προκύπτει ότι, η πρόωγη θραύση των αξόνων οφείλεται στην κόπωση. Η θραύση σε όλες τις περιπτώσεις έχει λάβει χώρα στην περιοχή που συνδέει το κομβίο με το κύριο στροφείο του άξονα (web-fillet). Η διαφορετική περιοχή έναρξης κόπωσης πιθανώς οφείλεται στις επιφανειακές και υπό-επιφανειακές συνθήκες, που επικρατούν στην περιοχή του κομβίου [16].

Παρακάτω, βλέπουμε τις αστοχίες δύο στροφαλοφόρων αξόνων κινητήρων, με χρήση στον αγροτικό τομέα. Ο στροφαλοφόρος άξονας είναι χάλυβας μέσου άνθρακα του τύπου AISI 4140. Οι μηχανές αυτές επιλέγονται συχνά, λόγω του χαμηλού τους κόστους, καθώς επίσης και της ευκολίας τοποθέτησής τους σε διαφορετικές εφαρμογές πέραν του πεδίου ορισμού τους. Αποτέλεσμα αυτών είναι η πρόωγη θραύση τους [17].



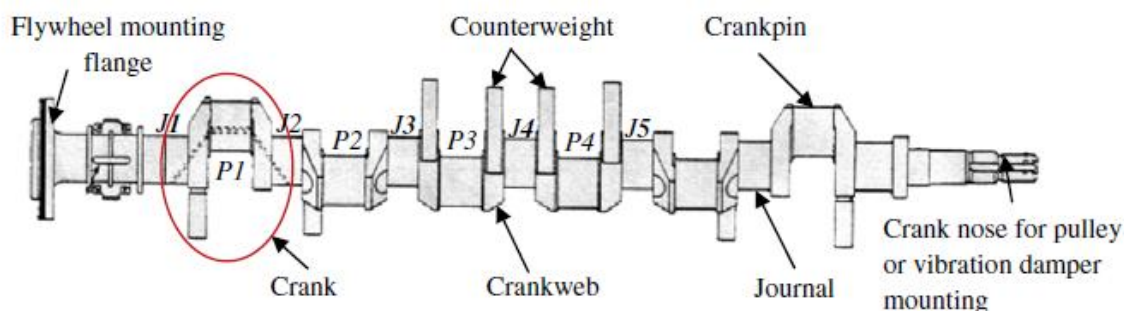
Σχ. 3.1.6 Επιφάνειες θραύσης στροφαλοφόρων αξόνων.



Σχ. 3.1.7 Μικροδομή των στροφαλοφόρων αξόνων (a,b επιφανειακά, c εσωτερικά).

Μετά από ανάλυση των αξόνων διαπιστώθηκε η ύπαρξη κάποιων μαύρων κουκίδων στην επιφάνεια τους (εγκλείσματα). Τα παραπάνω εγκλείσματα παρουσιάζουν πολύ μεγάλο μέγεθος, πιθανών λόγω της κακής κατασκευής και κατεργασίας του υλικού. Οι κοιλότητες αυτές, λογικά, ξεκίνησαν και τη ρωγή κόπωσης του υλικού. Η θραύση προήλθε από μια διαδικασία κόπωσης στην περιοχή καμπυλότητας (φιλετάρισμα) του κομβίου με τον άξονα λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων [17].

Στην περίπτωση που παρουσιάζεται παρακάτω, διεξάγεται έρευνα σε δυο ελαττωματικούς στροφαλοφόρους άξονες πετρελαιομηχανών, από σφυρηλατημένο ανθρακούχο χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν σε κινητήρες τρένων.

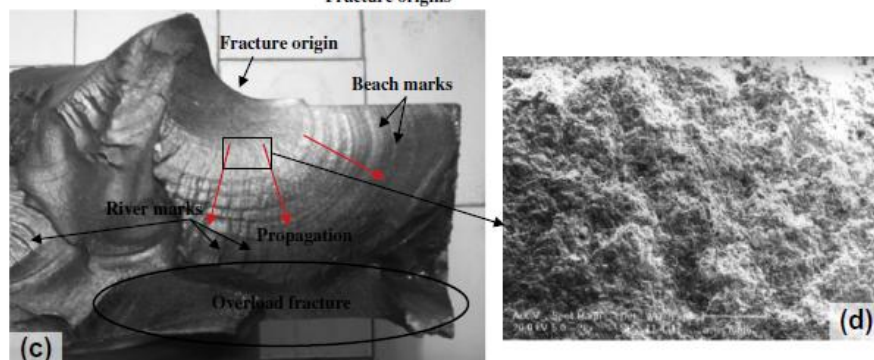
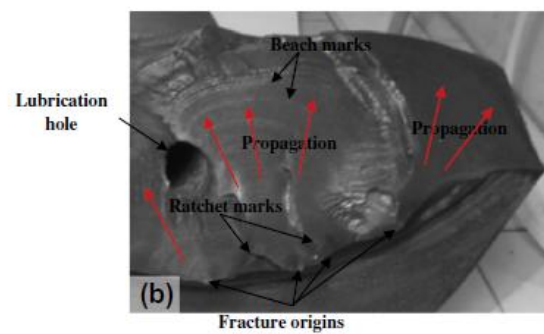
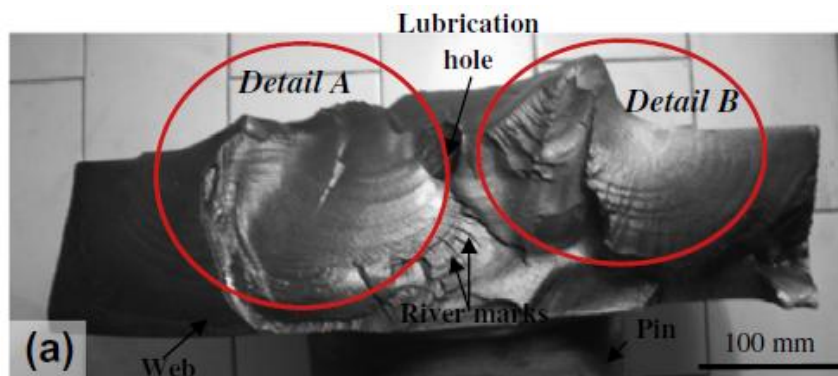


Σχ. 3.1.8 Γενική μορφή στροφαλοφόρου άξονα κινητήρα πετρελαίου.

Στην περίπτωση του πρώτου στροφαλοφόρου άξονα, η επιφάνεια θραύσης εξετάστηκε με γυμνό μάτι και με ένα φακό μεγέθυνσης. Η θραύση έλαβε χώρα ανάμεσα στο κομμάτι που ενώνει το κύριο στροφείο (J5) και το κομβίο (P4) (σχ.3.1.8), με την τελική αστοχία του άξονα να φαίνεται στο σχήμα 3.1.9 [18].



Σχ.3.1.9 Τελική αστοχία στροφαλοφόρου άξονα Νο 1



Σχ. 3.1.10 (α) Όψη επιφάνειας κατάγμα κόπωσης, (β) μεγεθυμένη απεικόνιση της λεπτομέρειας Α της εικόνας 3.12(α), (γ) μεγεθυμένη απεικόνιση της λεπτομέρειας Β της εικόνας 3.12(α), (δ) παρατήρηση σημαδιών εξέλιξης (beach marks) με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

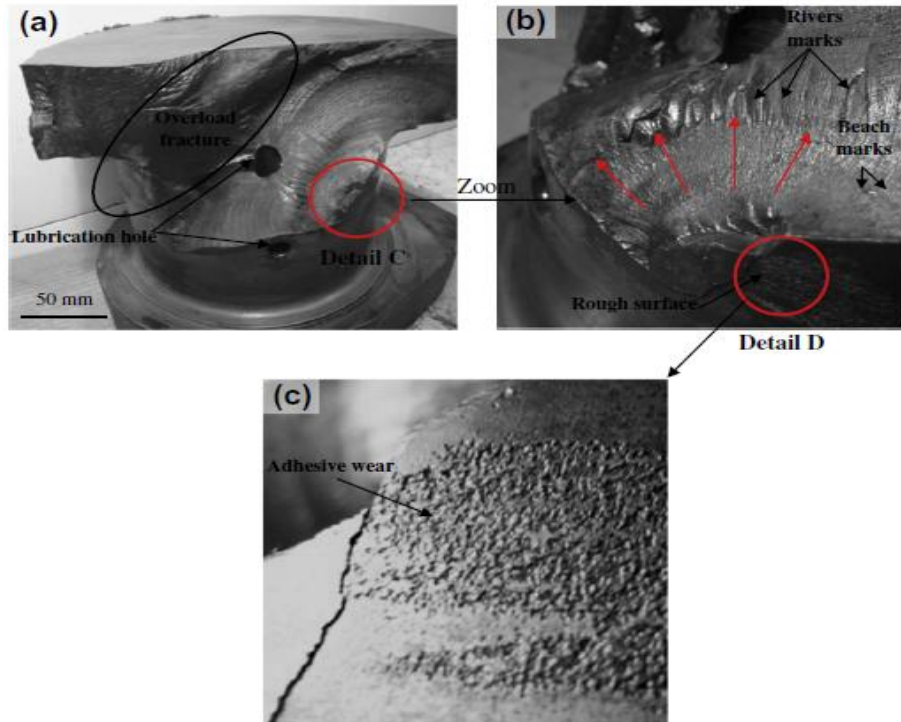
Ακόμα, παρατηρείται ομαλή επιφάνεια γύρω από τα επίμαχα σημεία (A,B) με εμφανή τα σημάδια εξέλιξης (beach marks), που αποδεικνύουν την προοδευτική εξάπλωση του μετώπου της ρωγμής. Στην εικόνα (b), φαίνονται μερικά σήματα εξέλιξης (beach marks) στην επιφάνεια θραύσης, που καταδεικνύουν πολλαπλά σημεία προέλευσης θραύσης. Τα σημάδια αυτά είναι αποτέλεσμα των υψηλών τοπικών τάσεων συγκέντρωσης. Παρατηρώντας τις θέσεις έναρξης ρωγμής κόπωσης, επιβεβαιώνεται ότι, η θραύση του άξονα είναι απόρροια μηχανικών καταπονήσεων (φορτία στρέψης και κάμψης) [18].

Στην περίπτωση του δεύτερου στροφαλοφόρου άξονα θραύση παρουσιάστηκε στο κομμάτι (web) που ενώνει το κύριο στροφέιο (J2) με το κομβίο (P1)(βλ. σχ. 3.1.11).

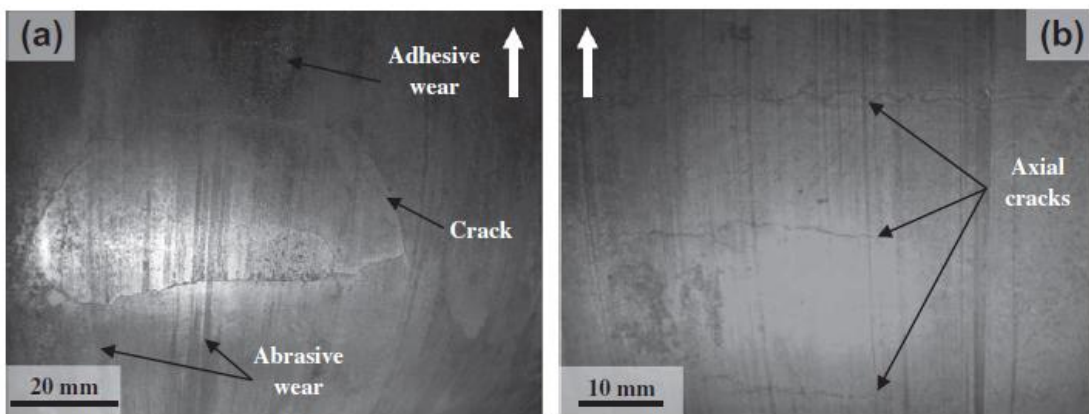


Σχ. 3.1.11 Σημείο θραύσης στροφαλοφόρου Νο 2

Από την οπτική εξέταση του σημείου θραύσης, παρατηρήθηκε ότι το σημείο έναρξης βρισκόταν πάνω στο κύριο στροφέιο και η θραύση του πραγματοποιήθηκε λόγω της κόπωσης [18].



Σχ. 3.1.12 (a) Επιφάνεια θραύσης, (b) μεγέθυνση της λεπτομέρειας (c) της εικόνας (a), (c) επιφάνεια φθοράς κόλλησης (adhesive wear).



Σχ. 3.1.13 Επιφάνεια αστοχίας κύριου τροφείου (το άσπρο βέλος δείχνει την διεύθυνση ολίσθησης).
(a) Ελαττώματα επιφάνειας, (b) επισήμανση παράλληλων ρωγμών και φθορά τριβής επαφής.

Η παρατήρηση της ελαττωματικής επιφάνειας του τροφαλοφόρου αποδεικνύει ότι, η επαφή του κύριου τροφείου με το έδρανο είχε σημαντικό ρόλο σχετικά με το αίτιο αστοχίας. Παρατηρώντας την τραχιά επιφάνεια στις παραπάνω

εικόνες προκύπτει ότι, είναι πιθανή συνέπεια της φθοράς κόλλησης (adhesive wear), που δημιουργείται μεταξύ στροφείου και ρουλεμάν. Αυτός ο μηχανισμός φθοράς όχι μόνο καταστρέφει τις ολισθαίνουσες επιφάνειες, αλλά προκαλεί και φθορά τριβής (σχ. 3.13a). Ο συγκεκριμένος τύπος φθοράς ποικίλλει από μικροσκοπικά σκασίματα σε σοβαρό θρυμματισμό [18].

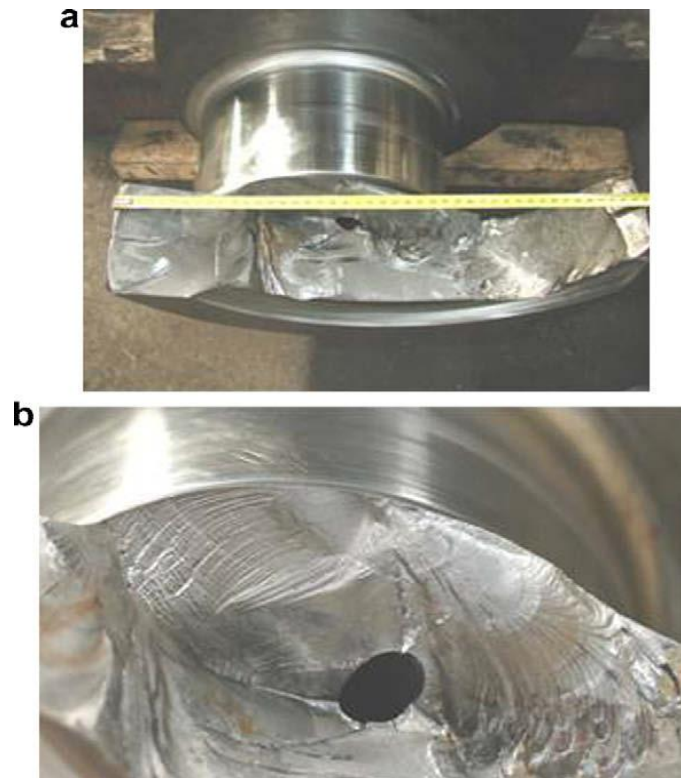
Η επόμενη περίπτωση αφορά μια καταστροφική αστοχία στροφαλοφόρου άξονα ενός πλοίου. Το υλικό του άξονα είναι υψηλής ποιότητας χάλυβας ($42CrMo4 + Ni + V$). Από την εξέταση του άξονα βρέθηκε ότι, οι προδιαγραφές του ήταν εντός προβλεπόμενων ορίων. Ο στροφαλοφόρος άξονας αστόχησε έπειτα από 32.834 ώρες λειτουργίας και η θραύση προκλήθηκε στο 4^ο κομβίο και στο κύριο στροφείο λόγω περιστροφικής κάμψης [19].



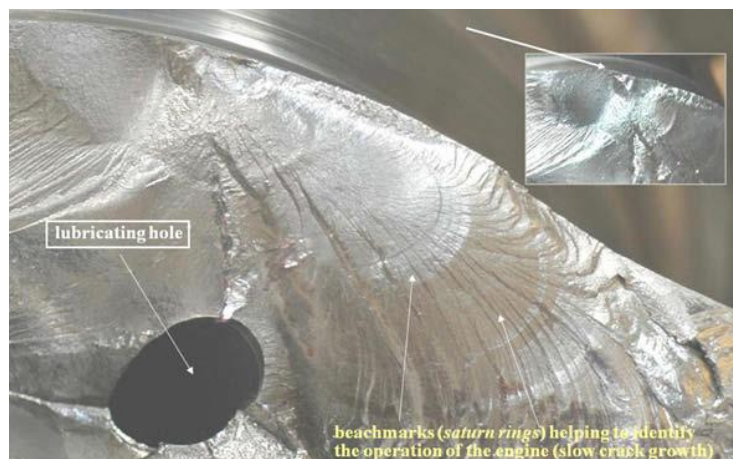
Σχ. 3.1.14 Αστοχία στο 4^ο κομβίο του στροφαλοφόρου άξονα.

Η μορφολογία της επιφάνειας θραύσης παρουσιάζει δύο διαφορετικές επιφάνειες. Μια «σχεδόν» κάθετη στο τμήμα του κομβίου και μια άλλη σε οριζόντιο επίπεδο (παράλληλα) με τον άξονα του στροφαλοφόρου. Η τελευταία εξ αυτών ανταποκρίνεται στην επιφάνεια της τελικής θραύσης του υλικού. Η άλλη επιφάνεια

παρουσιάζει τυπικά σημάδια κόπωσης, χαρακτηριστικά της οποίας είναι τα ημικυκλικά σημάδια στην αρχή της ρωγμής [19].



Σχ. 3.1.15: Επιφάνεια θραύσης (a) τελική θραύση παράλληλη στον άξονα και (b) ανάπτυξη ρωγμής κόπωσης στον άξονα.



Σχ.3.1.16: Σημείο έναρξης ρωγμής και σημάδια ρωγμών (beachmarks) της ανάπτυξης της ρωγμής.

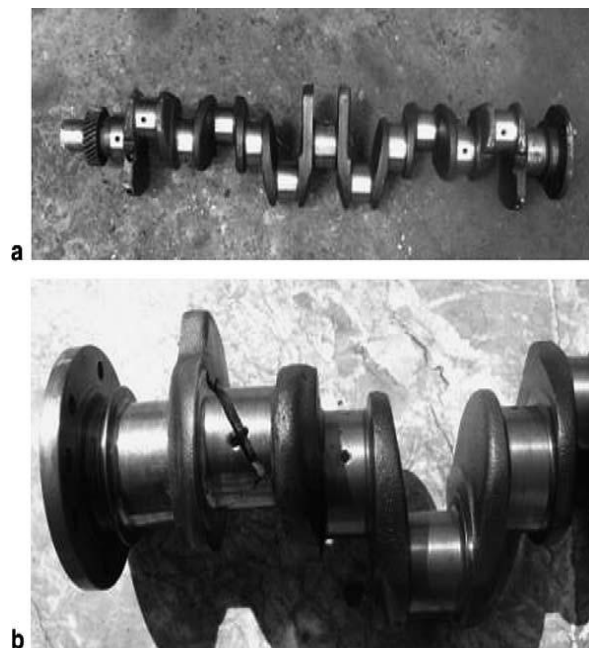
Σε αυτήν την περίπτωση θα μπορούσαμε να πούμε ότι, η καταστροφική αστοχία του στροφαλοφόρου άξονα προήλθε από ένα συνδυασμό περιστροφικής

κάμψης και σταθερής κόπωσης. Η θραύση έλαβε χώρα ανάμεσα στο 4^ο κομβίο και στο κύριο στροφείο. Η εξέταση του υλικού, όσον αφορά κάποιο ελάττωμα ή κάποια εγκλείσματα ήταν αρνητική, καθώς επίσης και η σκληρότητα του ήταν σε καλά επίπεδα, για τη συγκεκριμένη ποιότητα υλικού. Μετά τη έναρξη της ρωγμής από την περιστροφική κάμψη, η σταθερή στρέψη απέκτησε σημαντικές διαστάσεις. Παρόλα αυτά, δεν είναι ακόμα ξεκάθαρη η αιτία που οδήγησε σε θραύση [19].

3.2: Περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας λόγω λανθασμένων κατεργασιών

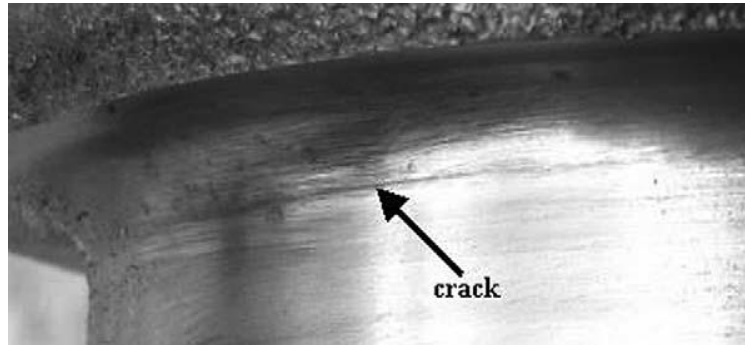
Παρακάτω, αναλύονται διάφορες περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας λόγω λανθασμένων κατεργασιών, παραδείγματος χάριν αξόνων από όλκιμο χυτοσίδηρο, χάλυβα κτλ.

Σε αυτήν την περίπτωση, αναλύεται η αστοχία ενός άξονα από όλκιμο χυτοσίδηρο που έχει υποστεί επαγωγική σκλήρυνση, με θραύση πριν από την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του [20].



Σχ. 3.2.1: Εικόνα στροφαλοφόρου (a) και (b) μεγεθυμένη περιοχή θραύσης του στροφαλοφόρου.

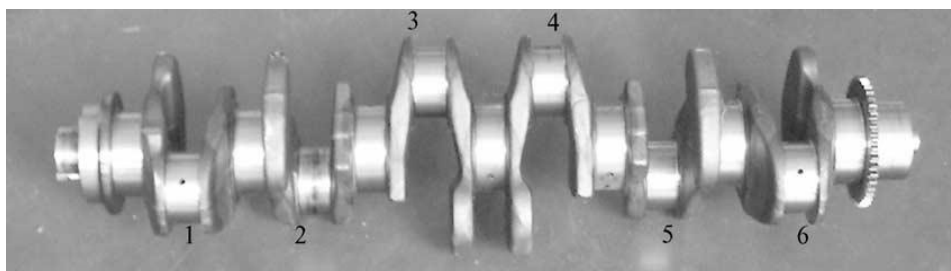
Όπως παρατηρούμε, ο συγκεκριμένος άξονας έσπασε σε δύο κομμάτια στο τμήμα του ένωσης του κομβίου με το αντίβαρο (crankpin-web fillet region), καθώς εκεί συγκεντρώνονται συνήθως οι τάσεις [20].



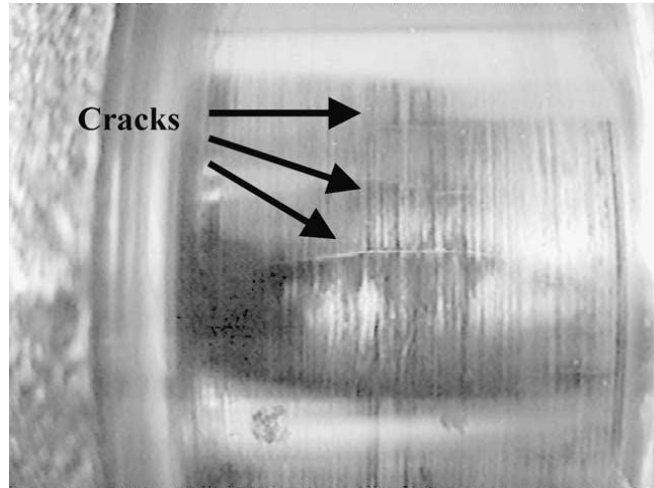
Σχ. 3.2.2 Μεγεθυμένη εικόνα της ρωγμής στο τμήμα κομβίου-φιλέτου (crankpin-web fillet region).

Μετά από τις απαραίτητες αναλύσεις διαπιστώθηκε ότι, η περιοχή που ενώνεται το κομβίο με το αντίβαρο δεν είχε σκληρυνθεί επιτυχώς κατά τη διαδικασία της επαγωγικής σκληρύνσεως. Η σύσταση και η μικροδομή αποκαλύπτουν ότι, το μέταλλο δεν πληρούσε τις προδιαγραφές. Η θραύση ήταν αποτέλεσμα της μη σωστής θερμικής επεξεργασίας, που επήλθε σε θραύση από κόπωση, λόγω περιστροφικής κάμψης. Όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση της αντοχής του οδήγησε στην πρόωρη αστοχία του [20].

Στην επόμενη περίπτωση έχουμε θραύση στροφαλοφόρου άξονα μετά από επιδιόρθωση. Εμφανίζεται το φαινόμενο της θερμικής κόπωσης στο στροφείο του άξονα, κατά την επεξεργασία, στη φάση της λείανσης. Στα παρακάτω σχήματα, φαίνεται η αστοχία στο στροφείο 2 του άξονα [21].



Σχ. 3.2.3 Θραύση στροφαλοφόρου (θέση 2).



Σχ. 3.2.4 Μεγεθυμμένη όψη 2ου στροφείου του στροφαλοφόρου.

Μετά από την ανάλυση, το συμπέρασμα που εξήχθη είναι ότι η βλάβη του στροφείου προήλθε από μικρές ρωγμές στην επιφάνεια τους. Οι ρωγμές αυτές δημιουργήθηκαν από θερμική κόπωση (υπερθέρμανση), κατά τη διάρκεια της λείανσης [21].

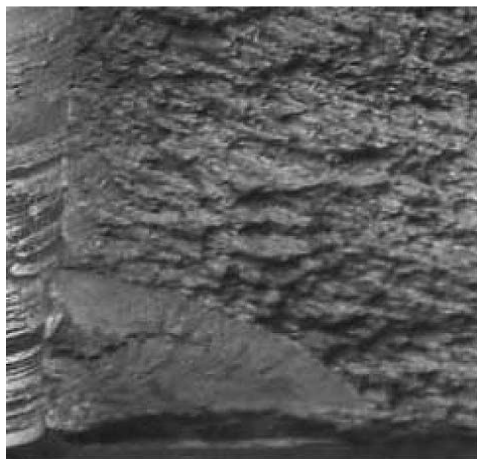
Παρακάτω, εξετάζεται ένας ανακατασκευασμένος στροφαλοφόρος άξονας. Βρέθηκε ότι, η θραύση ήταν αποτέλεσμα κακής επιδιόρθωσης του στροφείου και της οπής διάνοιξης (αναντιστοιχία οπής διάνοιξης-οπής λαδιού), δημιουργώντας ένα «σκαλοπάτι» μεταξύ τους [22].



Σχ. 3.2.5 Η επιφάνεια θραύσης του στροφείου (αναντιστοιχία οπής διάνοιξης- οπής λαδιού).

Μέσω της αστοχίας αυτής τονίζεται η εξειδικευμένη γνώση που χρειάζεται η ανακατασκευή και οι παράγοντες που την επηρεάζουν (π.χ. μηχανικές ανοχές, υλικό κατασκευής στροφαλοφόρου, διαδικασία δημιουργίας διαμέτρου στροφείου και η πιθανότητα επιφανειακών κατεργασιών, όπως επαγωγική σκλήρυνση κ.α.) [22].

Στη συνέχεια, θα δούμε μια ασυνήθιστη αστοχία στροφαλοφόρου άξονα μπουλντόζας, κατά τη διάρκεια δοκιμαστικού τεστ. Μετά από μια επιδιόρθωση και συναρμολόγηση του στροφαλοθαλάμου και κατά τη διάρκεια ενός δοκιμαστικού τεστ, χωρίς φορτίο, ο στροφαλοφόρος άξονας από κράμα χάλυβα 40CrMnMo διέρρευσε [23].



Σχ. 3.2.6: Επιφάνεια θραύσης.

Έπειτα από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στον άξονα διαπιστώθηκε ότι, η αστοχία πραγματοποιήθηκε λόγω μη ικανοποιητικής επισκευής και συναρμολόγησης του κινητήρα. Ο άξονας αστόχησε λόγω διατμητικών τάσεων, προκαλούμενων από ασυνήθιστη τριβή, μεταξύ της επιφάνειας του στροφείου και των εδράνων ολίσθησης [23].

Σε μια διαφορετική περίπτωση, αναλύεται η αστοχία του στροφαλοφόρου άξονα ενός πετρελαιοκινητήρα από σφυρηλατημένου χάλυβα 42CrMo. Η αστοχία προκλήθηκε έπειτα από 200 ώρες λειτουργίας [24].



Σχ. 3.2.7: Αστοχία στροφαλοφόρου άξονα.

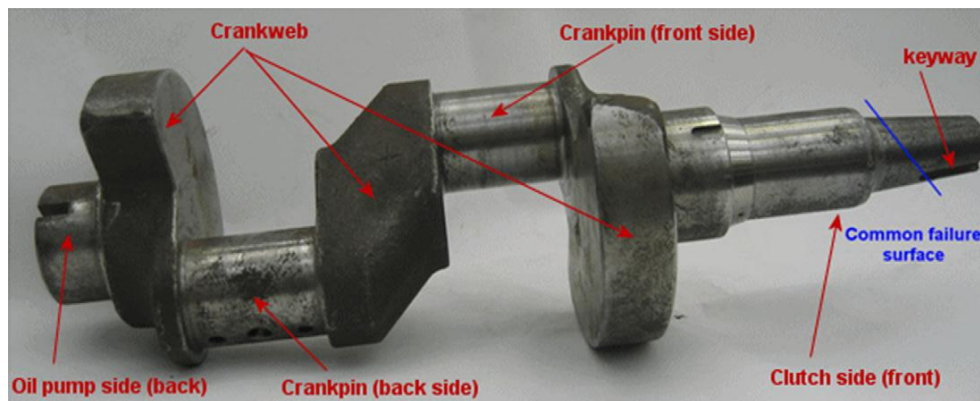
Όπως φαίνεται και από την εικόνα, η θραύση βρίσκεται ανάμεσα στο 2ο (κύριο) στροφείο και στο 2ο κομβίο του άξονα. Από την ανάλυση που διεξήχθη στον στροφαλοφόρο άξονα, (χημική ανάλυση, μηχανικές ιδιότητες και σκληρότητα) βρέθηκε ότι πληρούσε όλες τις τεχνικές προδιαγραφές. Με περαιτέρω ανάλυση που έγινε, για να παρατηρηθεί η περιεκτικότητα σε άζωτο της μικροδομής του χάλυβα, προκειμένου να επιτευχθεί επιφανειακή σκλήρυνση (εναζώτωση) του άξονα, έδειξε ότι, στην περιοχή μεταξύ του 2ου στροφείου και του 2ου κομβίου (περιοχή θραύσης) υπήρξε έλλειψη αυτού [24].

Προφανώς, λόγω αυτού στην περιοχή σύνδεσης του κομβίου με το αντίβαρο (fillet region), το υλικό έχει χαμηλότερες αντοχές κόπωσης, με αποτέλεσμα ευνοϊκότερο πεδίο για έναρξη και διάδοση ρωγμών. Η έλλειψη αυτή οφείλεται στην κατεργασία της λείανσης που έπεται της εναζώτωσης. Αυτή η διαδικασία πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή, για να αποφεύγεται η καταστροφή της επιφανειακής σκλήρυνσης [24].

Τέλος, εξετάζεται η πρώτη αστοχία μεγάλου αριθμού στροφαλοφόρων αξόνων ίδιου μοντέλου, τετρακύλινδρων παλινδρομικών συμπιεστών, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του κλιματισμού σε λεωφορεία. Η ανάλυση περιλαμβάνει οπτική

εξέταση, σκληρότητα και χημική ανάλυση στροφαλοφόρου, καθώς και ένα δυναμικό μοντέλο του συστήματος [25].

Ο στροφαλοφόρος κατασκευάστηκε από (34CrMo4) σφυρηλατημένο κράμα χάλυβα, ως ενιαίο κομμάτι πριν από τη βαφή και την επαναφορά.



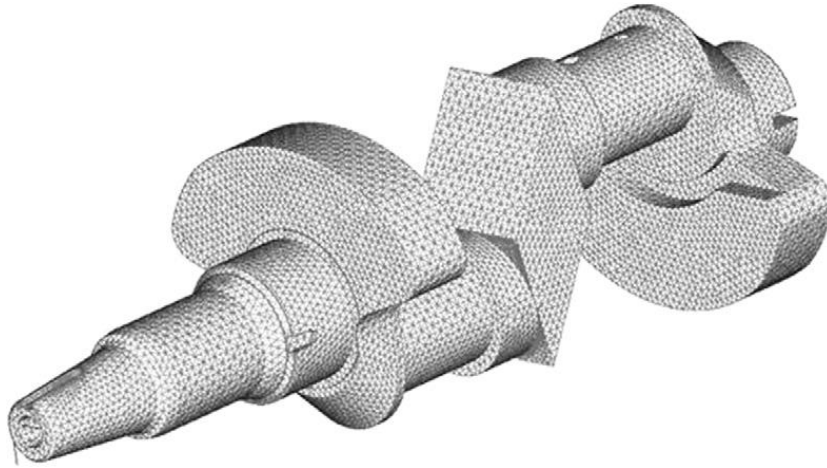
Σχ.. 3.2.8: Στροφαλοφόρος άξονας συμπιεστή

Η επιφάνεια θραύσης έχει λάβει χώρα υπό γωνία περίπου 45 μοίρες ως προς τον άξονα περιστροφής του στροφαλοφόρου και είναι ψαθυρού τύπου.



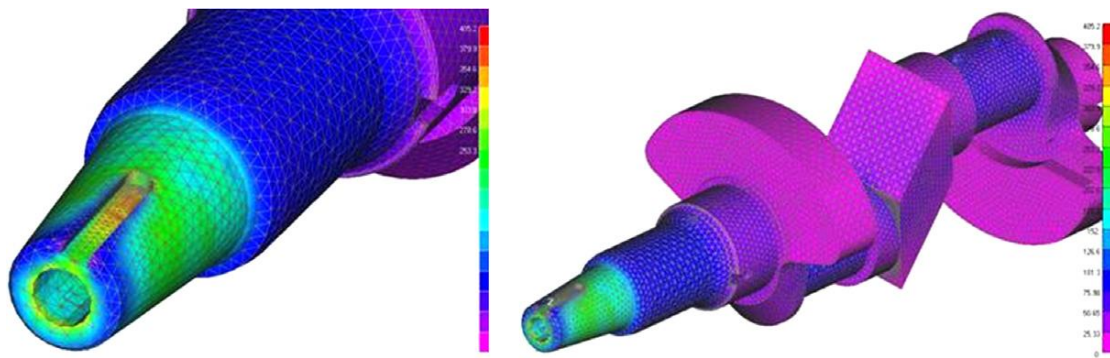
Σχ.3.2.9 : Απεικόνιση επιφάνειας θραύσης

Το πλέγμα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η ακαμψία του στροφαλοφόρου άξονα όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί [25].



Σχ. 3.2.10: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στροφαλοφόρου άξονα.

Το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιείται στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης για την εκτίμηση των επιπέδων των τάσεων στον άξονα, καθώς επίσης και το ισοδύναμο μοντέλο της κατανομής τάσεων (von Mises), το οποίο περιλαμβάνει μόνο στρεπτικά φορτία [25].



Σχ. 3.2.11: Μοντέλο κατανομής τάσεων.

Η εμφάνιση της θραύσης είναι απόρροια της υπερβολικής περιστροφικής δύναμης. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίστηκαν στην περιοχή του «αυλακιού» και αυτή η περιοχή σχετίζεται με τα περισσότερα περιστατικά θραύσης των στροφαλοφόρων αξόνων λόγω της γεωμετρίας της [25].

Συμπεράσματα

Από την παραπάνω έρευνα που πραγματοποιήθηκε, βγαίνει το συμπέρασμα ότι, οι περιπτώσεις αστοχιών λόγω κόπωσης, και λόγω λανθασμένων κατεργασιών/επεξεργασιών έχουν την ίδια συχνότητα εμφάνισης. Οι στροφαλοφόροι άξονες που εξετάστηκαν παραπάνω, αφορούν κυρίως χαλύβδινους άξονες διάφορων ποιοτήτων (πχ. σφυρηλατημένοι χάλυβες σφυρηλατημένα κράματα αυτών, χάλυβες μέσου άνθρακα κλπ.), καθώς επίσης, και μια περίπτωση από χυτοσίδηρο. Οι διάφορες ποιότητες χαλύβων, έχουν να κάνουν με τις εκάστοτε απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Συμπεραίνουμε ότι, ο χάλυβας είναι το πιο συνηθισμένο υλικό κατασκευής στροφαλοφόρων αξόνων. Οι μισές από τις παραπάνω περιπτώσεις αστοχίας, έχουν να κάνουν με μη σωστή επεξεργασία/κατεργασία. Λόγω αυτού, και της δυσκολίας στη διαδικασία της επεξεργασίας, είναι ανάγκη να εκπαιδευτούν/εξειδικευτούν τα άτομα που ασχολούνται με τις κατεργασίες/επεξεργασίες των μετάλλων, ώστε να περιοριστούν οι αστοχίες αυτού του είδους.

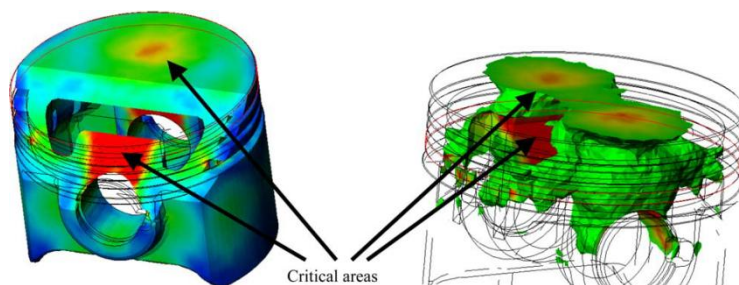
Κεφάλαιο 4^ο : Περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας σε έμβολα

Τα έμβολα, είναι ίσως τα πιο καταπονούμενα στοιχεία μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, και αποτελούν τα κυριότερα εξαρτήματα αυτής. Δέχονται κυρίως θερμικά φορτία λόγω της καύσης του μείγματος (έως 400 °C), με αποτέλεσμα να υπάρχουν υψηλές πιέσεις (έως 200 bar) φαινόμενα τριβής και υψηλή θερμοκρασία. Οι αστοχίες εμβόλων, οφείλονται κυρίως στα αίτια αυτά, πράγμα αναμενόμενο, εξαιτίας του περιβάλλοντος λειτουργίας τους. Μια σύνοψη περιπτώσεων με τα πιο συνηθισμένα σημεία θραύσης λόγω κόπωσης, σε έμβολα κινητήρων εσωτερικής καύσης, θα παρουσιαστούν παρακάτω [26]. Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε κάποιες περιπτώσεις από έμβολα μηχανών εσωτερικής καύσης που υπέστησαν αστοχία καταστροφική ή μη. Η κυριότερη αιτία των παρακάτω αστοχιών αυτών είναι η κόπωση.

Στη συγκεκριμένη έρευνα, παρουσιάζονται μόνο έμβολα αλουμινίου λόγω της ευρύτερης χρήσης τους. Το σύνολο των περιπτώσεων αυτών χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: α) στη μηχανική/υψηλής θερμοκρασίας μηχανική θραύση και β) σε θερμική/θερμική-μηχανική θραύση [26].

Α)Μηχανική/υψηλής θερμοκρασίας μηχανική κόπωση.

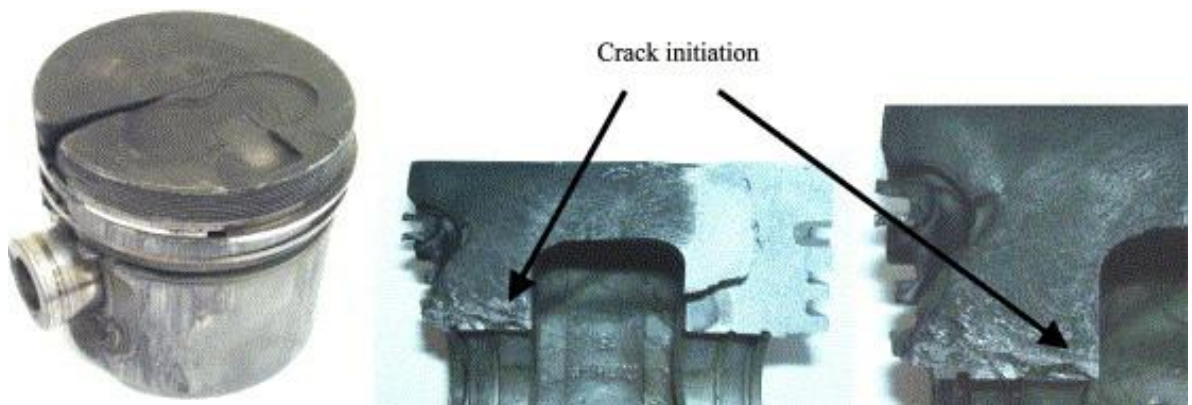
Σε ένα έμβολο οι τάσεις δημιουργούνται λόγω εξωτερικών φορτίων (καύση μείγματος), που δρουν σε αυτό. Τα πιο συνηθισμένα/κρίσιμα σημεία επιβολής τάσεων φαίνονται παρακάτω.



Σχ. 4.1: Τυπική κατανομή τάσεων σε έμβολο μηχανής.

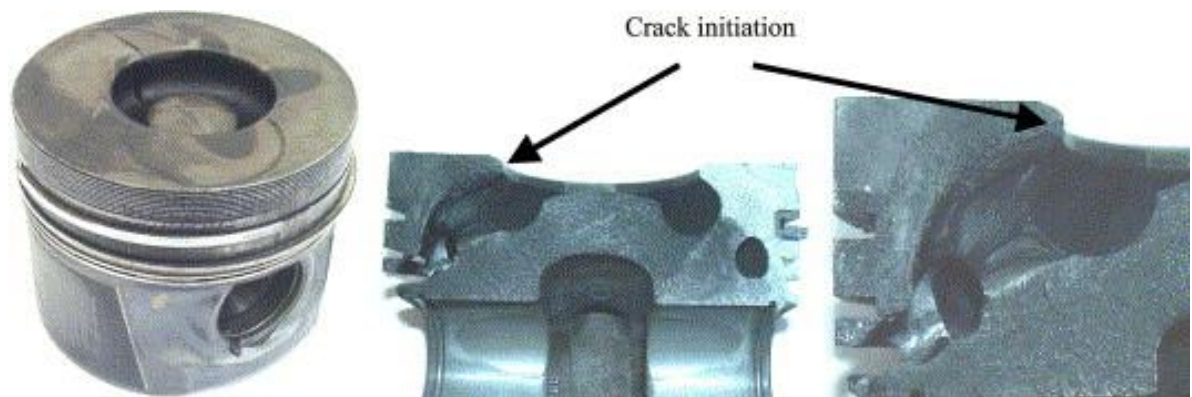
Παρατηρείται ότι, οι δύο κρίσιμες περιοχές στο έμβολο, βρίσκονται στο επάνω μέρος της επιφάνειας του εμβόλου κάτω από τον πείρο συγκράτησης, καθώς επίσης ως κρίσιμες χαρακτηρίζονται και τα (δύο) σημεία επαφής του πείρου συγκράτησης με το έμβολο [26].

Περίπτωση θραύσης ενός εμβόλου, με έναρξη ρωγμής την οπή του πείρου συγκράτησης, και διάδοση της, μέχρι τη κεφαλή του εμβόλου.



Σχ. 4.2: Έμβολο κινητήρα βενζίνης με μια ρωγμή από τη μία πλευρά της οπής του πείρου και κατάληξη στην κεφαλή του εμβόλου.

Έπειτα παρουσιάζονται δύο εικόνες με έναρξη ρωγμής στην κεφαλή του εμβόλου.

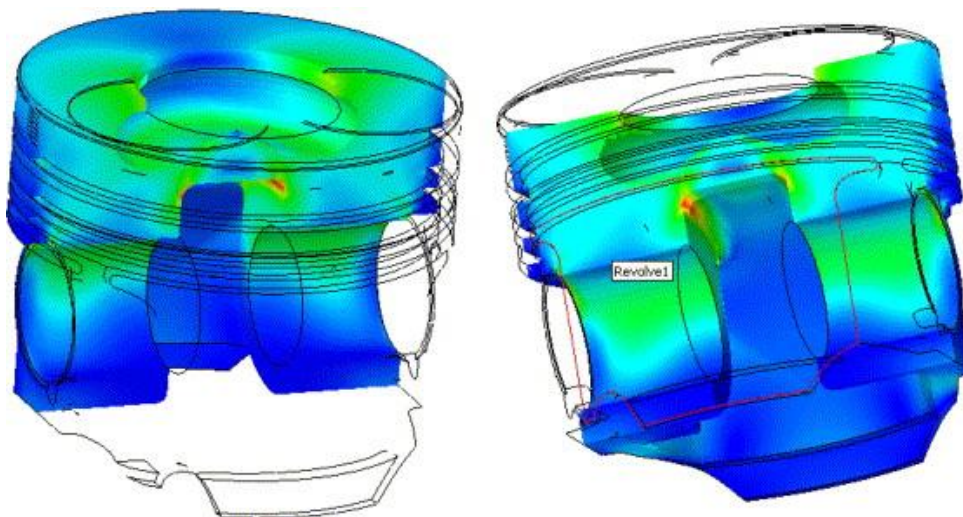


Σχ. 4.3: Έμβολο πετρελαιοκινητήρα με έναρξη ρωγμής στην κεφαλή του.



Σχ. 4.4: Έμβολο περελαιοκινητήρα με ρωγμή από την μια μεριά της οπής μέχρι την άλλη μέσω της ρωγμής στην κεφαλή του.

Από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του εμβόλου στο (σχ. 4.4), βρέθηκε ότι τα έμβολα που έχουν κοίλωμα στην κεφαλή, εκτός από τις συγκεντρώσεις τάσεων στην οπή του πείρου εμφανίζουν και σε δύο ακόμα περιοχές στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει τις οπές του πείρου [26].

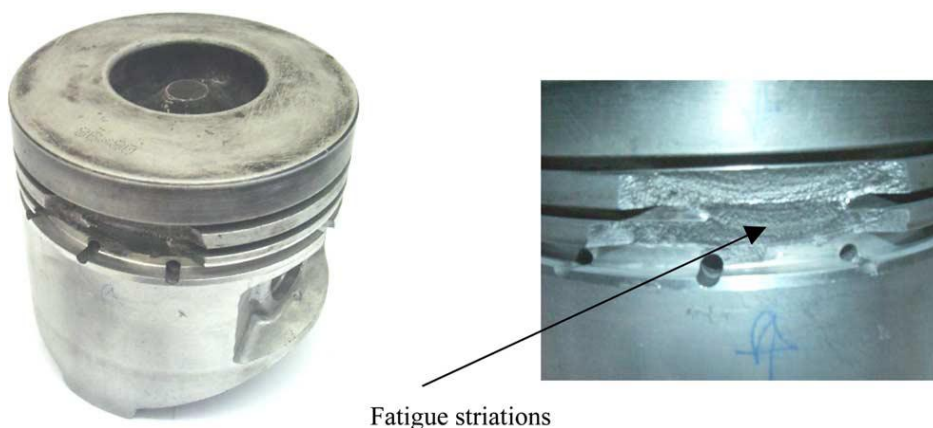


Σχ. 4.5: Γραμμική στατική κατανομή τάσεων του εμβόλου στο σχ. 4.4.

Η μηχανικές βλάβες στην κεφαλή και στην οπή του πείρου, ευθύνονται για πολλές καταστροφές εμβόλων. Οι στατικές τάσεις, εμφανίζονται κυρίως στην οπή συγκράτησης του εμβόλου. Ο λόγος για τον οποίο η ρωγμή εμφανίζεται στην κεφαλή (χείλος κοιλώματος) (σχ. 4.3&4.4) και όχι στην οπή του πείρου, πιθανά οφείλεται στη

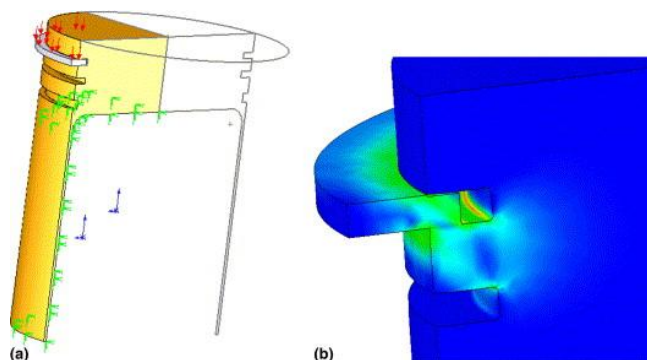
μηχανική κόπωση και στη μηχανική κόπωση λόγω υψηλής θερμοκρασίας. Έτσι, ανάλογα με την ιδιαίτερη γεωμετρία του κάθε εμβόλου, και λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις στατικές τάσεις, και την επίδραση της θερμοκρασίας στην αντίσταση του υλικού, είτε η περιοχή οπής του πείρου, είτε η περιοχή χείλους του κοιλώματος, μπορεί να χαρακτηριστεί κρίσιμη [26].

Μια συνηθισμένη περίπτωση αστοχίας, εμφανίζεται στα αυλάκια συμπίεσης του εμβόλου. Αυτού του τύπου οι αστοχίες, οφείλονται κυρίως στην κόπωση, όπως και στην εν λόγω περίπτωση.



Σχ. 4.6: Έμβολο με θραύση αυλακίων συμπίεσης.

Από τις εμφανείς ραβδώσεις (της εικόνας του σχήματος 4.6) στην περιοχή θραύσης γίνεται αντιληπτό, ότι πρόκειται για μηχανισμό κόπωσης. Μέσω προσομοίωσης του εμβόλου, γίνεται η ανάλυση των τάσεων στα αυλάκια του [26].



Σχ. 4.7: Κατανομή τάσεων στις ακτίνες καμπυλότητας των αυλακίων.

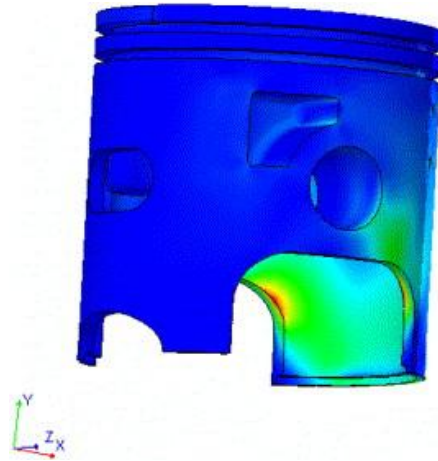
Γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι όσο πιο μέσα στο αυλάκι βρίσκεται ο δακτύλιος σύσφιξης τόσο μικρότερες είναι και οι τάσεις που ασκούνται στο αυλάκι. Βάσει αυτών που προαναφέρθηκαν διαπιστώνεται ότι οι τάσεις στα αυλάκια, είναι άμεσα εξαρτημένες από την ανοχή του εμβόλου και του κυλίνδρου. Με μεγαλύτερη ανοχή του εμβόλου με τον κύλινδρο, έχουμε αύξηση τάσεων στα αυλάκια (σχ. 4.7b), άρα οι τάσεις στα αυλάκια ενός εμβόλου, σχετίζονται με τη φθορά του κυλίνδρου της μηχανής [26].

Στην παρακάτω περίπτωση, εμφανίζεται φθορά στο κάτω μέρος του εμβόλου (piston skirt), από την επαφή του με τον κύλινδρο.



Σχ. 4.8: Κατεστραμμένο έμβολο με ρωγμή στο τελείωμα του: (a) έμβολο, και (b) σημείο επαφής με τον κύλινδρο.

Η έναρξη της ρωγμής που φαίνεται και στο σχήμα 4.8, προέρχεται από την ακτίνα καμπυλότητας στο κάτω μέρος του εμβόλου. Για τον προσδιορισμό των τάσεων στο σημείο αυτό, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης, για συγκεκριμένη γωνία σε σχέση με το κάθετο επίπεδο [26].



Σχ.4. 9: Διανομή τάσεων στο κάτω μέρος εμβόλου, με μεγάλη ανοχή σχετικά με τον κύλινδρο.

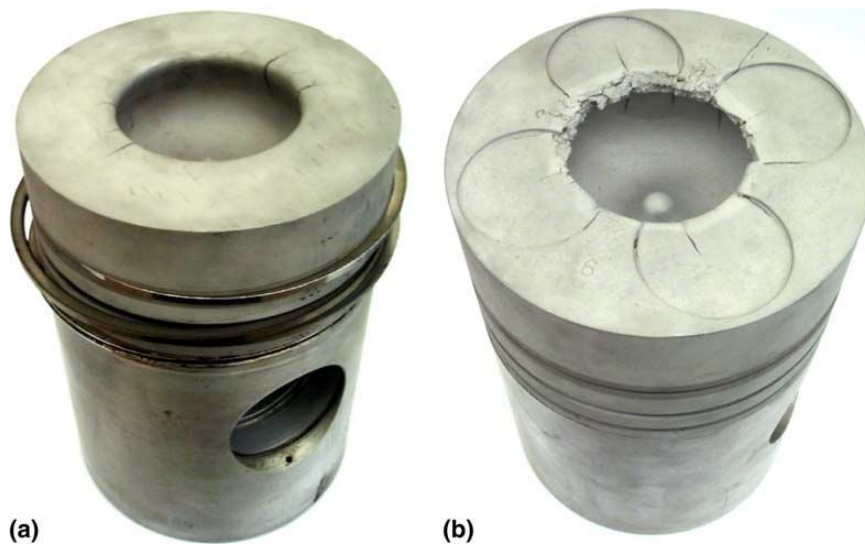
Παρατηρείται ότι, οι τάσεις στην ακτίνα καμπυλότητας στο κάτω μέρος του εμβόλου, είναι μεγαλύτερες όταν υπάρχει μεγάλη γωνία εμβόλου σε σχέση με το κάθετο επίπεδο. Η ανοχή μεταξύ εμβόλου - κυλίνδρου, είναι απαραίτητη για την παλινδρομική κίνηση του. Επιπλέον, τα κύρια σημεία επαφής του εμβόλου με τον κύλινδρο είναι δύο. Ένα στο πάνω μέρος και ένα στο κάτω μέρος του εμβόλου. Στο (σχ. 4.8) φαίνεται το σημείο επαφής του εμβόλου με το τοίχωμα του κυλίνδρου. Αυτή η επαφή δημιουργεί καμπτικά φορτία στην ακτίνα καμπυλότητας του, με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση φορτίων στο σημείο αυτό (σχ. 4.9). Συνεπώς, η αύξηση της ανοχής του συστήματος καθώς επίσης και η «καθαρότητα» των τριβόμενων επιφανειών, έχει άμεση σχέση με τη συγκεκριμένη αστοχία [26].

B) Θερμική/θερμική-μηχανική θραύση

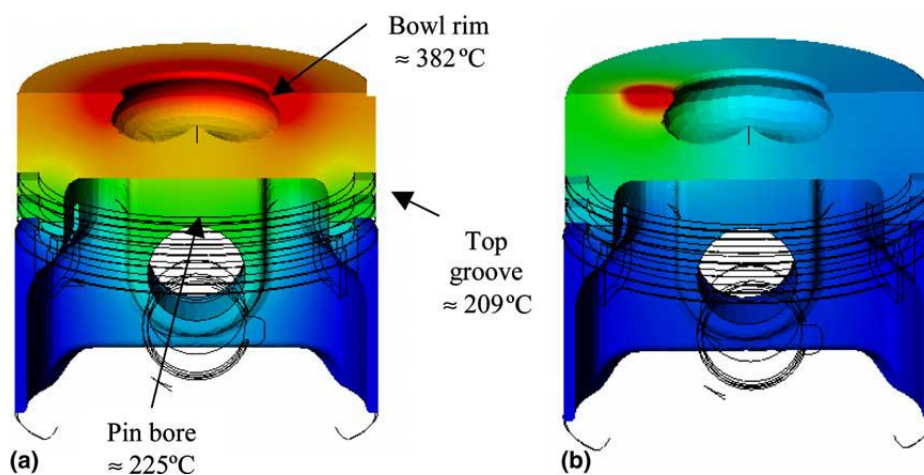
Η θερμική κόπωση, σχετίζεται με τις τάσεις που δημιουργούνται σε ένα εξάρτημα/υλικό, λόγω της θερμικής του κλίσης (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σημείων). Οι θερμικές τάσεις σε ένα έμβολο, είναι δύσκολο να προσομοιωθούν εξαιτίας των δύο διαφορετικών θερμικών καταπονήσεων που δέχεται. Οι

καταπονήσεις αυτές είναι, α)θερμικές τάσεις λόγω κάθετης διανομής θερμοκρασίας κατά μήκος του εμβόλου και β)θερμικές τάσεις λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας στην κεφαλή του εμβόλου [26].

Παρακάτω, παρουσιάζονται δύο έμβολα με αρκετές ρωγμές στην κεφαλή τους, λόγω της θερμικής κόπωσης, καθώς και οι προσομοιώσεις αυτών.



Σχ. 4.10: Ρωγμές στη κεφαλή εμβόλων.



Σχ. 4.11: Σχηματική κατανομή της θερμότητας σε ένα έμβολο. α)ομοιογενής και β)τοπική.

Οι ρωγμές από θερμική κόπωση είναι εύκολο να εντοπιστούν στις περιοχές με κυκλικές θερμικές κλίσεις και σε δίσκους φρένων.

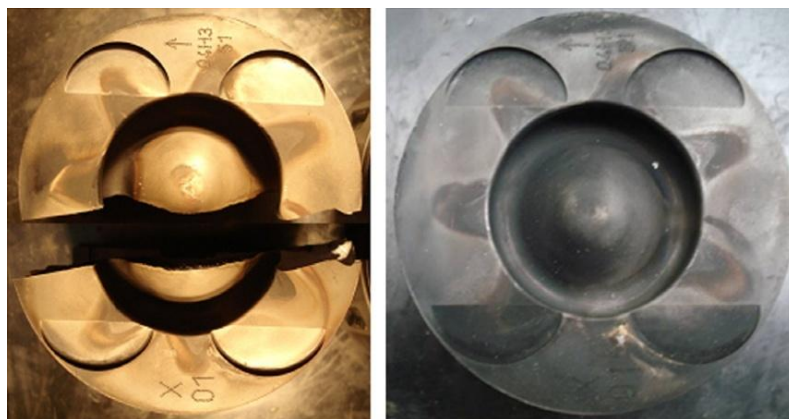
Στη 1^η περίπτωση θερμικών καταπονήσεων (σχ.4.11a) βλέπουμε το πρώτο είδος θερμικών τάσεων οι οποίες ασκούνται στο οριζόντιο επίπεδο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, παρουσιάζει η περιοχή των «χειλιών» του κοιλώματος (bowl rim), όπου συναντάμε την υψηλότερη θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό, δημιουργεί έντονες τάσεις θλίψεως, περιμετρικά στο «χείλος» του κοιλώματος που συχνά υπερβαίνουν το όριο διαρροής του. Έπειτα από τη χαλάρωση των θλιπτικών τάσεων, και όταν το έμβολο ψύχεται, παραμένουσες τάσεις εφελκυσμού επανέρχονται ως αποτέλεσμα της επίδρασης του ερπυσμού στο «χείλος» του κοιλώματος. Αυτές οι κυκλικές τάσεις προκαλούν τις απαρχές ρωγμών, περιμετρικά του «χείλους». Σε αυτή την περίπτωση αναμένεται, έντονη κόπωση με εμφάνιση ρωγμών ακτινικά, της επιφάνεια της κεφαλής του εμβόλου [26].

Στη 2^η περίπτωση θερμικών καταπονήσεων, οι θερμικές τάσεις ασκούνται στο κάθετο επίπεδο όπως διαφαίνεται στο σχήμα 4.11b. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται θερμότερες περιοχές τοπικά. Η διαδικασία κατά την οποία δημιουργούνται οι ρωγμές, είναι ίδια με αυτήν της πρώτης περίπτωσης, με τη διαφορά ότι οι θερμότερες περιοχές παρουσιάζουν μεγαλύτερες θλιπτικές ακολουθούμενες από μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις. Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση, σχηματίζονται ρωγμές σε συγκεκριμένες περιοχές της κεφαλής του εμβόλου, στις οποίες έχουμε εντονότερη θερμοκρασιακή διαβάθμιση [26].

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε αστοχίες που σχετίζονται με έμβολα κινητήρων πετρελαίου. Τα έμβολα αυτά, υποβάλλονται σε δοκιμές εξαιρετικά έντονων κυκλικών φορτίων και ταχύτητας, με διάρκεια 1000 ωρών. Κυρίως, θα αξιολογηθεί η επίδραση

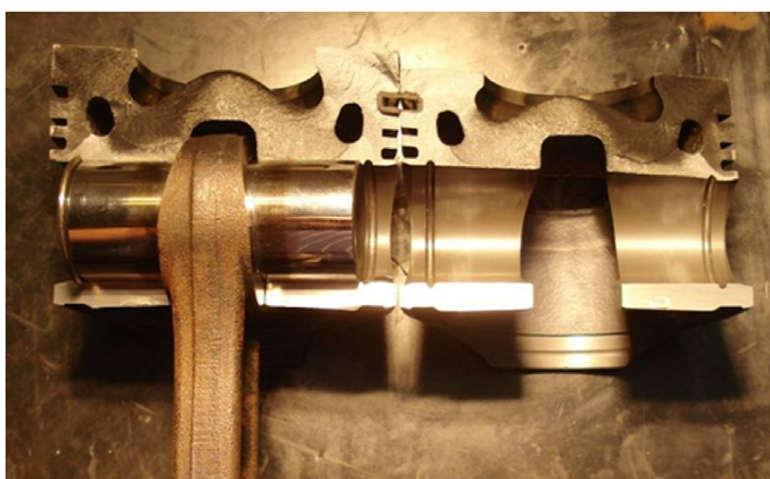
διάφορων τύπων καυσίμων, όσον αφορά την αντοχή των στοιχείων του συστήματος, σε κινητήρες ντίζελ επιβατικών αυτοκινήτων [27].

Όλες οι κεφαλές των εμβόλων έχουν ένα αποτύπωμα καύσης που προκύπτει, από τους εγχυτήρες καυσίμου, όπως φαίνεται παρακάτω. Το αποτύπωμα στην κεφαλή των εμβόλων, εμφανίζεται σαν μια ένδειξη δεξιόστροφου στροβιλισμού.



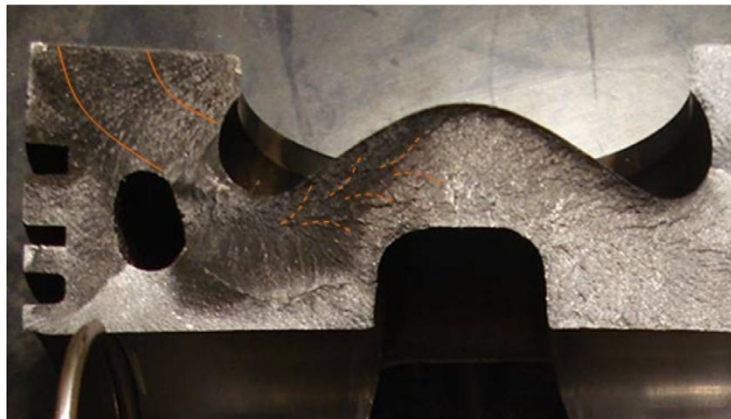
Σχ. 4.12: Απεικόνιση ενός εμβόλου με αστοχία και ενός με μη αστοχία, τονίζοντας το σχέδιο καύσης πάνω στην κεφαλή του εμβόλου.

Η αρχική εξέταση του εμβόλου που αστόχησε, αποκάλυψε ότι η αστοχία έλαβε χώρα κατά μήκος του πείρου του εμβόλου [27].



Σχ. 4.13: Αστοχία εμβόλου τονίζοντας την αστοχία τομής διαμετρικά του πείρου.

Επιπλέον, παρατηρούνται σημάδια τύπου «βέλους» (Chevron marks) που προδίδουν την προέλευση της ρωγμής, δείχνοντας ότι, η αρχή της βρίσκεται στο χείλος (πάνω μέρος) του κοιλώματος του εμβόλου του κινητήρα (όπως φαίνεται στο σχ.4.14).

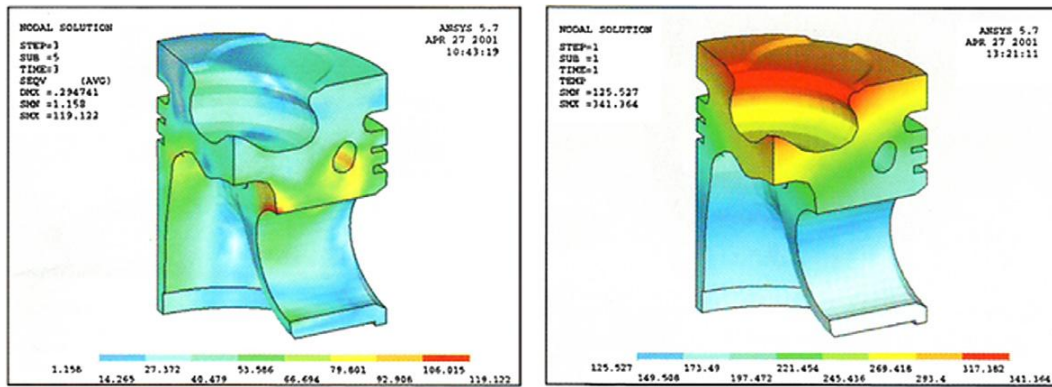


Σχ. 4.14: Επιφάνεια θραύσης με τα σημάδια τύπου «βέλους» (Chevron marks) να απεικονίζονται με διακεκομμένες γραμμές προσδιορίζοντας την περιοχή προέλευσης και διάδοσης της ρωγμής.

Φαίνονται επίσης και κάποια άλλα σημάδια (Clameshell marks) με συνεχείς γραμμές.

Οι χαρακτηριστικές ενδείξεις Clameshell marks γνωστές και ως Beach marks, που συνδέονται με τους μηχανισμούς κόπωσης και διάδοσης ρωγμής, ήταν εμφανής σε περιοχές με λιγότερη επιρροή από τα αέρια καύσης. Η προσεκτικότερη εξέταση της κεφαλής του εμβόλου αποκάλυψε περιοχές με μικρό σκασίματα. Έτσι, για να διευκρινιστούν τα αίτια της θραύσης, χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM). Με την βοήθεια της ηλεκτρονικής σάρωσης, παρουσιάστηκαν ραβδώσεις κόπωσης σε κάποιες περιοχές, όπως επίσης και σημάδια διάβρωσης στην επιφάνεια της κεφαλής του εμβόλου, ως απόρροια μικρό-ρωγμών, που είναι συνέπεια της θερμικής κόπωσης [27].

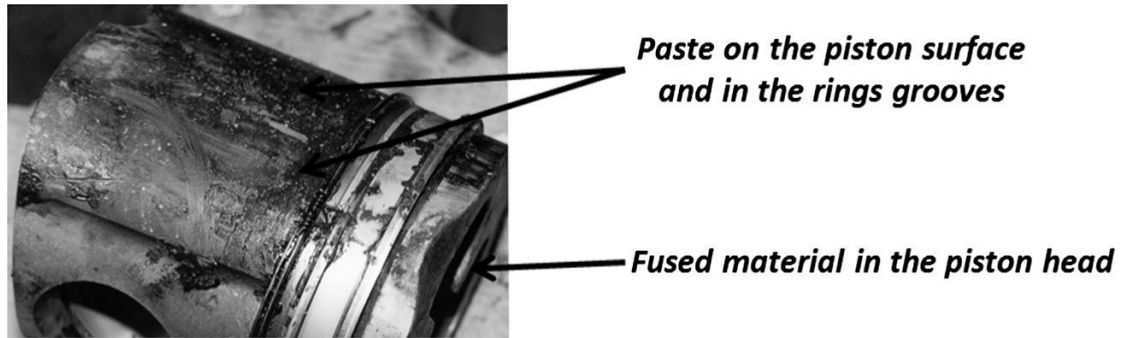
Το υλικό του εμβόλου ήταν κράμα αλουμινίου και η σύνθεση του πληρούσε τις προδιαγραφές. Επιπλέον, γίνεται προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου για τον προσδιορισμό των τάσεων και της θερμοκρασίας του εμβόλου.



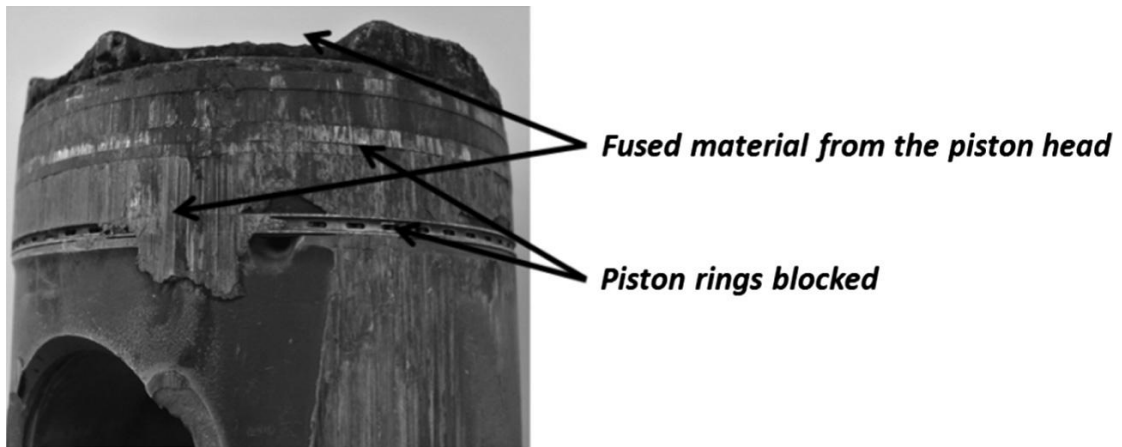
Σχ. 4.15: Περίγραμμα εμβόλου που απεικονίζει τη διανομή, των τάσεων (αριστερά) και της θερμοκρασίας (δεξιά), ενός εμβόλου πετρελαιομηχανής υπό συνδυασμένο φορτίο.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι, η περιοχή του χείλους του κοιλώματος σε ένα έμβολο είναι η πιο κρίσιμη, ειδικά όταν υποβάλλεται σε εναλλασσόμενες συνθήκες υψηλής και χαμηλής φόρτισης, όπως σε μια κυκλική δοκιμή αντοχής. Η θερμική και η μηχανική φόρτιση του εμβόλου, υπό το καθεστώς των εξαντλητικών αυτών δοκιμών, ήταν εξαιρετικά έντονη, οδηγώντας το έμβολο στα όρια του σχεδιασμού του. Η αστοχία εμφανίστηκε επιφανειακά στο χείλος του κοιλώματος. Η έναρξης της ρωγμής ξεκίνησε από «θερμικές» μικρό-ρωγμές και μαζί με τη διάβρωση των σωματιδίων πυριτίου, οδήγησε στο όριο του ελαττώματος, καθώς επίσης και στη διάδοση ρωγμής από θερμομηχανική κόπωση και διακύμανση (υψηλή και χαμηλή φόρτιση). Η θραύση ήταν ψαθυρού τύπου στο κρίσιμο μήκος ρωγμής [27].

Ακόμα, θα μελετηθεί μια περίπτωση αστοχίας εμβόλου σε στατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης, που χρησιμοποιεί ως καύσιμο, αέρια χωματερής. Οι βλάβες εμφανίζονται κυρίως, στη κεφαλή και στα αυλάκια αυτού. Παρακάτω βλέπουμε μερικές εικόνες του εμβόλου [28].



Σχ. 4.16: Έμβολο με μαλακή πάστα στην επιφάνεια και στα αυλάκια του, και σύντηξη υλικού στην κεφαλή του.

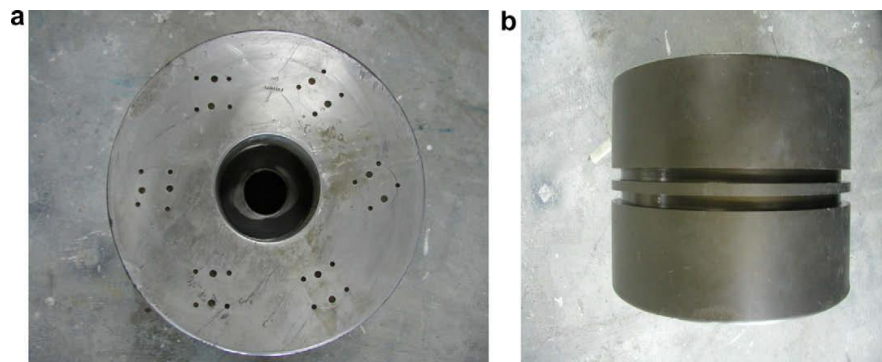


Σχ. 4.17: Έμβολο με σοβαρή σύντηξη υλικού στην κεφαλή και μπλοκαρισμένα δαχτυλίδια.

Στα σχήματα, παρατηρούνται οι γρατζουνιές του εμβόλου, καθώς επίσης και η σύντηξη υλικού στην κεφαλή του εμβόλου. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι αιτίες των βλαβών στις επιφάνειες των κινητήρων, γίνεται μια προσπάθεια εξέτασης/ανάλυσης των επιθεμάτων αυτών. Από την ανάλυση του αερίου χωματερής συμπεραίνεται ότι, οι σιλοξάνες (χημική ένωση που υπάρχει στα αέρια καυσίμων αυτού του τύπου) αποσυντίθενται μέσα στο θάλαμο καύσης, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, σε φορμαλδεΰδη και πυριτικό οξύ. Αυτά τα δύο στοιχεία, και ειδικά η φορμαλδεΰδη, είναι πολύ ενεργά και αντιδρούν με το λάδι των επιφανειών του κυλίνδρου και του εμβόλου και με το μεθάνιο που περιέχεται στο αέριο χωματερής στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Οι σιλοξάνες που εμφανίζονται στο αέριο

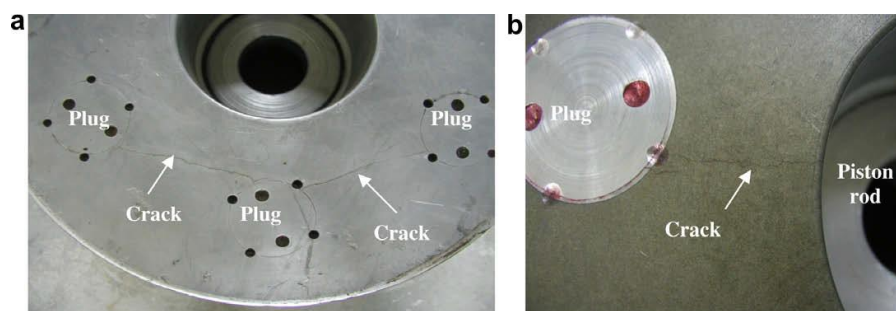
χωματερής, πρέπει να αφαιρούνται ή να πέφτουν κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο [28].

Ακόλουθα, εξετάζεται η αστοχία δύο εμβόλων από αλουμίνιο παλινδρομικού συμπιεστή, η οποία εμφανίστηκε σε σύντομο χρονικό διάστημα, από την αρχή της λειτουργίας του. Μετά από ανάλυση διαπιστώθηκε ότι, το κύριο αίτιο αστοχίας των εμβόλων ήταν οι ρωγμές λόγω κόπωσης. Οι επιφάνειες στο πάνω και στο κάτω μέρος του εμβόλου περιείχαν, όπως εμφανίζεται στο σχ. 4.16, έξι «βύσματα» περιμετρικά στην επιφάνεια τους [29].



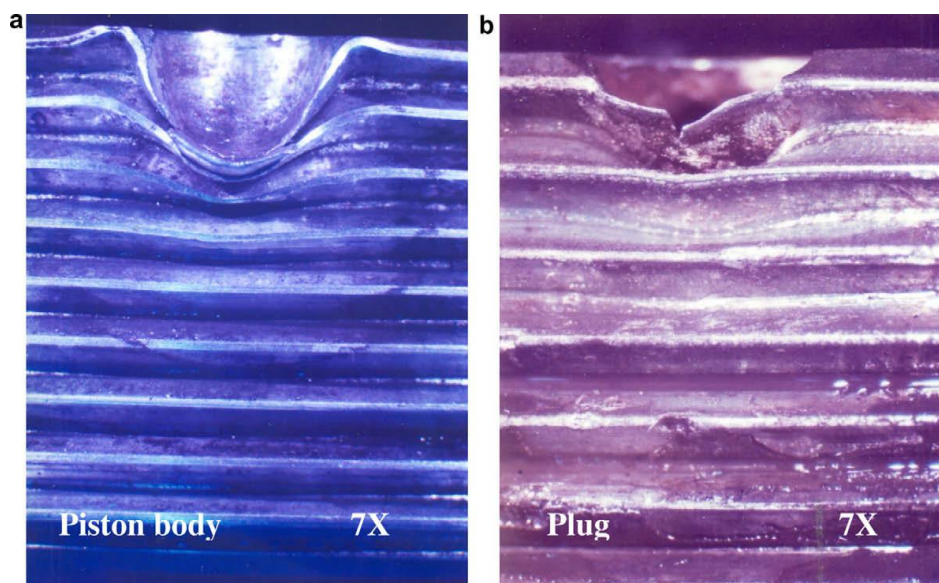
Σχ. 4.18: Πάνω επιφάνεια (a) και (b) πλάγια όψη εμβόλου που αστόχησε σε ένα μήνα.

Οι ρωγμές των επιφανειών των εμβόλων φαίνονται στο σχ. 4.19 σε μια μεγεθυμένη απεικόνιση. Εύκολα παρατηρεί κανείς την έντονη επιφανειακή καταπόνηση που έχουν υποστεί τα έμβολα.



Σχ. 4.19: Ρωγμές στην επιφάνεια του εμβόλου No 1 (a) και ρωγμή στην επιφάνεια του εμβόλου No 2.

Για τον προσδιορισμό των αιτίων που οδήγησαν στην αστοχία έγιναν κάποιες αναλύσεις στα έμβολα όπως, τομές σε σημεία έναρξης ρωγμής, χημικός και μεταλλουργικός έλεγχος κ.ά.. Διαπιστώθηκε από την εξέταση ότι, η έναρξη ρωγμών και στα δύο έμβολα ξεκίνησε από τα σπειρώματα των «βυσμάτων», εσωτερικά του σώματος του εμβόλου, με κατεύθυνση προς την επιφάνεια τους [29].

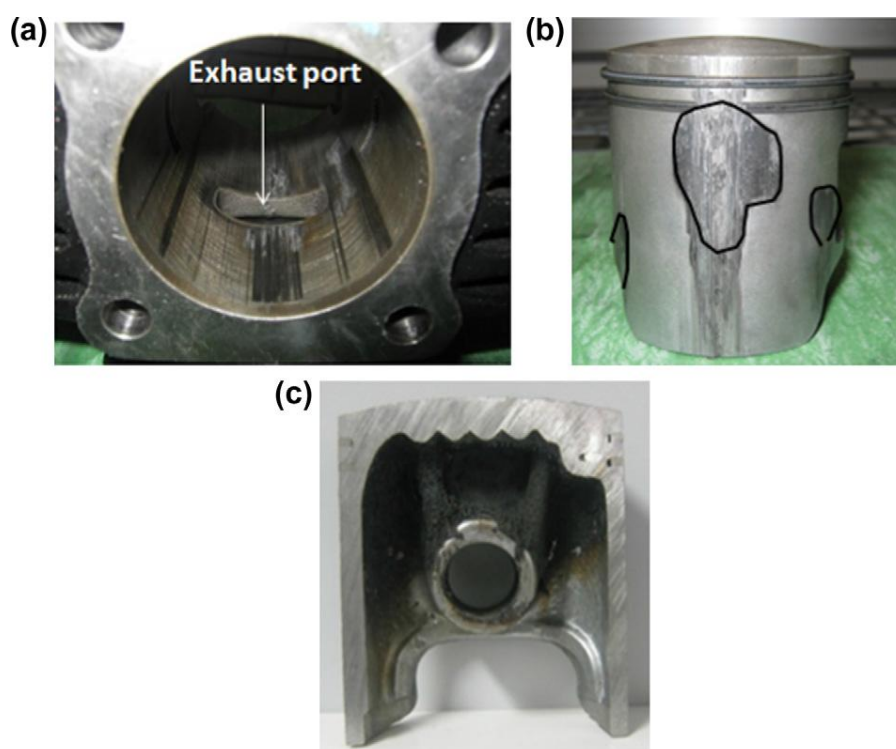


Σχ. 4.20: Κατάσταση σπειρωμάτων (α) στο σώμα του εμβόλου και (β) στο «βύσμα»

Βάση των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις των επιμέρους τμημάτων του εμβόλου προκύπτει συγκέντρωση τάσεων στο σπείρωμα του εμβόλου. Η παραμόρφωση του σπειρώματος στο σώμα του εμβόλου δημιούργησε μικρό-ρωγμές και διάδοση αυτών μέσω ενός μηχανισμού κόπωσης. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι, και τα δύο έμβολα είχαν ανωμαλίες σχετικά με τη δομή τους, με το έμβολο No1 να εμφανίζει περισσότερες σε σχέση με το έμβολο No2. Λόγω αυτού, ο χρόνος θραύσης ήταν σημαντικά μικρότερος από τον αναμενόμενο καθώς επίσης και διαφορετικός μεταξύ των εμβόλων αντίστοιχα [29].

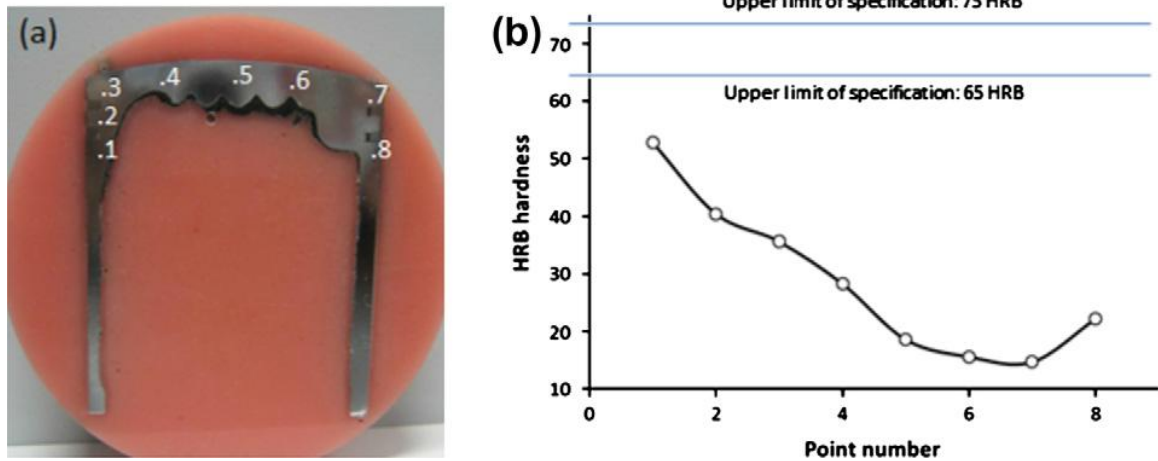
Παρακάτω, εμφανίζεται μια διαφορετικού είδους φθορά σε έμβολο δίχρονου κινητήρα, που σχετίζεται με τη φθορά μεταξύ αυτού και του κυλίνδρου. Αποτέλεσμα

αυτού, είναι η αλλοίωση των επιφανειών και των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Στο σχ. 4.21 παρουσιάζεται το αλλοιωμένο έμβολο-κύλινδρο του δίχρονου κινητήρα [30].



Σχ. 4.21: (α) Κύλινδρος με εμφανή σημάδια τριβής (β) έμβολο με σοβαρή επιφανειακή φθορά και (γ) τομή του εμβόλου με καμένο λάδι κάτω από τη κεφαλή του εμβόλου.

Έντονα είναι τα σημάδια εκδορών που φέρουν οι επιφάνειες έμβολο-κύλινδρος, καθώς οι δακτύλιοι συγκράτησης του εμβόλου στο σημείο αυτό είναι εντελώς κατεστραμμένοι. Επίσης, μέσω της τομής εμφανίζεται καμένο λάδι κάτω από την κεφαλή του εμβόλου. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στην είσοδο καυσαερίων στην ελαιολεκάνη, λόγω της καταστροφής των δακτυλίων συγκράτησης. Η φθορά αυτή, προκαλεί έντονο θόρυβο, κραδασμούς και δραματική πτώση ισχύος του κινητήρα έως ότου σβήσει εντελώς. Από το μεταλλουργικό έλεγχο που διενεργήθηκε βρέθηκε ότι, η σκληρότητα του εμβόλου βρισκόταν εκτός των προδιαγραφών και είχε πολύ χαμηλές τιμές, ειδικά στα σημεία εξαγωγής (6,7,8) όπως βλέπουμε στο επόμενο σχήμα 4.22 [30].



Σχ. 4.22: (α) Τομή εμβόλου σε καλούπι με 8 σημεία μέτρησης και (β) σημεία μεταβολής συχνότητας.

Η πτώση σκληρότητας οφείλεται στη θερμοκρασία, πράγμα που φαίνεται εντονότερα στα σημεία εξαγωγής του εμβόλου.

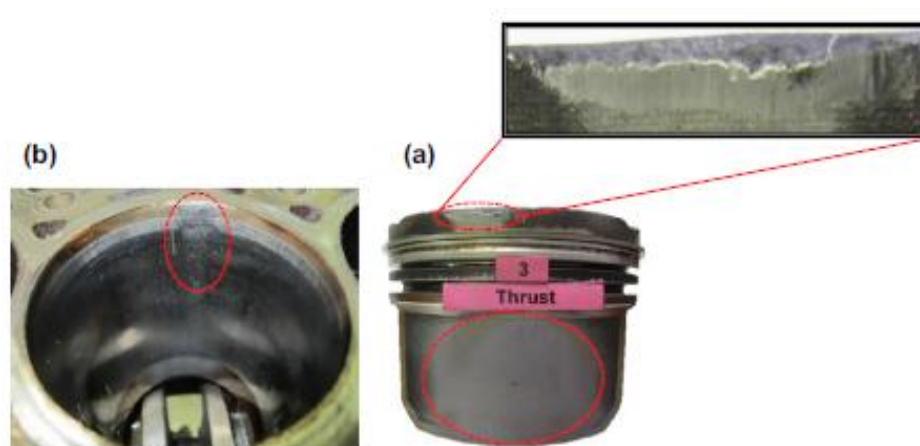
Το μοντέλο προσομοίωσης για τα προβλεπόμενα σημεία φθοράς έχει αρκετά κοινά σημεία με τα πειραματικά δεδομένα, καθώς επίσης και τα σημεία φθοράς της επένδυσης του κυλίνδρου. Προκειμένου να μειωθεί η παράμετρος της θερμοκρασίας που ευθύνεται για την αστοχία του εμβόλου, διεξάγονται μερικές δοκιμές σε έμβολο επικαλυμμένα με μολυβδαίνιο. Παρά την επικάλυψη του, φαίνεται ακόλουθα ότι, έχει υποστεί φθορά στο κάτω μέρος του, σχ. 4.23 [30].



Σχ. 4.23: Έμβολο με επικάλυψη από μολυβδαίνιο που φέρει εκδορές στο κάτω μέρος.

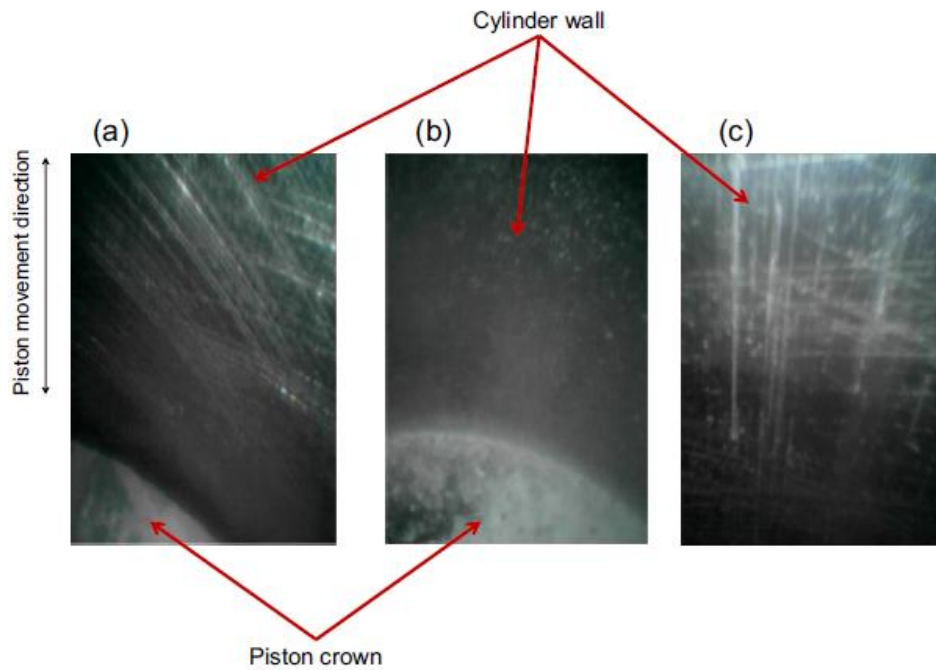
Η αστοχία του εμβόλου είναι αποτέλεσμα της υπερβολικά υψηλής θερμοκρασίας και μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί, από τις χαμηλότερες τιμές σκληρότητας του εμβόλου στα σημεία εξαγωγής και της εσωτερικής επένδυσης του κυλίνδρου. Επιπλέον, το διάκενο μεταξύ εμβόλου και κυλίνδρου –βάση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης- έχει αυξηθεί, και σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες και την οριακή λίπανση οδηγούν στην συγκεκριμένη αστοχία [30].

Παρόμοια περίπτωση με την προηγούμενη είναι και η παρακάτω, που αφορά έμβολο που έχει υποστεί αστοχία από την «έντονη» επαφή του με τον κύλινδρο. Η επαφή αυτή προκαλεί τάσεις στις ανταγωνιστικές επιφάνειες με αποτέλεσμα αυτές να μεταβαίνουν σε μια υγρή-στερεή κατάσταση (πλαστική παραμόρφωση αυτών), να μαλακώνουν και να γίνεται μεταφορά υλικού από τη μια στην άλλη, παράλληλα με διάφορες χημικές αλληλεπιδράσεις. Έτσι, δημιουργούνται σκληρότερες επιφάνειες ολίσθησης, που αυξάνουν το ρυθμό των επιπτώσεων του φαινομένου στην μονάδα του χρόνου [31].



Σχ. 4.24: Σημάδια εκδορών σε κύλινδρο και έμβολο.

Παρακάτω, δίνεται μια αναλυτικότερη εικόνα της φθοράς του εμβόλου και του κυλίνδρου.



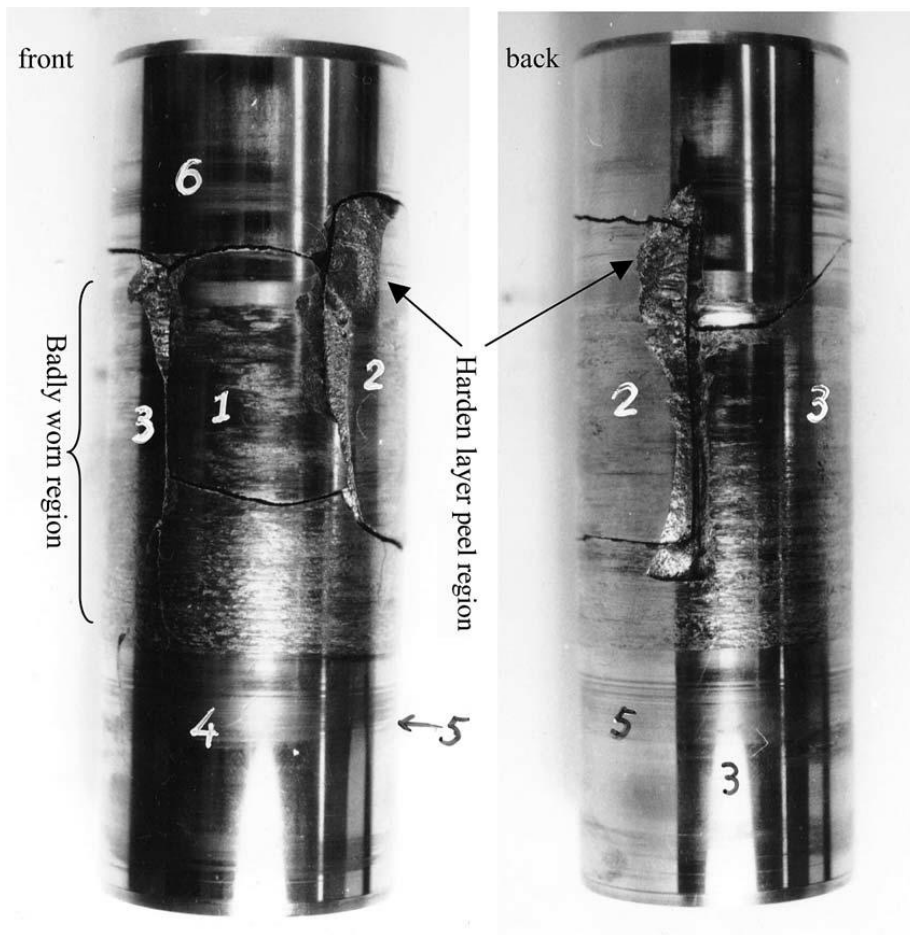
Σχ. 4.25: Αναλυτικότερες εικόνες σε κύλινδρο και έμβολο.

Τέτοιου είδους αστοχίες μπορούν να εμφανιστούν σε όλες τις ολισθαίνουσες επιφάνειες, όπως για παράδειγμα σε γρανάζια, έδρανα ολίσθησης, έμβολο-κύλινδρος κ.ά. [31].

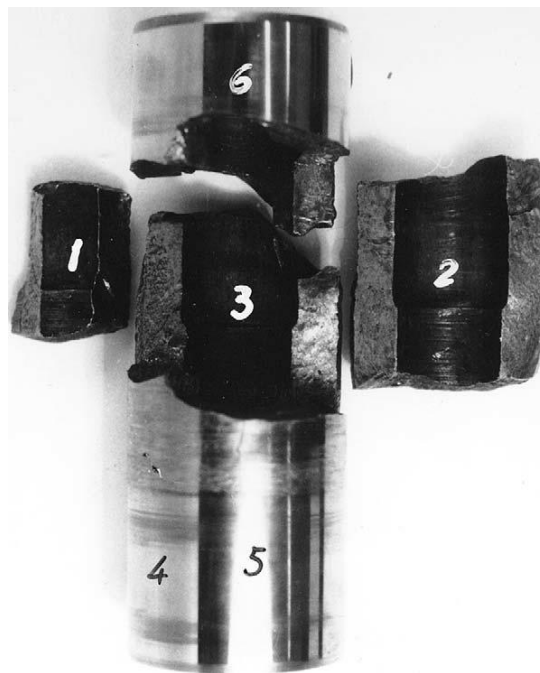
4.1 Αστοχίες σε πείρους εμβόλων

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστούν δυο περιπτώσεις πείρων εμβόλων που αστόχησαν. Οι αστοχίες αυτών οφείλονται στην κόπωση.

Η συγκεκριμένη ανάλυση αφορά τον πείρο εμβόλου πετρελαιοκινητήρα, ο οποίος έσπασε σε τέσσερα κομμάτια. Το υλικό κατασκευής του ήταν χάλυβας 20Cr [32].



Σχ. 4.1: Κατεστραμμένος πείρος εμβόλου.

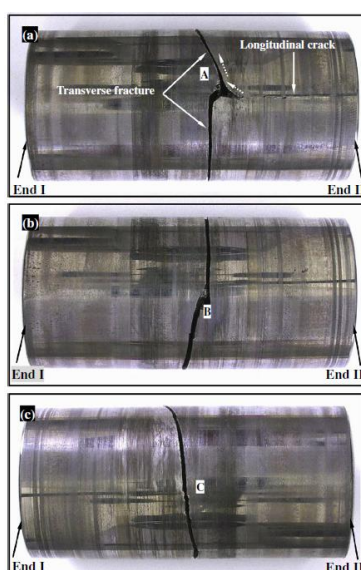


Σχ. 4.2: Κομμάτια του κατεστραμμένου πείρου.

Για να προσδιοριστεί το βάθος του ενανθρακωμένου στρώματος στο εσωτερικό και εξωτερικό μέρος του πείρου έγιναν κάποιες μετρήσεις από διάφορα σημεία μακριά και κοντά στην περιοχή θραύσης, όπως χημική ανάλυση, ανάλυση μικροδομής, μετρήσεις σκληρότητας κ.ά. Έπειτα από όλα αυτά βρέθηκε ότι, η σκληρότητα της εξωτερικής επιφάνειας του πείρου ήταν μικρότερη των προδιαγραφών, σε αντίθεση με το βάθος ενανθράκωσης που ήταν μεγαλύτερο [32].

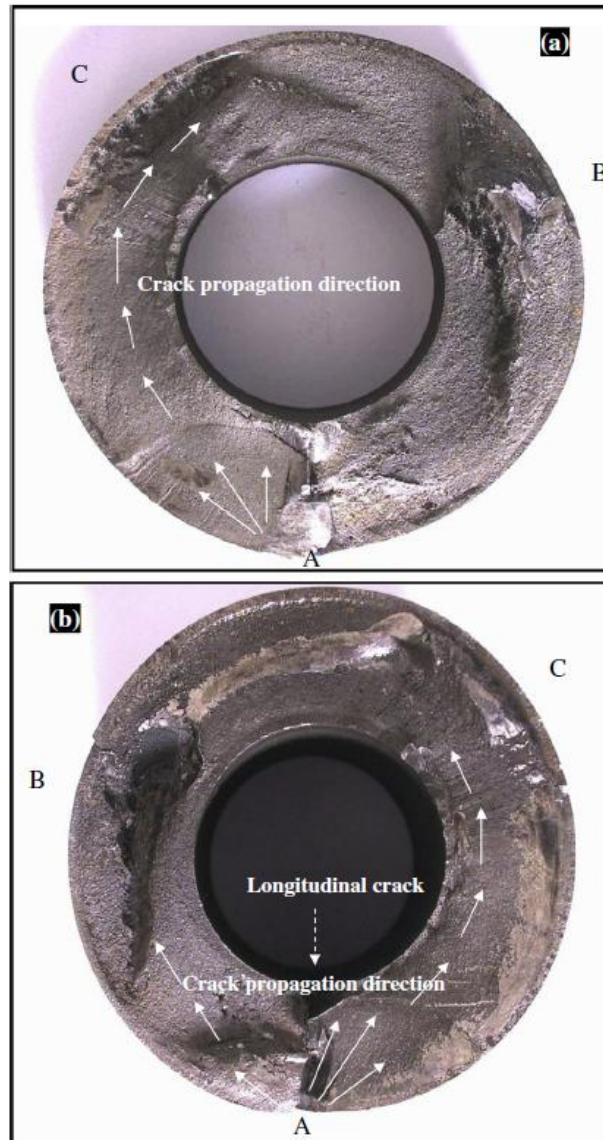
Παρατηρείται επίσης ότι, το εσωτερικό της οπής έχει υποστεί εξανθράκωση που οδήγησε σε μείωση της αντοχής κόπωσης και έναρξη ρωγμών σε πολλά σημεία της εσωτερικής επιφάνειας με τελικό στάδιο τη θραύση. Οι ρωγμές που έφεραν την αστοχία στο πείρο ήταν εγκάρσιες και διαμήκεις σε αυτόν, με έναρξη την επιφάνεια της εσωτερικής οπής, και κατάληξη την εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου. Ο κύριος μηχανισμός αστοχίας ήταν θραύση λόγω κόπωσης [32].

Παρόμοια περίπτωση θραύσης σε πείρο εμβόλου αποτελεί και η επόμενη περίπτωση αστοχίας από κόπωση. Ο πείρος του εμβόλου είναι κατασκευασμένος από χάλυβα 20CrMnTi, και απαρτίζει εξάρτημα εμβόλου μιας πετρελαιομηχανής [33].



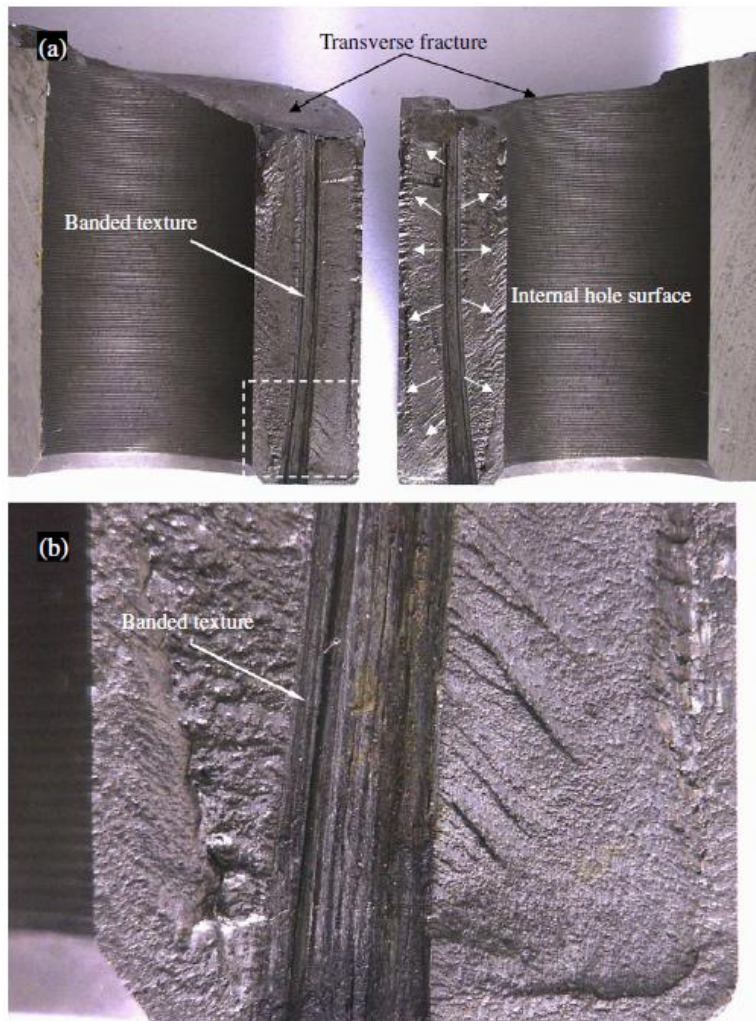
Σχ. 4.3: Αστοχία πείρου που δείχνει τη μορφολογία της ρωγμής σε τρεις διαφορετικές θέσεις.

Η ρωγμή ξεκίνησε κατά μήκος του πείρου και η τελική θραύση του προκλήθηκε κάθετα σε αυτόν, όπως φαίνεται ξεκάθαρα και από τα σχήματα άνω και κάτω (σχ. 4.3 και 4.4) [33].



Σχ. 4.4: Επιφάνεια εγκάρσιου κατάγματος πείρου.

Από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν στον πείρο βρέθηκε ότι, στην διαμήκη ρωγμή υπήρχαν κάποια μη μεταλλικά εγκλείσματα αργιλικού ασβεστίου, στα οποία οφείλεται η έναρξη της.



Σχ. 4.5: Διαμήκες κάταγμα (α) γενική εικόνα και (β) μεγεθυμένη απεικόνιση.

Ο χαλύβδινος πείρος βρισκόταν εντός επιτρεπτών ορίων σχετικά με την σκληρότητα, τη μικροδομή, και το πάχος επίστρωσης. Η θραύση προήλθε από εναλλαγή τάσεων κατά τη λειτουργία του κινητήρα υπό το καθεστώς κόπωσης [33].

Συμπερασματικά, τα έμβολα αποτελούν ίσως το κυριότερο εξάρτημα ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης. Δέχονται τις μεγαλύτερες πιέσεις και θερμοκρασίες από οποιοδήποτε άλλο εξάρτημα. Το υλικό κατασκευής των παραπάνω εμβόλων είναι αλουμίνιο και κράματα αυτού, εξαιτίας του βάρους του (ελαφρύ υλικό), και της καλής συμπεριφοράς του στη διάβρωση. Οι αστοχίες/φθορές που εμφανίζονται κυρίως σε αυτά, είναι διάβρωση από την καύση του μείγματος και των έντονων

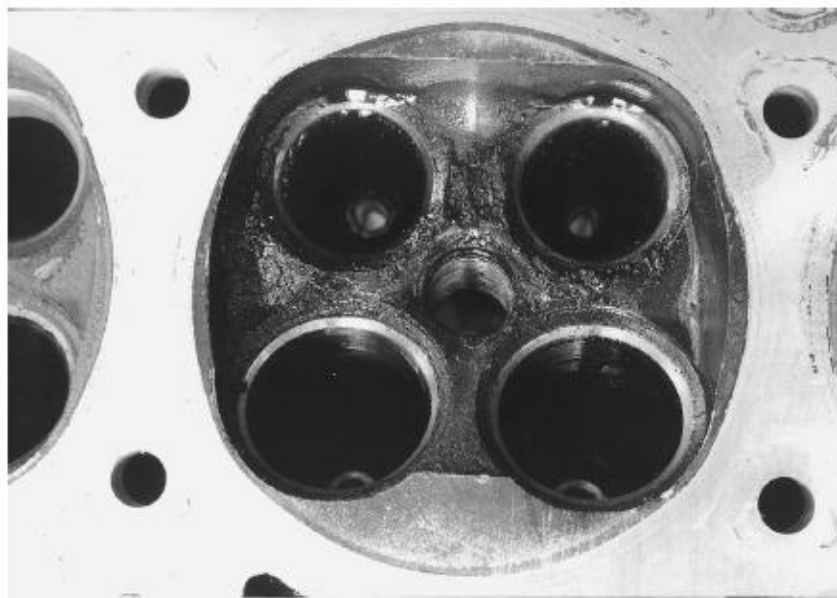
συνθηκών στο περιβάλλον λειτουργίας, φθορά κόλλησης ή εκτριβής μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών (κυλίνδρου - εμβόλου), θερμική υποβάθμιση από της θερμοκρασίες της καύσης στο θάλαμο κ.ά. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ο κύριος μηχανισμός αστοχίας είτε στα έμβολα, είτε στους πείρους αυτών εμφάνισε σημάδια κόπωσης από τις επαναλαμβανόμενες συνθήκες λειτουργίας, με εξαίρεση δύο περιπτώσεων που η φθορά σχετιζόταν με αύξηση της θερμοκρασίας λόγω τριβής επιφανειών και υποβάθμισης-αλλοίωσης αυτών. Προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που αντιμετωπίζουν τα έμβολα κατά τη λειτουργία τους, γίνεται χρήση επικαλύψεων και επιφανειακών επεξεργασιών, καλύτερη ψύξη και σχεδιασμός αυτών, καθώς επίσης και χρήση καθαρότερων καυσίμων. Παρόλα αυτά, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για εξέλιξη και περαιτέρω πρόοδο στα έμβολα, λόγω της χαμηλής απόδοσης των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Κεφάλαιο 5^ο : Καταστροφικές αστοχίες σε σύστημα κυλίνδρου - κεφαλής

Οι κύλινδροι και οι κεφαλές αποτελούν τμήματα/ εξαρτήματα μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, που υποβάλλονται σε έντονες τάσεις και υψηλές θερμοκρασίες. Οι αστοχίες τους οφείλονται κυρίως σε θερμικούς/ χημικούς παράγοντες, στις τάσεις που αναπτύσσονται στο θάλαμο καύσης, σε ελαττώματα υλικού, σε κακή λειτουργία και κατεργασία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αστοχίες στην κεφαλή του κινητήρα και στους κυλίνδρους και οι αιτίες που οδηγούν αυτά τα εξαρτήματα σε αστοχία (παραθέτονται περιπτώσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία).

5.1 Αστοχίες κεφαλής κινητήρα

Η πρώτη περίπτωση αφορά μια ρωγμή στην κεφαλή του οδηγού της βαλβίδας. Μετά την εξέταση του κινητήρα για την εύρεση του αίτιου της αστοχίας παρατηρήθηκαν ανθρακούχα κατάλοιπα λαδιού στο θάλαμο καύσης [22].



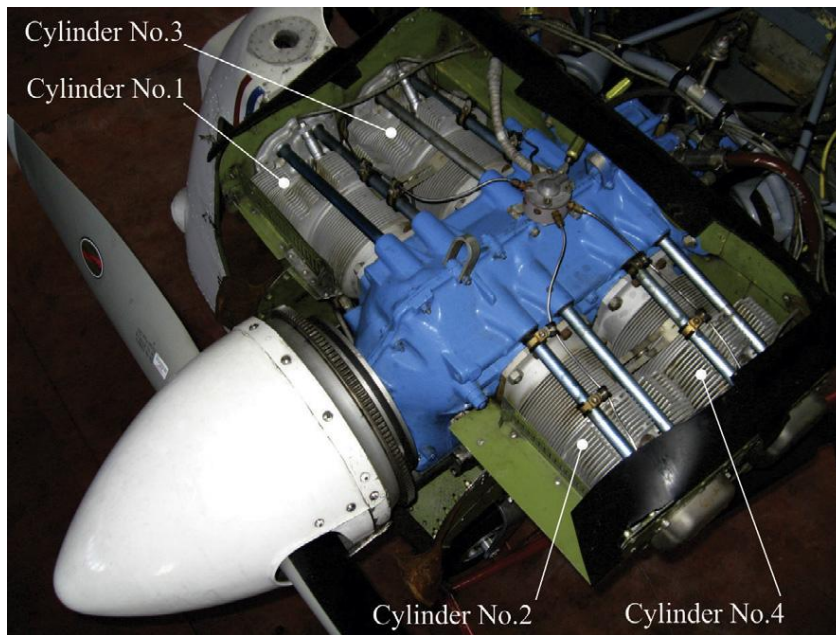
Σχ. 5.1: Ανθρακούχα κατάλοιπα λαδιού στην κεφαλή.



Σχ. 5.2: Ρωγμή οδηγού βαλβίδας επί της κεφαλής

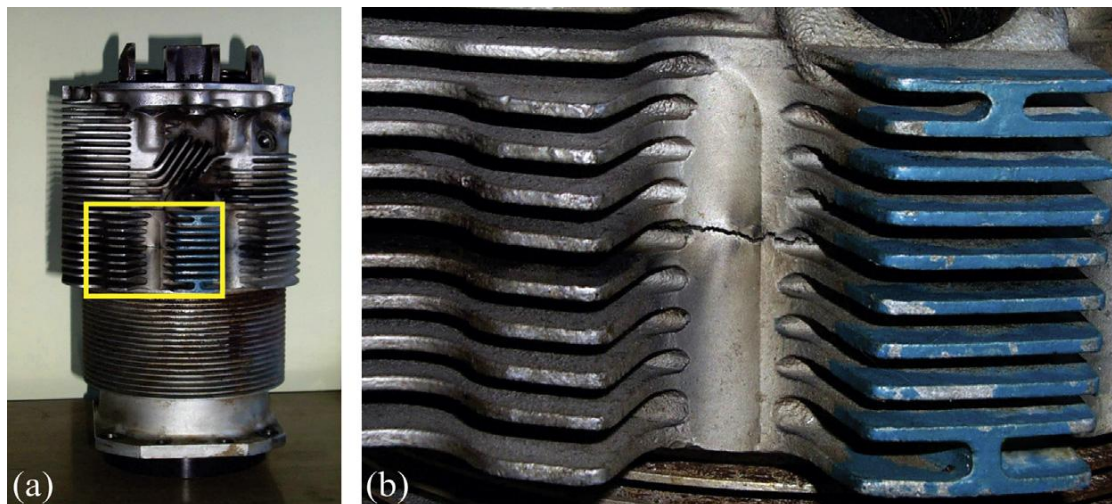
Από την αναλυτικότερη εξέταση της κεφαλής βρέθηκε ότι, η ρωγμή αυτή ήταν η αιτία που οδήγησε στην αστοχία, μέσω της θύρας εισαγωγής, στην εισχώρηση λαδιού μέσα στον κύλινδρο και στην εναπόθεση καταλοίπων στον θάλαμο καύσης. Το αίτιο της αστοχίας αυτής σχετίζεται με τη σφιχτή συναρμογή οδηγού βαλβίδας και κεφαλής [22].

Επιπλέον, θα μελετηθεί μια αστοχία στη κεφαλή κυλίνδρου ενός εκπαιδευτικού αεροσκάφους. Το υλικό κατασκευής της κεφαλής είναι κράμα αλουμινίου 242.0. Η αστοχία (αποτέλεσμα κόπωσης) είχε εμφανιστεί ξανά σε σύντομο χρονικό διάστημα και σε συνδυασμό με τη σοβαρότητα μιας πιθανής πτώσης του αεροσκάφους, κρίθηκε απαραίτητο να προσδιοριστεί το αίτιο που οδήγησε σε αυτή [34].



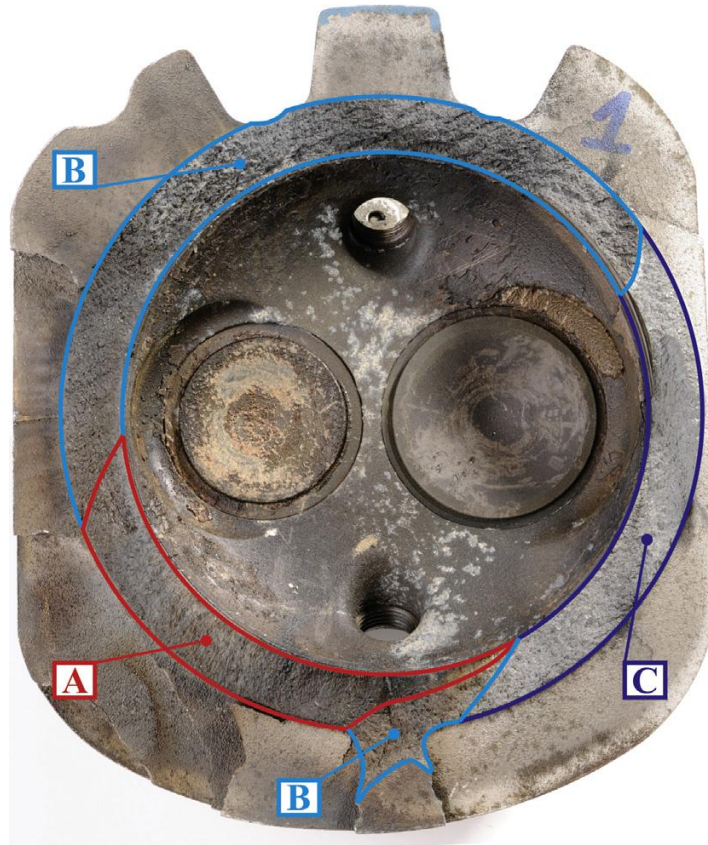
Σχ. 5.3: Κινητήρας αεροσκάφους UTVA-75.

Παρακάτω βλέπουμε τον κύλινδρο που αστόχησε.



Σχ. 5.4: (α) Απεικόνιση κυλίνδρου όπως λήφθηκε και (β) μεγέθυνση περιοχής ρωγμής.

Από την οπτική εξέταση των επιφανειών θραύσης είναι δυνατό να παρατηρηθούν τυπικά σημάδια εξέλιξης σε κατάγμα κόπωσης (beach marks) και κάθετα σημάδια στην περιφέρεια που μοιάζουν με αιχμές βέλων (ratchet marks), όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα (σχ.5.5., 5.6. και 5.7) [34].



Σχ. 5.5: Μορφολογία επιφάνειας θραύσης.

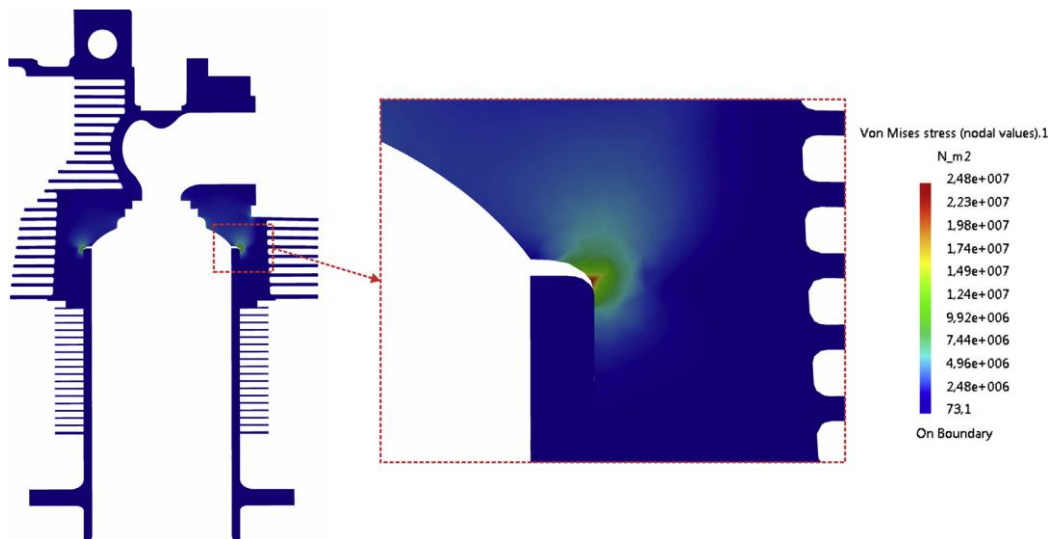


Σχ. 5.6: Προβολή τμήματος A της επιφάνειας θραύσης, που απεικονίζουν κάθετα σημάδια στην περιφέρεια της κεφαλής (ratchet marks).



Σχ. 5.7: Σημάδια εξέλιξης σε κάταγμα κόπωσης (beach marks).

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται ότι, η ρωγμή είχε πολλαπλά σημεία έναρξης, που βρίσκονται στο εσωτερικό σημείο της φλάντζας, εκεί που δημιουργείται η καμπύλη/φιλετάρισμα της κεφαλής, στην πλευρά της εξόδου των καυσαερίων.



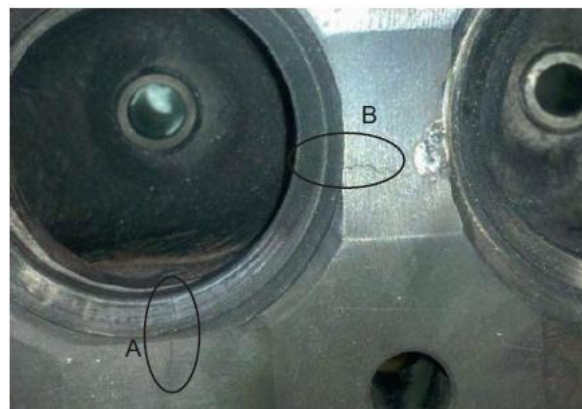
Σχ. 5.8: Τομή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με τη μέγιστη τάση.

Το συμπέρασμα, με βάση τις δοκιμές, είναι ότι, η αστοχία στην κεφαλή του κυλίνδρου είναι συνέπεια κόπωσης λόγω ελαττωμάτων στην εν λόγω περιοχή (υψηλή συγκέντρωση πόρων/ασυνεχειών), που δημιουργήθηκαν πιθανόν κατά τη διαδικασία της χύτευσης [34].

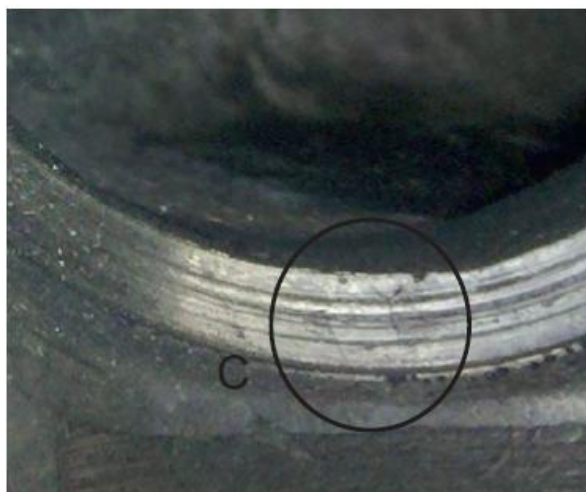
Η επόμενη αστοχία αφορά την κεφαλή κυλίνδρου και συγκεκριμένα τα σημεία εκείνα που βρίσκονται ανάμεσα στις οπές εισαγωγής – εξαγωγής. Για να βρεθούν τα αίτια που οδήγησαν στην αστοχία χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, σχετίζοντας την θερμοκρασία με τις ιδιότητες των υλικών. Μέσω του μοντέλου αυτού δοκιμάζονται οι μηχανικές και οι θερμικές ιδιότητες του υλικού στις μέγιστες θερμοκρασίες. Αξιολογούνται ακόμα και τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης, λαμβάνοντας και αξιολογώντας τιμές θερμότητας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της κεφαλής του κινητήρα. Τέλος, τα αποτελέσματα συγκέντρωσης τάσεων του μοντέλου συμπίπτουν με τις περιοχές αστοχίας, εξασφαλίζοντας έτσι αξιόπιστα αποτελέσματα [35].



Σχ. 5.8: Περιοχές αστοχίας της επιφάνειας καύσης της κεφαλής.

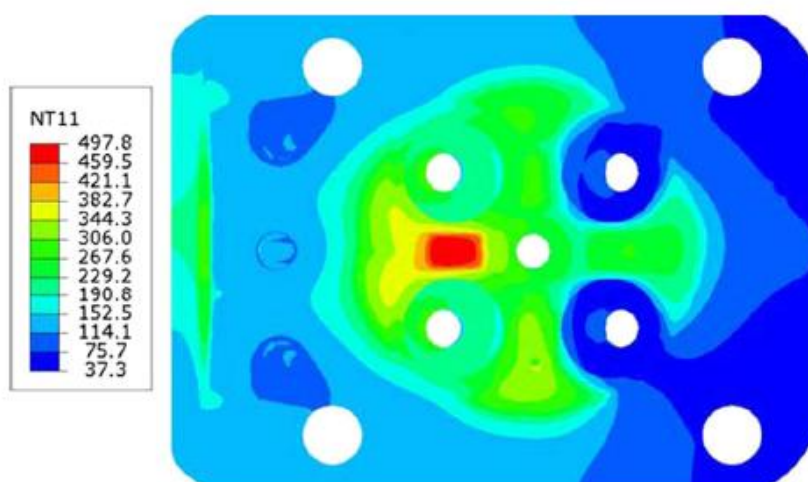


Σχ. 5.9: Εμφάνιση ρωγμών στις περιοχές A, B.



Σχ. 5.10: Περιοχή αστοχίας C.

Παρακάτω, εμφανίζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της επιφάνειας κεφαλής με θερμοκρασιακή διαβάθμιση, προσδιορίζοντας τις κρίσιμες περιοχές (υψηλότερες θερμοκρασίες) [35].

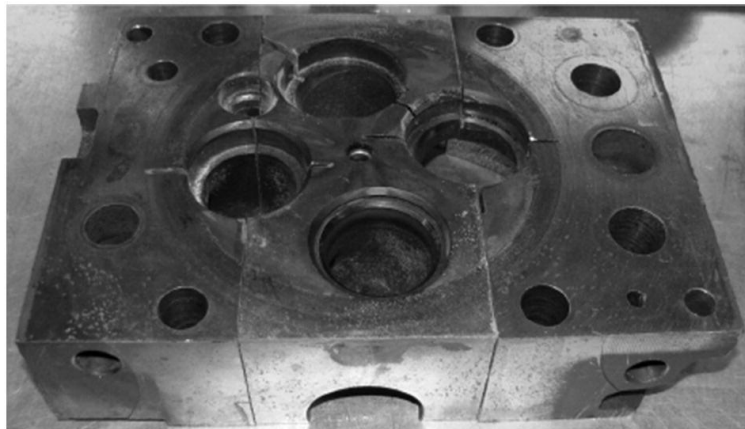


Σχ. 5.11: Προσομοίωση κατανομή θερμοκρασίας στην επιφάνεια της κεφαλής

Το βασικό αποτέλεσμα που εξάγεται από τις αναλύσεις είναι ότι, υπάρχει έντονη επιρροή της θερμοκρασίας στις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού, ειδικά στα μέρη του γραφίτη που βρίσκονται μέσα στο υλικό της κεφαλής (κατασκευασμένη από χυτοσίδηρο). Επιπλέον, η κεφαλή παρουσίασε ανισοκατανομή

θερμοκρασίας στην επιφάνεια της, καθώς επίσης και μια κλίση δίπλα στη βαλβίδα εξαγωγής. Συμπερασματικά, οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν την αντοχή των υλικών και σε αυτή την περίπτωση ήταν η αιτία της αστοχίας του [35].

Αντίθετα με την πάνω περίπτωση, αυτή εδώ ασχολείται με κυλινδροκεφαλή από χυτοσίδηρο που αστόχησε υπό το καθεστώς χαμηλού κύκλου λειτουργίας, κατά τη διάρκεια δοκιμής αντοχής. Οι ρωγμές και εδώ, ξεκίνησαν και διαδόθηκαν μεταξύ των οπών, εισαγωγής – εξαγωγής (γέφυρες). Η συγκεκριμένη κεφαλή δέχεται κυκλικά, πολυαξονικά φορτία μεταβλητού εύρους [36].



Σχ. 5.12: Ρωγμές στην κυλινδροκεφαλή.

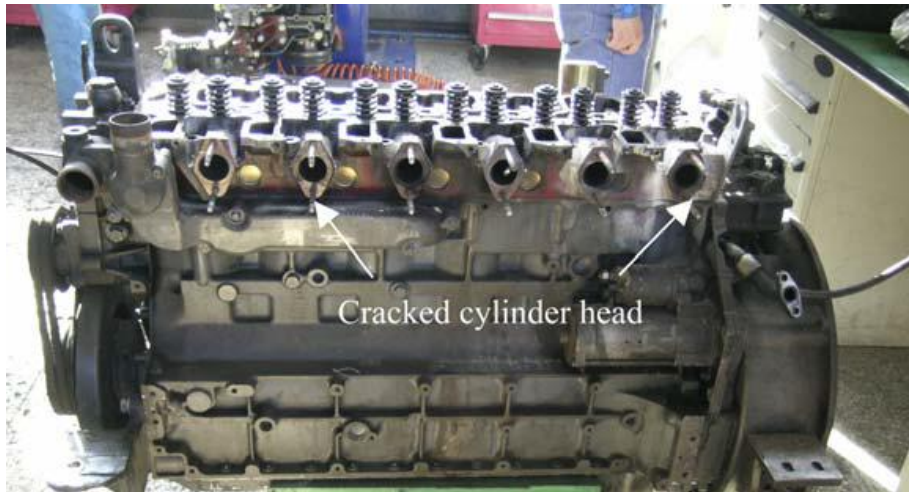
Η αστοχία της κυλινδροκεφαλής, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν, είναι απόρροια κόπωσης χαμηλού κυκλικού θερμικού φορτίου. Επίσης, από την προσεγγιστική ανάλυση, η περιοχή της γέφυρας των οπών, αποτελεί σημείο μέγιστων θερμικών φορτίων κατά τη λειτουργία του [36].



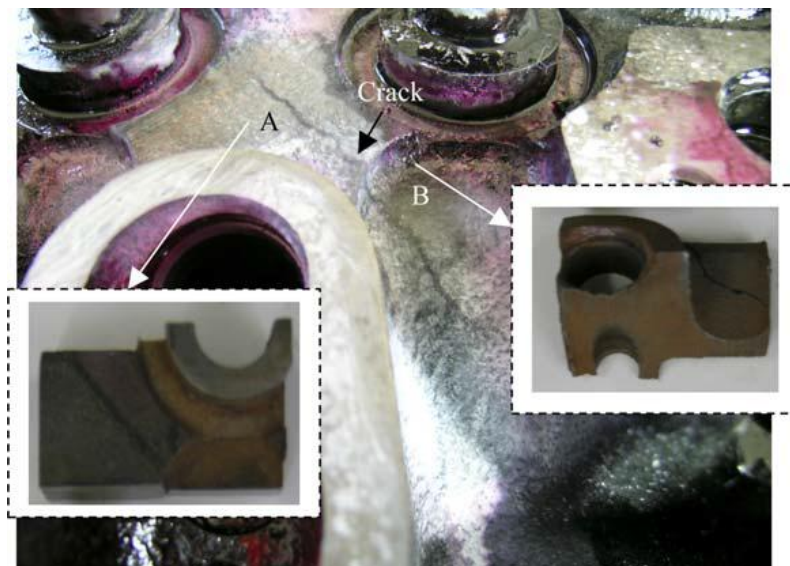
Σχ. 5.13: Ακτινική ρωγμή γύρω από την περιοχή της γέφυρας της βαλβίδας.

Η προσέγγιση της αστοχίας, μέσω της προσομοίωσης, δίνει συμβατά αποτελέσματα με αυτά που εξήχθησαν από τη δοκιμή αντοχής, παρέχοντας καλή κατανόηση του φαινομένου αυτού [36].

Ανάλογη περίπτωση με την παραπάνω είναι και η επόμενη, η οποία αναφέρεται σε αστοχία κεφαλής φορτηγού οχήματος από φαιό χυτοσίδηρο HT250. Η ρωγμή αρχικά ξεκίνησε στο εσωτερικό της κεφαλής με κατεύθυνση προς την εξωτερική επιφάνεια. Τα ευρήματα από το μεταλλουργικό έλεγχο, έδειξαν ότι, υπήρχαν μεγαλύτερες «νιφάδες» γραφίτη από τις προδιαγραφές για το υλικό αυτό. Επίσης, βρέθηκε περίσσια ποσότητα φερρίτη σε κάποιες περιοχές, που πιθανόν να ελαττώνει τη σκληρότητα του υλικού. Η γενική μεταλλουργική εικόνα του υλικού ανταποκρίνεται στα χαμηλότερα επιτρεπτά όρια για το υλικό αυτό [37].



Σχ. 5.12: Κινητήρας με αστοχία κυλίνδρου.



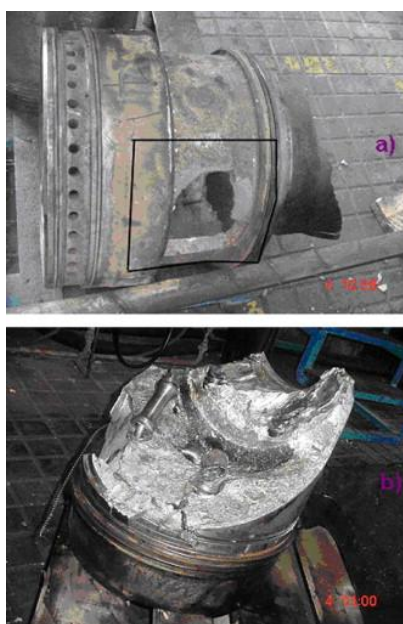
Σχ. 5.13: Παρατήρηση μορφολογίας ρωγμής

Επιπρόσθετα, η χημική σύνθεση της κυλινδροκεφαλής αντιστοιχεί ουσιαστικά με το καθορισμένο εύρος, εκτός από το χαλκό που υπερβαίνει λίγο τα όρια. Οι «νιφάδες» του γραφίτη, σε βάθος 1,3mm από την επιφάνεια του εσωτερικού τοιχώματος της κυλινδροκεφαλής, σχηματίζουν ένα δίκτυο στα όρια των κόκκων που ενώνονται μεταξύ τους. Η ανωμαλία αυτή της δομής του υλικού, ελαττώνει τη σκληρότητα του, με αποτέλεσμα την έναρξη της ρωγμής και τη μετέπειτα διάδοσή της, κάτω από μηχανικές και θερμικές τάσεις [37].

5.2 Αστοχίες κυλίνδρου κινητήρα

Στο υποκεφάλαιο αυτό, θα μελετηθούν περιπτώσεις που σχετίζονται με κυλίνδρους. Με τη σειρά τους και αυτοί, υποβάλλονται σε θερμικά φορτία, έντονες πιέσεις και χημικό/διαβρωτικό περιβάλλον. Αυτές οι συνθήκες λειτουργίας απαιτούν από τα εξαρτήματα αυτά εξαιρετικές ιδιότητες, όπως π.χ. αντοχή στη διάβρωση, στη θερμότητα, στις πιέσεις κ.ά.

Η πρώτη περίπτωση αφορά αστοχία κυλίνδρου και εμβόλου, τετράχρονης γεννήτριας πετρελαίου. Μετά την ολοκλήρωση 80000 ωρών και αφού είχε γίνει γενική επισκευή, προκλήθηκε σοβαρότατη θραύση [38].



Σχ. 5.2.1: Καταστροφή εσωτερικής επένδυσης κυλίνδρου (α) και του εμβόλου του (β).

Το υλικό της εσωτερικής επένδυσης του κυλίνδρου ήταν φαιός χυτοσίδηρος. Ο έλεγχος στις εσωτερικές επενδύσεις των άλλων κυλίνδρων δεν έδειξε κάποια ανωμαλία στα κρίσιμα σημεία τους, ούτε παρατηρήθηκαν ασυνήθιστες καταθέσεις άνθρακα και λαδιού, όπως αναμενόταν λόγω της μακράς λειτουργίας τους [38].

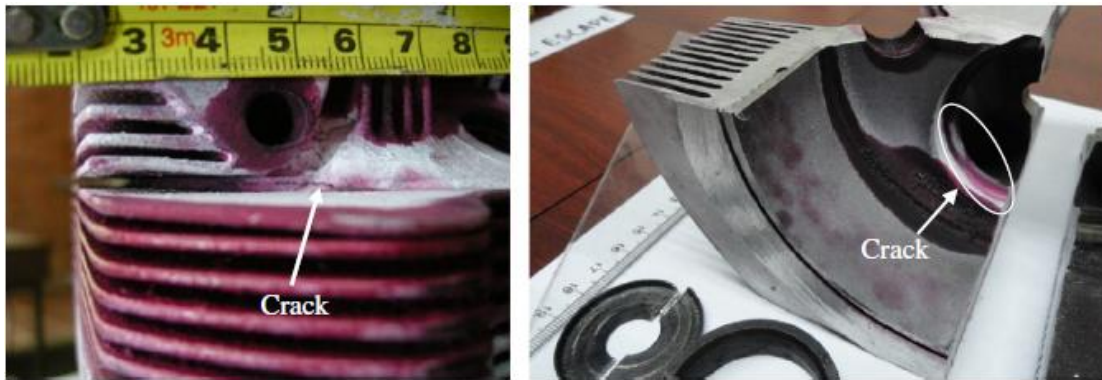
Η μεταλλογραφική ανάλυση του σώματος του εμβόλου δεν παρουσίασε ανωμαλίες ή ελαττώματα υλικού, ούτε σημάδια κόπωσης στις περιοχές θραύσης. Παρατηρήθηκαν, όμως, διαφορές στις θερμοκρασίες εξαγωγής μεταξύ των κυλίνδρων με υψηλότερη θερμοκρασία εξαγωγής του εν λόγω κυλίνδρου. Υποδηλώνεται δηλαδή ότι, η αστοχία πιθανά σχετίζεται με την ακανόνιστη καύση. Η διαφορά στη εγχεόμενη ποσότητα μεταξύ των κυλίνδρων, δίνει ανάλογα αναλογία αέρα-καυσίμου, με αποτέλεσμα αύξηση θερμοκρασίας. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας έχει τα εξής πιθανά αποτελέσματα: καταστροφή της λεπτής στρώσης λιπαντικού ανάμεσα σε κύλινδρο και έμβολο που με τη σειρά του επιφέρει αυξημένη θερμοκρασία, υψηλή πλευρική πίεση, αυξημένο εύρος υψηλών συχνοτήτων και αύξηση κρουστικής καύσης σε υψηλές συχνότητες. Όλοι αυτοί οι παράγοντες σε συνδυασμό με την υπερφόρτωση του κυλίνδρου είναι οι κύρια υπεύθυνοι για την αστοχία του [38].

Η παρακάτω αστοχία, αφορά ένα μικρό αεροσκάφος που εμφάνισε απώλεια πίεσης, έναρξη ρωγμών και τελική αστοχία σε έναν από τους κυλίνδρους του. Το υλικό κατασκευής ήταν κράμα αλουμινίου [39].

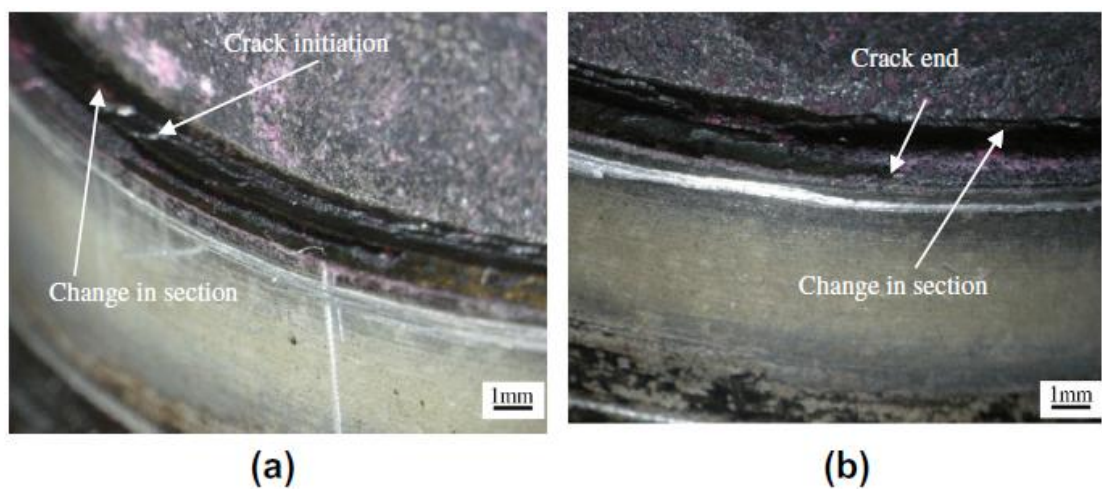


Σχ. 2: Κύλινδρος κινητήρα του αεροσκάφους.

Μέσω διεισδυτικών υγρών έγινε ο εντοπισμός της ρωγμής, όπως παρατηρείται παρακάτω.



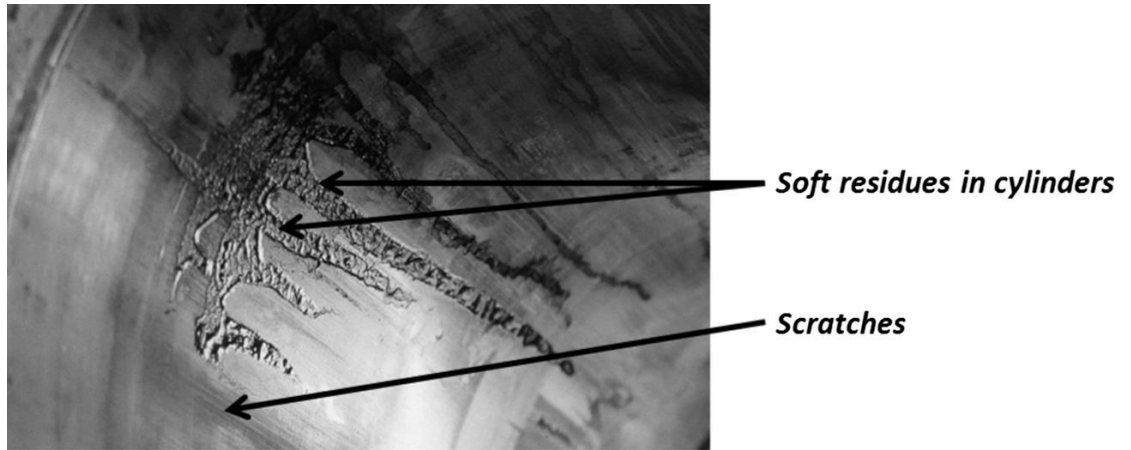
Σχ. 3: Στα αριστερά έχουμε την ζώνη αστοχίας με εμφανή τη ρωγμή και δεξιά εσωτερικό σημείο ρωγμής στον κύλινδρο.



Σχ. 4: Φωτογραφία βαλβίδας εισαγωγής (α) αρχή ρωγμής, (β) τέλος ρωγμής.

Από τις αναλύσεις στο υλικό εμφανίστηκαν πόροι/ασυνέχειες κοντά στη βαλβίδα εξαγωγής (σημείο θραύσης). Οι ανωμαλίες αυτές, καταδεικνύουν την ανεπάρκεια της κατασκευαστικής διαδικασίας, κυρίως στη φάση της στερεοποίησης. Η παρουσία αυτών των πόρων είναι επιζήμια για τις ιδιότητες του υλικού, με αποτέλεσμα την αστοχία του [39].

Ακόμα, θα εξεταστεί μια περίπτωση αστοχίας στατικού κινητήρα εσωτερικής καύσης, που χρησιμοποιεί ως καύσιμο αέρια χωματερής. Οι βλάβες εμφανίζονται κυρίως στα μέρη/εξαρτήματα που απαρτίζουν τον παλινδρομικό μηχανισμό του θαλάμου καύσης (κύλινδρος, έμβολο και κεφαλή) [28].



Σχ. 5: Εσωτερική επένδυση κυλίνδρου με κατάλοιπα καύσης και γρατζουνιές κατά μήκος του.

Διάφορα είδη συμπτωμάτων έκαναν την εμφάνιση τους πριν την διαδικασία της συντήρησης, όπως αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και λαδιού, μεγάλη θερμοκρασία αερίων εξαγωγής, μηχανικά προβλήματα από ρωγμή σε βαλβίδα εξαγωγής, αστάθεια πάνω από μια ορισμένη ισχύ εξόδου και άλλα. Η ανάλυση της αστοχίας διάφορων μηχανών έδειξε ότι, οι βλάβες ήταν συνέπεια δύο ειδών καταθέσεων: καταθέσεις λεπτών στερεών ιζημάτων σε όλες τις επιφάνειες του θαλάμου καύσης και καταθέσεις λεπτής «πάστας» στο πάνω μέρος του κυλίνδρου [28].

Παρατηρείται λοιπόν, λόγω των υπολειμμάτων ρευστής «πάστας» από την καύση, υψηλές θερμοκρασίες στο θάλαμο που αντιδρούν με τα αέρια καύσιμα χωματερής. Με αυτόν τον τρόπο εμφανίζεται η αύξηση θερμοκρασιών των επιφανειών (κακή μεταφορά θερμότητας), μη σωστή λίπανση και χάραξη κυλίνδρου. Με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της αστοχίας του [28].

Συμπερασματικά, οι κύλινδροι και οι κεφαλές είναι εξαρτήματα κινητήρα που δέχονται έντονες καταπονήσεις και γενικά λειτουργούν σε βεβαρυσμένο περιβάλλον και συνθήκες. Η κεφαλή είναι ένα εξάρτημα που φέρει οπές εισαγωγής – εξαγωγής, οπή για τον αναφλεκτήρα στους κινητήρες βενζίνης, αύλακες για ψύξη κλπ. Αυτές οι ιδιαιτερότητες, σε συνδυασμό με τις έντονες συνθήκες λειτουργίας της, την καθιστούν ένα ιδιαίτερα σύνθετο εξάρτημα, -όσων αφορά τα υλικά/κατεργασίες από τα οποία πρέπει να απαρτίζεται-, ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις λειτουργίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οποιοδήποτε ελάττωμα (πόροι, ξένα υλικά, κ.ά.) να αποτελεί ευάλωτο σημείο, για έναρξη και διάδοση ρωγμών και ακόλουθα αστοχίας. Οι αστοχίες αυτών οφείλονται κυρίως σε κατασκευαστικά αίτια, σε κόπωση και τέλος σε υπερβολικές θερμοκρασίες (λόγω σφάλματος, ακανόνιστη καύση, απώλεια λίπανσης με ακόλουθη αύξηση θερμοκρασίας, κ.ά.). Στα ελαττώματα υλικού (κατασκευαστικά ελαττώματα) οφείλονται οι περισσότερες περιπτώσεις αστοχίας, οι οποίες σχετίζονται με δημιουργία πόρων και ασυνεχειών υλικού. Έτσι, υποβαθμίζονται οι ιδιότητες του υλικού σε ορισμένα σημεία και επέρχεται η αστοχία, που συνήθως εμφανίζει σημάδια κόπωσης. Η κόπωση εμφανίζεται, όπως είναι αναμενόμενο, πολύ συχνά σε αυτά τα εξαρτήματα, λόγω των δυσμενών συνθηκών στις οποίες υποβάλλονται.

Αξιολόγηση περιπτώσεων

Στη συγκεκριμένη έρευνα αναλύθηκαν περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Εξετάστηκαν συγκεκριμένες αστοχίες μηχανών εσωτερικής καύσης, τα εξαρτήματα στα οποία αστόχησαν, καθώς και τα αίτια που οδήγησαν σε αυτές τις αστοχίες. Δίνεται έτσι η δυνατότητα, να συγκεντρωθούν τα εξαρτήματα που εμφανίζουν μεγάλη συχνότητα αστοχίας, να καταγραφούν οι λόγοι που την προκάλεσαν, και «έμμεσα» να κατευθύνει τις ενέργειες αντιμετώπισης αυτών των αστοχιών. Παραπάνω, αναλύθηκαν ορισμένες περιπτώσεις αστοχιών σε τρεις κύριες κατηγορίες, στους στροφαλοφόρους άξονες, σε έμβολα και σε κυλίνδρο-κεφαλές. Στο παρακάτω διάγραμμα, διαφαίνεται το ποσοστό κυριότερων αστοχιών αναλογικά με τα εξαρτήματα (η αστοχία πείρου εμβόλου, λαμβάνεται ως αστοχία εμβόλου).



Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, οι στροφαλοφόροι αποτελούν το συχνότερο εξάρτημα θραύσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης, καθώς εμφανίζονται στο 50% των περιπτώσεων. Ακολουθούν οι αστοχίες που εμφανίζονται σε κύλινδρο και κεφαλή και τέλος, αυτές των εμβόλων. Τα κυριότερα αίτια αστοχίας των στροφαλοφόρων αξόνων είναι τα κατασκευαστικά ελαττώματα και η κόπωση. Τα ελαττώματα αυτά αναφέρονται είτε σε σφάλματα κατά τη διαδικασία παραγωγής τους, είτε σε σφάλματα που εμφανίζονται κατά την επιδιόρθωση/συντήρηση αυτών. Η κόπωση είναι μια αιτία που ευνοείται από τα κατασκευαστικά ελαττώματα και επιταχύνει την εμφάνιση της. Οι αιτίες αστοχίας για τα έμβολα και τις κυλινδροκεφαλές είναι παρόμοιες, μιας και υποβάλλονται στις ίδιες συνθήκες καταπόνησης. Η κόπωση και οι υψηλές θερμοκρασίες (και κατ' επέκταση η ακανόνιστη καύση, η απώλεια λίπανσης κ.ά.) αποτελούν σημαντικούς παράγοντες αστοχίας για τα εξαρτήματα αυτά. Ενδιαφέρον θα είχε η συνέχεια της έρευνας στο συγκεκριμένο πεδίο, να μελετηθούν περαιτέρω οι καταστροφικές αστοχίες, ώστε να προσδιοριστούν καλύτερα τα αίτια αυτών και να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα και με το λιγότερο κόστος.

Βιβλιογραφία

1. Κορωνάκη Ε., Κ. (χ.χ). Θερμοδυναμική Ι. *Θερμικές Μηχανές* . Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (παρουσίαση μαθήματος).
2. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. (2012-2013). 1ο ΕΠΑ.Λ. Αμαλιάδας (παρουσίαση μαθήματος).
3. <https://el.wikipedia.org/wiki/> (τελευταία πρόσβαση: 25.10.15), αναζήτηση για:

Μηχανή εσωτερικής καύσης

Μηχανή εξωτερικής καύσης

Ανάκτηση από Ήρων

Κινητήρας Βάνκελ

Κινητήρας αεριώθησης
4. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ, 2. Ε. (2015, 10 30). Ανάκτηση από Αρχές Μηχανολογίας:
<http://2epal-am.weebly.com/thetaepsilonpsilonrhomuiotakappaepsilonsigma-kappaiotanuetaetaetarhoiotaepsilonsigma-muetachialphanuepsilonsigma.html>.
5. Αγερίδης, Γ., Καραμπίλιας, Π., & Ρώσσης, Κ., "Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι", εκδ. ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΑ ΕΚΠΕΔΕΥΤΗΡΙΑ, Αθήνα (2001).
6. <http://users.sch.gr/kassetas/zppzzzzphCARNOT.htm> (τελευταία πρόσβαση: 20.12.16)
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Alphonse_Beau_de_Rochas (τελευταία πρόσβαση: 11.05.15).
8. https://en.wikipedia.org/wiki/Siegfried_Marcus (τελευταία πρόσβαση: 11.05.15).

9. ΚΛΙΑΝΗ, Χ., ΝΙΚΟΛΟΥ, Κ., & ΣΙΔΕΡΗ, Α. (2002). *ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΣΕΩΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ.α
10. https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine (τελευταία πρόσβαση: 11.05.15).
11. <http://auto.howstuffworks.com/stirling-engine.htm> (τελευταία πρόσβαση: 20.12.16)
12. <http://iceal.wikidot.com/vasikes-arches-leitoyrgias-katataxi> (τελευταία πρόσβαση: 11.05.15)
13. Ψυλλάκη, Π. (2013, Μάρτιος). ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ. *ΕΝΟΤΗΤΑ Β: ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*. ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΕΦ/ ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ (παρουσίαση μαθήματος).
14. Espadafor, F. J., Villanueva, J. B., García, M. T., "Analysis of a diesel generator crankshaft failure", *Engineering Failure Analysis*, **16** (2009) 2333-2341.
15. Fonte, M., Duarte, P., Reis, L., Freitas, M., Infante, V., "Failure mode analysis of two crankshafts of a single cylinder diesel engine", *Engineering Failure Analysis*, **56** (2015) 185-193.
16. Pandey, R., " Failure of diesel-engine crankshafts", *Engineering Failure Analysis*, **10** (2003) 165-175.
17. Bayrakçeken, H., Tasgetiren, S., Aksoy, F., "Failures of single cylinder diesel engines crank shafts", *Engineering Failure Analysis*, **14** (2007) 725-730.
18. Ktari, A., Haddar, N., Ayedi, H., "Fatigue fracture expertise of train engine crankshafts", *Engineering Failure Analysis*, **18** (2011) 1085-1093.

19. Fonte, M., Freitas, M. D., "Marine main engine crankshaft failure analysis: A case study", *Engineering Failure Analysis*, **16** (2009) 1940-1947.
20. Asi, O. "Failure analysis of a crankshaft made from ductile cast iron", *Engineering Failure Analysis*, **13** (2006) 1260–1267.
21. Silva, F., "Analysis of a vehicle crankshaft failure", *Engineering Failure Analysis*, **10** (2003) 605-616.
22. Heyes, A. M., "Automotive component failures", *Engineering Failure Analysis*, **5** (1998) 129-141.
23. Wang, C., Zhao, C., Wang, D., "Analysis of an unusual crankshaft failure", *Engineering Failure Analysis*, **12** (2005) 465-473.
24. Yu, Z., Xu, X., "Failure analysis of a diesel engine crankshaft", *Engineering Failure Analysis*, **12** (2005) 487-495.
25. Becerra, J., Jimenez, F., Torres, M., Sanchez, D., Carvajal, E., "Failure analysis of reciprocating compressor crankshafts", *Engineering Failure Analysis*, **18** (2011) 735-746.
26. Silva, F., "Fatigue on engine pistons – A compendium of case studies", *Engineering Failure Analysis*, **13** (2006) 480-492.
27. Floweday, G., Petrov, S., Tait, R., Press, J., " Thermo-mechanical fatigue damage and failure of modern high performance diesel pistons", *Engineering Failure Analysis*, **18** (2011) 1664-1674.

28. Álvarez-Flórez, J., Egusquiza, E., "Analysis of damage caused by siloxanes in stationary reciprocating internal combustion engines operating with landfill gas", *Engineering Failure Analysis*, 50 (2015) 29–38.
29. Riad, W., Hussain, B., Shalaby, H., " Cracking of aluminum cast pistons of fuel gas reciprocating compressors", *Engineering Failure Analysis*, **17** (2010) 440-446.
30. Singh, O., Umbarkar, Y., Sreenivasulu, T., Vetrivendan, E., Kannan, M., Babu, Y., " Piston seizure investigation: Experiments, modeling and future challenges", *Engineering Failure Analysis*, **28** (2013) 302-310.
31. Moosavian, A., Najafi, G., Ghobadian, B., Mirsalim, M., Sharghi, P., "Piston scuffing fault and its identification in an IC engine by vibration", *Applied Acoustics*, **102** (2016) 40-48.
32. Yu, Z., Xu, X., Ding, H., " Failure analysis of a diesel engine piston-pin", *Engineering Failure Analysis*, **14** (2007) 110-117.
33. Xu, X.-l., Yu, Z.-W., "Fracture failure of a diesel engine piston-pin", *Engineering Failure Analysis*, **42** (2014) 263-273.
34. Krstic, B., Rasuo, B., Trifkovic, D., Radisavljevic, I., Rajic, Z., Dinulovic, M., "An investigation of the repetitive failure in an aircraft engine", *Engineering Failure Analysis*, **34** (2013) 335-349.
35. Zhang, Q., Zuo, Z., Liu, J., "Failure analysis of a diesel engine cylinder head based on finite element method", *Engineering Failure Analysis*, **34** (2013) 51-58.

36. Sharifia, S. M., Googarchin, H. S., Forouzesh, F., " Three dimensional analysis of low cycle fatigue failure in engine", *Engineering Failure Analysis*, **62** (2016) 128-141.
37. Xu, X., Yu Z., " Failure analysis of a diesel engine cylinder head", *Engineering Failure Analysis*, **13** (2006) 1101-1107.
38. Espadafor, F. J., Villanueva, J. B., García, M. T., Trujillo, E. C., " Analysis of a diesel generator cylinder failure", *Engineering Failure Analysis*, **17** (2010) 913-925.
39. Ortiz, A., Rodríguez, S., Coronado, J., "Failure analysis of the engine cylinder of a training aircraft", *Engineering Failure Analysis*, **35** (2013) 686-691.