

Τ.Ε.Ι. ΣΕΡΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ
ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ ΕΜΒΟΛΟΥ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ: ΣΕΝΤΕΛΙΔΟΥ ΕΛΕΝΗ

ΜΟΥΤΑΦΙΔΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΤΟΓΙΑΝΤΖΙΚΗΣ ΗΛΙΑΣ

ΣΕΡΡΕΣ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2008

Τ.Ε.Ι. ΣΕΡΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ
ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ ΕΜΒΟΛΟΥ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ: ΣΕΝΤΕΛΙΔΟΥ ΕΛΕΝΗ
ΜΟΥΤΑΦΙΔΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΤΟΓΙΑΝΤΖΙΚΗΣ ΗΛΙΑΣ

ΣΕΡΡΕΣ
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2008

Αναφορές

- Affenzeller, J. and Gläser, H. Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren (Bearings and lubrication of internal combustion engines / in German). Die Verbrennungskraftmaschine, Neues Folge, Band 8. Vienna, Austria, 1996, Springer-Verlag. 397 p. ISBN 3-211-82577-0.
- Akalin, O. and Newaz, G. M. A new experimental technique for friction simulation in automotive piston ring and cylinder liners. Society of Automotive Engineers, Inc., 1998, SAE Paper 981407, 6 p.
- Amoser, M. Insights into piston-running behaviour. Wärtsilä Corporation, Marine News, (2001)2, pp. 23–27.
- Arcoumanis, C. , Duszynski, M., Flora, H. and Ostovar, P. Development of a pistonring lubrication test-rig and investigation of boundary conditions for modelling lubricant film properties. Society of Automotive Engineers, Inc., 1995, SAE Paper 952468, 19 p.
- Ashby, M. F., Kong, H. S. and Abulawi, J. Operating manual for T-maps - a program for constructing maps for surface heating in unlubricated contacts. Cambridge, UK, 1990, Cambridge University, Engineering Department, 54 p.
- Buchmann, M. and Gadow, R. Tribologically optimized ceramic coatings for cylinder liners in advanced combustion engines. Society of Automotive Engineers, Inc., 2001, SAE Paper 2001-01-3548, 7 p.
- Chambers, K. W., Arneson, M. C. and Waggoner, C. A.. An on-line ferromagnetic wear debris sensor for machinery condition monitoring and failure detection. Wear, 128(1988), pp. 325–337.
- Chittenden R. J. and Priest M. Analysis of the piston assembly, bore distortion and future developments. In: Taylor, C.M. (ed.). Engine Tribology. Elsevier, 1993, Tribology series, 26, pp. 241–270. ISBN 0-444-89755-0.

Clarke, D. G., Sherrington, I. and Smith, E. H. Design considerations for a "floating liner" method of measuring piston/piston ring friction in internal combustion engines. In: Holmberg, K. and Nieminen, I. (eds.). Proceedings of the 5th international congress on tribology Eurotrib'89, Espoo, Finland, June 1989. Espoo, 1989, the International Tribology Council and the Finnish Society for Tribology. Vol. 2, pp. 432–438. ISBN 952-90080-1-5.

Coy, R. C. Practical applications of lubrication models in engines. Tribology International, 31(1998)10, pp. 563–571 .

De Petris, C., Giglio, V. and Police, G. Some insights on mechanisms of oil consumption. 1996. Society of Automotive Engineers, Inc., 1996, SAE Technical Paper Series 961216. 13 p.

Dowson, D. Piston assemblies; background and lubrication analysis. In: Taylor, C.M. (ed.). Engine Tribology. Elsevier, 1993, Tribology series, 26, pp. 213–240. ISBN 0-444-89755-0.

Durga, V., Rao, N., Boyer, B. A., Cikanek, H. A. and Kabat, D. M. Influence of surface characteristics and oil viscosity on friction behaviour of rubbing surfaces in reciprocating engines. In: Proc. 1998 Fall Technical Conference ASME-ICE, Vol. 31–2, Paper No. 98-ICE-131, pp. 23–35.

Esser, J. Oil control rings and their effect on oil consumption. MTZ Worldwide, 63(2002)7–8, pp. 22–25 / MTZ, 63(2002)7–8, pp. 592–601.

Federal-Mogul Kolbenringe Kurbelgehäuse (piston rings / crankcases). Sonderdruck aus (reprinted from) ATZ/MTZ - Supplement Shell Lexicon Verbrennungsmotor. This edition: Burcheid, Germany, 1998, Federal-Mogul Powertrain Systems, 32 p.

Fitch, J. C. and Troyer, D. D. Sampling methods for used oil analysis. Lubrication Engineering, 56(2000)3, pp. 40–47.

- Fox, M. F. Ring zone lubrication: implications for reduced emissions and enhanced engine life. In: Lenthall J.S. (ed.). Collected papers from the one-day seminar The Tribology of Internal Combustion Engines, University of Birmingham, UK, 7 November 1996. London, UK, 1996, Mechanical Engineering Publications Limited, pp. 9–28. ISBN 1-86058-071-8.
- Galligan, J., Torrance, A. A. and Liraut, G. A scuffing test for piston ring/bore combinations Part I. Stearic acid lubrication. *Wear*, 236(1999a)1–2, pp. 199–209.
- Glaeser, W. A. *Materials for tribology*. Amsterdam, The Netherlands, 1992, Elsevier Science Publishers B.V., Tribology Series 20, 260 p. ISBN 0-444-88495-5.
- Gamble, R. J. (2003). "Detailed Analysis of Oil Transport in the Piston Assembly of a Gasoline Engine." *Tribology Letters* 14(2): 147-156.
- Unabomber (2008). "Piston FAQ." forums.nasioc.com/forums/showthread.php?t=907570.
- Cater M. (2007). "Experimental Investigation of Surface Modifications for Piston-Ring / Cylinder-Liner Friction Reduction." Mechanical Engineering Tribology Laboratory (METL).
- Haselkorn, M. H. and Kelley, F. A. Development of wear resistant ceramic coatings for diesel engines, SAE Proceedings of the Annual Automotive Technology Development Contractors Co-ordination Meeting, 1992, pp. 417–424.
- Holmberg, K. and Matthews, A. *Coatings tribology*. Amsterdam, The Netherlands, 1994, Elsevier Science B.V., Dowson, D. (ed.), Tribology Series, 28, 442 p. ISBN 0 444 88870 5.
- Hu, Y. Z., Li, N. and Tønder, K. A dynamic system model for lubricated sliding wear and running-in. *Transactions of the ASME, Journal of Tribology*, 113(1991), pp. 499–505.
- Lipp, S. and Schmidt, R. The new FERROCOMP_ -piston for high cylinder output. Hamburg, Germany, 2001, CIMAC. Proc. 23rd CIMAC world congress on combustion engine technology for ship propulsion, power generation, rail traction, Vol. 2, pp. 527–535.

Loenne, K. The effects of the engine operating conditions on cylinder distortions.

Muskegon Engineering Data, Goetze paper D7, 1972.

Matthews, C. Engineers' data book; Second edition. London, UK, 2000. Professional Engineering Publishing Limited. 238 p. ISBN 1 86058 248 6.

Ohlsson, R. A topographic study of functional surfaces. Göteborg, Sweden, 1996, Chalmers University of Technology, Department of Production Engineering, Doctors Thesis, PTA 96:05, ISBN 91-7197-351-6, ISSN 1100-7524, 43 p. + Appx. 76 p.

Priest, M. and Taylor, C. M. Automobile engine tribology - approaching the surface. *Wear*, 241(2000)2, pp. 193–203.

Priest, M., Dowson, D. and Taylor, C. M. Predictive wear modelling of lubricated piston rings in a diesel engine. *Wear*, 231(1999)1, pp. 89–101.

Reipert, P. and Voigt, M. Simulation of the Piston/Cylinder Behavior for Diesel Engines. Society of Automotive Engineers, Inc., 2001, SAE Technical Paper Series 2001-01-0563. 18 p.

Richardson, D. E. Comparison of measured and theoretical inter-ring gas pressure on a diesel engine. Society of Automotive Engineers, Inc., 1996, SAE Technical Papers Series 961909. Pp. 7–20.

Röhrle, M. D. Pistons for internal combustion engines – fundamentals of piston technology, MAHLE GmbH. Verlag Moderne Industrie. Landsberg/Lech, Germany. 1995. p. 70.

Sui, P. C. and Ariga, S. Piston ring pack friction and lubrication analysis of an automobile engine using a mixed lubrication model. Society of Automotive Engineers, Inc., 1993, SAE Paper 931937, 15 p.

Taylor, R. I. Engine friction: the influence of lubricant rheology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J, *Journal of Engineering Tribology*, 211(1997)3, pp. 235–246.

Tian, T., Wong, V. W. and Heywood, J. B. Modeling the dynamics and lubrication of

three piece oil control rings in internal combustion engines. Society of Automotive Engineers, Inc., 1998, SAE Paper 982657, 17 p.

Wang, Y. and Tung, S.C. Scuffing and wear behavior of aluminum piston skirt coatings against aluminum cylinder bore. *Wear*, 225–229(1999)2, pp. 1100–1108.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή.....	1
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ελατήρια εμβόλου

2.1 Κύριες λειτουργίες των ελατηρίων εμβόλου.....	4
2.2 Κατηγορίες ελατηρίων.....	4
2.2.1 Ελατήρια συμπίεσης.....	5
2.2.2 Ελατήρια λαδιού.....	6
2.3 Υλικά και επικαλύψεις ελατηρίων εμβόλου.....	7
2.4 Στεγανωτική ικανότητα των ελατηρίων εμβόλου.....	9
2.4.1 Ικανότητα προσαρμογής των ελατηρίων.....	9
2.4.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ επιφανειών ελατηρίου-κυλίνδρου.....	9
2.4.3 Πρόληψη διαφυγής.....	9
2.4.4 Μείωση κατανάλωσης λιπαντικού και εκπομπών ρύπων.....	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

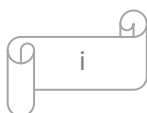
Ποδιά εμβόλου και υποδοχές ελατηρίων

3.1 Τύποι εμβόλου και γεωμετρία αυτών.....	13
3.2 Υλικά κατασκευής εμβόλου.....	15
3.3 Υποδοχές ελατηρίων εμβόλου.....	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Χιτώνια κυλίνδρου

4.1 Υλικά κατασκευής χιτωνίου κυλίνδρου.....	18
4.2 Πρόσδοση τραχύτητας στο χιτώνιο.....	19
4.3 Μακρόμορφη απόκλιση χιτωνίων κυλίνδρου.....	20



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μηχανική ελατηρίων εμβόλου

5.1	Κινηματική και κινητική των ελατηρίων εμβόλου.....	23
5.2	Δυνάμεις και ροπές των ελατηρίων εμβόλων.....	26
5.3	Πίεση επαφής ελατηρίου.....	28
5.3.1	Πίεση επαφής λόγω συμπίεσης του ελατηρίου.....	28
5.3.2	Πίεση επαφής λόγω πίεσης αερίων.....	28
5.3.3	Πρόσθετα φορτία λόγω παραμόρφωσης της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου και του ελατηρίου.....	28
5.3.4	Ανομοιόμορφη κατανομή πίεσης λόγω κλίσης του ελατηρίου.....	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Θερμικά φορτία

6.1	Μακροσκοπικά θερμικά φορτία.....	30
6.2	Μικροσκοπικά θερμικά φορτία.....	31
6.2.1	Θέρμανση λόγω τριβής σε μη λιπασμένες επιφάνειες ολίσθησης.....	31
6.2.2	Θέρμανση του λιπαντικού που οφείλεται στο ιξώδες.....	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Λίπανση ελατηρίων και ποδιάς εμβόλου

7.1	Παροχή λιπαντικού.....	34
7.1.1	Μηχανισμοί παροχής λιπαντικού και ποσότητα λιπαντικού.....	34
7.1.2	Ποιότητα λιπαντικού.....	36
7.1.3	Ρύπανση του λιπαντικού.....	37
7.1.4	Σχηματισμός αποθέσεων άνθρακα-Ελατήριο αποθέσεων άνθρακα.....	39
7.2	Συνθήκες λίπανσης, φορτίο, ταχύτητα, ιξώδες και επιφανειακά φαινόμενα.....	40
7.2.1	Υπολογισμός του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού.....	41

7.2.2 Μετρήσεις του πάχους μεμβράνης λιπαντικού.....	45
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Τριβή των ελατηρίων και της ποδιάς του εμβόλου έναντι του χιτωνίου του κυλίνδρου

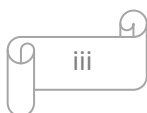
8.1 Τριβή των ελατηρίων εμβόλου στην επιφάνεια του χιτωνίου.....	49
8.1.1 Θεμελιώδης αρχές της τριβής των ελατηρίων εμβόλου.....	49
8.1.2 Προσομοίωση της τριβής.....	51
8.1.3 Μετρούμενες δυνάμεις και συντελεστές τριβής.....	52
8.1.4 Επίδραση της ποιότητας επιφάνειας των ελατηρίων εμβόλου και των επικαλύψεων τους.....	56
8.1.5 Επίδραση της ποιότητας επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου και των επικαλύψεων του.....	56
8.1.6 Επίδραση της ανοχής κυλινδρικότητας (μορφής) του χιτωνίου του κυλίνδρου.....	57
8.2 Τριβή της ποδιάς του εμβόλου και των ελατηρίων του στη επιφάνεια του χιτωνίου του κυλίνδρου	57
8.2.1 Κανονικές συνθήκες λειτουργίας.....	59
8.2.2 Γραμμώσεις.....	59
8.2.3 Κόλλημα του εμβόλου.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Τεχνολογίες κατεργασίας επιφανειών

10.1 Τεχνικές επικάλυψης και κατεργασίας επιφανειών.....	69
10.2 Επιφανειακή τραχύτητα	75
10.2.1 Βασικές αρχές της επιφανειακής τραχύτητας.....	76
10.2.2 Τοπογραφία και ανάγλυφο.....	77
10.2.3 Επιφάνειες με ανάγλυφο.....	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11



Περίληψη και συμπεράσματα.....78

1. Εισαγωγή

Υπάρχουν δύο εντελώς διαφορετικά ζητήματα που κάνουν τη δυναμική στεγανοποίηση ιδιαίτερα απαιτητική από τριβολογική άποψη. Πρωτίστως, τα στεγανοποιητικά διατηρούν την καθαρότητα του λιπαντικού και την προστασία των τριβολογικών στοιχείων από εξωτερική ρύπανση και για το λόγο αυτό συμβάλουν στη μείωση της φθοράς λόγω λείανσης που προέρχεται από διάφορα ξένα σωματίδια. Ταυτόχρονα, η στεγανοποίηση μειώνει τη διαρροή του λιπαντικού από το σύστημα τριβής, και αυτό είναι κάτι το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τις απαιτήσεις για περιβαλλοντική προστασία. Κατά δεύτερον, οι αντιτιθέμενες επιφάνειες που έχουν μεταξύ τους μια σχετική κίνηση λειτουργούν υπό τους ίδιους τριβολογικούς νόμους, όπως οποιαδήποτε ολισθαίνοντα ζεύγη και βεβαίως με απαιτήσεις μικρής τριβής, μικρής φθοράς και μεγάλης διάρκειας ζωής. Τα στεγανοποιητικά για ευθύγραμμη κίνηση παρουσιάζουν αρκετές προκλήσεις όπως για παράδειγμα η τραχύτητα του ζεύγους επιφανειών, η κατεύθυνση ολίσθησης, η σχετική ταχύτητα και το είδος της λίπανσης που ποικίλουν πολύ περισσότερο από ότι σε ένα κλειστό σύστημα στεγανοποίησης για περιστροφική κίνηση.

Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των δυναμικών στεγανοποιητικών για ευθύγραμμη κίνηση είναι ότι λειτουργούν έναντι συστήματος παλινδρομώντων επιφανειών, και για το λόγο αυτό πρέπει να παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε ότι αφορά την ικανότητα στεγανοποίησης, εμφάνισης χαμηλού συντελεστή τριβής και φθοράς του συστήματος των επιφανειών. Η φθορά στις συνεργαζόμενες επιφάνειες, η οποία προκαλείται από παλινδρομική επαφή με το έμβολο ή με γραμμικούς τριβείς, οδηγεί σε μεταβολή της ποιότητας των επιφανειών, η οποία με τη σειρά της μεταβάλλει τις αρχικές συνθήκες της δυναμικής στεγανοποίησης.

Τα ελατήρια εμβόλου για σύγχρονες μηχανές εσωτερικής καύσης πρέπει να ανταποκρίνονται σε όλες τις απαιτήσεις μίας δυναμικής στεγανοποίησης για ευθύγραμμη κίνηση, που λειτουργεί κάτω από απαιτητικές θερμικές και χημικές συνθήκες. Εν συντομία μπορούν να προσδιοριστούν οι παρακάτω απαιτήσεις για ελατήρια εμβόλου:

- Χαμηλή τριβή, για υποστήριξη υψηλών ρυθμών απόδοσης ισχύος.
- Χαμηλό ρυθμό φθοράς του ελατηρίου για εξασφάλιση μεγάλης διάρκειας ζωής.
- Χαμηλό ρυθμό φθοράς του χιτωνίου του κυλίνδρου, για τη διατήρηση της επιθυμητής επιφανειακής υφής του χιτωνίου.
- Μείωση εκπομπών ρύπων που προέρχονται από την καύση του λιπαντικού, περιορίζοντας τη ροή του λιπαντικού προς το θάλαμο καύσης.
- Καλή ικανότητα στεγανοποίησης και μικρή διαφυγή καυσαερίων προς το στροφαλοθάλαμο, ώστε να μη μειώνεται ο ρυθμός απόδοσης ισχύος.
- Αξιόπιστη λειτουργία και αποτελεσματικό κόστος για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι τριβολογικές μελέτες στις επαφές που σχηματίζονται από την ποδιά του εμβόλου, τα ελατήρια του εμβόλου και το χιτώνιο του κυλίνδρου, έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες και αυτό άλλωστε αποδεικνύεται από έναν μεγάλο αριθμό άρθρων που δημοσιεύθηκαν πάνω σε αυτό το θέμα τα τελευταία χρόνια. Πρόσφατες μελέτες περιλαμβάνουν μοντελοποίηση, πειραματικές εργασίες υπό κλίμακα και δοκιμές κινητήρων σε πραγματικό μέγεθος.

Η εργασία αυτή, σκοπό έχει να αναδείξει τα τριβολογικά ζητήματα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία της διάταξης εμβόλου – ελατηρίων – κυλίνδρου. Για την εργασία αυτή, έχει ληφθεί υπόψη βιβλιογραφία που αφορά τις μηχανές εσωτερικής καύσης γενικά, με ιδιαίτερη έμφαση σε βιβλιογραφία που βασίζεται σε πετρελαιομηχανές.

2. Ελατήρια εμβόλου

Στις πρώτες ατμομηχανές δεν χρησιμοποιούνταν ελατήρια εμβόλου. Οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις ατμών δεν ήταν τόσο υψηλές όσο οι αντίστοιχες παράμετροι στις σημερινές μηχανές εσωτερικής καύσης και η ανάγκη μελέτης της θερμικής διαστολής και των διακένων ήταν μικρότερη. Με την αύξηση της απαιτούμενης ισχύος εμφανίζονταν και υψηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες προκαλούσαν μεγαλύτερη θερμική διαστολή του υλικού του εμβόλου. Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ενός στεγανοποιητικού μεταξύ του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου για να επιτευχθεί μείωση του διακένου σε ψυχρές συνθήκες λειτουργίας, όπου τα διάκενα έχουν τη μέγιστη τιμή τους. Διατηρώντας το διάκενο μεταξύ του εμβόλου και του χιτωνίου στο ελάχιστο πετυχαίνεται η μείωση της διαφυγής καυσαερίων κάτω από το έμβολο, προς το στροφαλοθάλαμο.

Τα πρώτα ελατήρια εμβόλου που χρησιμοποιήθηκαν σε μηχανές είχαν τον απλό ρόλο της στεγάνωσης του θαλάμου καύσης, και συνεπώς, της παρεμπόδισης διαφυγής καυσαερίων προς το στροφαλοθάλαμο. Με αυτή τη διάταξη αυξάνει η πραγματική πίεση στο έμβολο. Οι Ramsbottom και Miller ήταν μεταξύ των πρωτοπόρων που μελέτησαν τη συμπεριφορά των ελατηρίων του εμβόλου σε ατμομηχανές. Ο Ramsbottom το 1984 κατασκεύασε ένα ενιαίο, μεταλλικό ελατήριο εμβόλου. Η ελεύθερη διάμετρος του ελατηρίου ήταν 10% μεγαλύτερη από την εσωτερική διάμετρο του κυλίνδρου. Όταν προσαρμόζεται το ελατήριο στην υποδοχή του εμβόλου πιέζεται στα εσωτερικά τοιχώματα του κυλίνδρου λόγω εσωτερικών ελαστικών δυνάμεων. Προγενέστερες κατασκευές ελατηρίων εμβόλου αποτελούνταν από πολλά κομμάτια (δηλ. ήταν διαιρούμενα) και είχαν πρόσθετο ελατηριωτό τμήμα ώστε να τους παρέχει την απαραίτητη ελαστική δύναμη έναντι της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου. Ο Miller, το 1962 εισήγαγε μια τροποποίηση στο ελατήριο του Ramsbottom. Αυτή η τροποποίηση δημιουργήθηκε για να μπορέσει η πίεση του ατμού να λειτουργήσει στην πίσω πλευρά του ελατηρίου, και λόγω αυτού εξασφαλίζεται μία μεγαλύτερη στεγανοποιητική δύναμη. Αυτή η λύση κατέστησε δυνατή τη χρησιμοποίηση περισσότερων εύκαμπτων ελατηρίων, τα οποία προσαρμόζονται καλύτερα στην εσωτερική διάμετρο του κυλίνδρου (Priest και Taylor, 2000).

Σε προγενέστερες περιόδους, τα ελατήρια λιπαίνονταν μεμονωμένα με εκτόξευση του λιπαντικού, π.χ. λίπανση με εκτόξευση λόγω βύθισης κατάλληλης διαμόρφωσης του περιστρεφόμενου στροφαλοφόρου άξονα, στην ελεύθερη επιφάνεια του λιπαντικού της ελαιολεκάνης. Εν συνεχεία όταν οι συνθήκες καύσης έγιναν πολύ πιο απαιτητικές, π.χ. με υψηλότερες θερμοκρασίες, πιέσεις και ταχύτητες εμβόλων, άρχισαν να χρησιμοποιούνται και τα ελατήρια λαδιού. Ο σχηματισμός κατάλληλης λιπαντικής μεμβράνης επάνω στο έμβολο, στα ελατήρια του εμβόλου και στα τοιχώματα του κυλίνδρου, έγινε αναγκαίος προκειμένου να παρεμποδιστεί η φθορά. Τα ελατήρια λαδιού ήταν και είναι ειδικά σχεδιασμένα ώστε να κατανέμουν κατάλληλα το λιπαντικό στα τοιχώματα του κυλίνδρου και για να αποξέουν την περίσσεια του λιπαντικού, ώστε να επιστρέφει στο στροφαλοθάλαμο.

2.1 Κύριες λειτουργίες των ελατηρίων εμβόλου

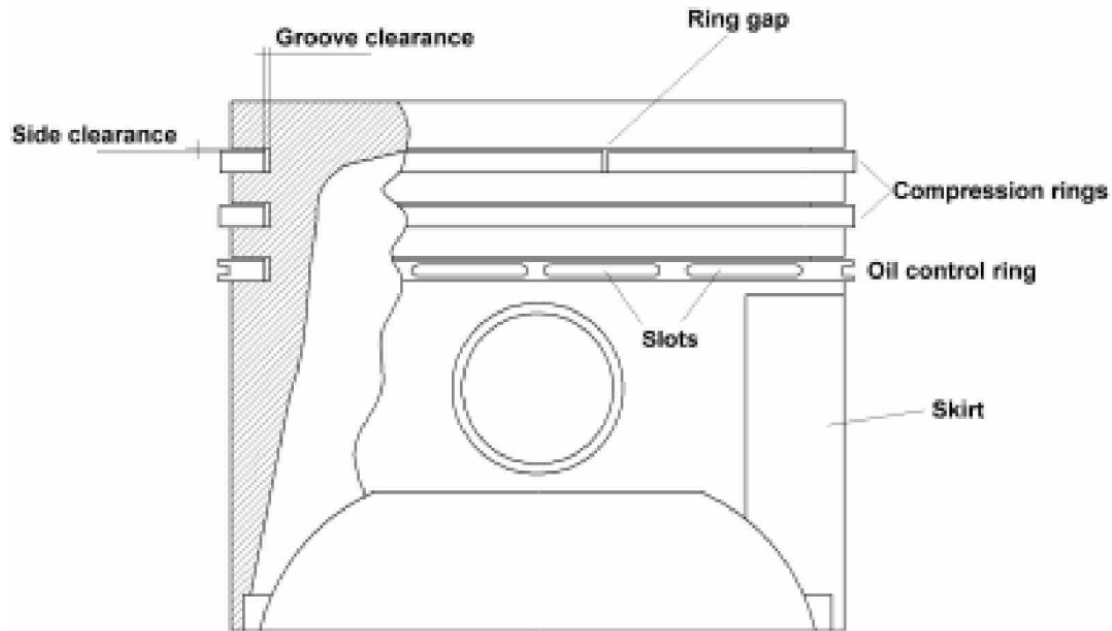
Οι λειτουργίες ενός ελατηρίου εμβόλου είναι:

- ✓ να στεγανοποιεί το θάλαμο καύσης κατά τη συμπίεση,
- ✓ να κατανέμει και να ελέγχει το λιπαντικό στα τοιχώματα του κυλίνδρου,
- ✓ να μεταφέρει θερμότητα από την κεφαλή του εμβόλου στα τοιχώματα του κυλίνδρου, και
- ✓ να σταθεροποιεί το έμβολο κατά την παλινδρομική κίνησή του.

Το έμβολο είναι κατασκευασμένο ώστε να δέχεται θερμική διαστολή, με ένα επιθυμητό διάκενο μεταξύ της επιφάνειας του εμβόλου και του τοιχώματος του κυλίνδρου. Τα ελατήρια και οι υποδοχές των ελατηρίων σχηματίζουν έναν λαβύρινθο στεγάνωσης, ο οποίος μονώνει σχετικά καλά το θάλαμο καύσης από το στροφαλοθάλαμο. Η θέση και η κατασκευή της ζώνης των ελατηρίων φαίνεται στην **Εικ. 2.1**. Η επιφάνεια επαφής του ελατηρίου προσαρμόζεται στο τοίχωμα του χιτωνίου και έχει δυνατότητα κίνησης στην υποδοχή του στεγανοποιώντας το διάκενο που οδηγεί τα καυσαέρια στο στροφαλοθάλαμο. Η ικανότητα στεγανοποίησης του ελατηρίου εξαρτάται από έναν αριθμό από παράγοντες, όπως την κατάλληλη επαφή του ελατηρίου και του χιτωνίου, την προένταση του ελατηρίου και την κατανομή δυνάμεων των αερίων στις επιφάνειες επαφής των ελατηρίων. Οι δυνάμεις των ελατηρίων του εμβόλου αναφέρονται αναλυτικότερα στην **Παράγραφο 5.2**. Σε κάποιους από τους θαλάμους καύσης γίνεται μεταφορά θερμικής ενέργειας στα άκρα του εμβόλου μέσα από το έμβολο π.χ. στην ποδιά του εμβόλου και στα ελατήρια μέσω των οποίων μεταφέρεται η θερμότητα στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Επιπλέον, τα ελατήρια του εμβόλου εμποδίζουν την περίσσεια του λιπαντικού να εισέλθει στο θάλαμο καύσης, αποξέοντάς το λιπαντικό από το τοίχωμα του χιτωνίου κατά τη διάρκεια μετακίνησης του εμβόλου στο κάτω νεκρό σημείο. Τα ελατήρια εμβόλου στηρίζουν τα έμβολα και, συνεπώς, ελαττώνουν τις κρούσεις που προκαλούνται από την κίνηση του εμβόλου, κυρίως κατά τη διάρκεια της ψυχρής εκκίνησης όπου το διάκενο είναι μεγαλύτερο από ότι σε τρέχουσες συνθήκες. Τα ελατήρια γενικά διαθέτουν εγκοπή σε μία θέση, και γι' αυτό μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν στο έμβολο (**Εικ. 2.1**).

2.2 Κατηγορίες ελατηρίων

Τα ελατήρια εμβόλου αποτελούν ένα πακέτο ελατηρίων που συνήθως περιέχει δύο έως πέντε ελατήρια, συμπεριλαμβανομένου τουλάχιστον ενός ελατηρίου συμπίεσης. Ο αριθμός του συνόλου των ελατηρίων εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής, αλλά συνήθως αποτελείται από δύο έως τέσσερα ελατήρια συμπίεσης και κανένα έως τρία ελατήρια λαδιού. Για παράδειγμα, υψηλής ταχύτητας τετράχρονοι πετρελαιομηχανές έχουν δύο ή τρία ελατήρια συμπίεσης και ένα μόνο ελατήριο λαδιού. Τα ελατήρια λαδιού που χρησιμοποιούνται στις πετρελαιομηχανές αποτελούνται από δύο κομμάτια συναρμολογούμενα και τα ελατήρια λαδιού σε βενζινομηχανές συνήθως αποτελούνται από τρία κομμάτια συναρμολογούμενα. Επιπρόσθετα, εκτός από τα ελατήρια συμπίεσης και τα ελατήρια λαδιού μπορεί να υπάρχουν και τα ελατήρια απόξεσης, των οποίων ο ρόλος είναι να στεγανοποιούν και ταυτόχρονα να αποξέουν λιπαντικό από τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Τα ελατήρια απόξεσης διαθέτουν μία χαρακτηριστική ακμή για την απόξεση του λιπαντικού, (**Εικ. 2.5α** και **2.5β**).



Εικόνα 2.1 - Έμβολο και ελατήρια εμβόλου.

2.2.1 Ελατήρια συμπίεσης

Τα ελατήρια συμπίεσης λειτουργούν σαν στεγανοποιητικό μεταξύ του εμβόλου και του τοιχώματος του χιτωνίου εμποδίζοντας τα καυσαέρια να περάσουν στο στροφαλοθάλαμο. Τα ελατήρια έχουν καθορισμένη προέκταση, π.χ. έχουν μεγαλύτερη διάμετρο σε ελεύθερη κατάσταση από ότι το χιτώνιο του κυλίνδρου, η οποία βοηθά το ελατήριο να προσαρμοστεί στο χιτώνιο. Η πίεση των αερίων στον κύλινδρο εφαρμόζεται στο πίσω μέρος των ελατηρίων ιδιαίτερα στο πρώτο ελατήριο, πιέζοντας το ενάντια στο χιτώνιο. Η κατανομή δύναμης του ελατηρίου εξαρτάται από τη μορφή της επιφάνειας επαφής. Με ένα προφίλ ορθογωνικής επιφάνειας επαφής του ελατηρίου, η ελαστική δύναμη είναι μεγαλύτερη από ότι με μία βαρελοειδή (ή ελλειψοειδή) επιφάνεια επαφής, διότι η πίεση των αερίων λόγω συμπίεσης είναι ικανή να επενεργήσει στην πλευρά της επιφάνειας επαφής του βαρελοειδούς ελατηρίου και για το λόγο αυτό εξουδετερώνει ένα μέρος της ελαστικής δύναμης του ελατηρίου.

Αναμφίβολα τα επίπεδα ελατήρια συμπίεσης, με ορθογωνική διατομή, χαρακτηρίζονται ως ικανοποιητικά από άποψη στεγανοποίησης και αυτός ο τύπος ελατηρίου συμπίεσης συναντάται πολύ συχνά, (Εικ. 2.2a). Η λειτουργία των ελατηρίων με προφίλ κυλινδρικής επιφάνειας επαφής, (Εικ. 2.2b), επίσης θεωρείται ικανοποιητική. Ένα ελατήριο μπορεί να έχει και κωνικό προφίλ με σκοπό τη μείωση της χρονικής διάρκειας του ρονταρίσματος, (Εικ. 2.2c). Το κωνικό προφίλ της επιφάνειας επαφής καθιστά ικανή την επενέργεια της πίεσης των καυσαερίων στην πλευρά της επιφάνειας επαφής και για το λόγο αυτό αντισταθμίζει μέρος της πίεσης που ασκείται στο τοίχωμα του χιτωνίου, με συνέπεια να μειώνει το ρυθμό φθοράς κατά τη διάρκεια του ρονταρίσματος. Ένα προφίλ κωνικής επιφάνειας επαφής έχει μεγάλη ικανότητα απόξεσης λιπαντικού, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το

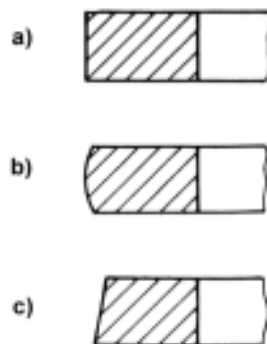
ελατήριο αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν ελατήριο απόξεσης λιπαντικού, όπως βέβαια και σαν ελατήριο συμπίεσης.

Τα ελατήρια με εσωτερική φαλτσογωνιά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ελατήρια συμπίεσης, (Εικ. 2.3). Η φαλτσογωνιά προκαλεί τη συστροφή του ελατηρίου μέσα στην υποδοχή του κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μηχανής. Σε συνθήκες λειτουργίας τα ελατήρια με εσωτερική φαλτσογωνιά πιέζονται επίπεδα έναντι του τοιχώματος του χιτωνίου και αυτό οφείλεται στην πίεση των αερίων η οποία προκαλεί μία επιπλέον πίεση στο ελατήριο από την πίσω πλευρά.

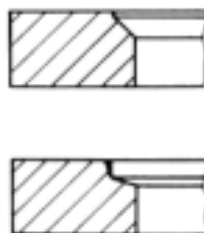
Το σφηνοειδές προφίλ χρησιμοποιείται με σκοπό την αποτροπή σφήνωσης του ελατηρίου στην υποδοχή του, (Εικ. 2.4). Υψηλή θερμοκρασία, μπορεί να προκαλέσει την εξανθράκωση του λιπαντικού στις υποδοχές των ελατηρίων. Το σφηνοειδές προφίλ κάνει το αξονικό διάκενο του ελατηρίου μεγαλύτερο με παράλληλη αύξηση του ακτινικού διακένου της υποδοχής. Τα ελατήρια απόξεσης που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν δεύτερα ελατήρια συμπίεσης μπορούν ταυτόχρονα να χρησιμοποιηθούν σαν ελατήρια απόξεσης λιπαντικού, (Εικ. 5a και 2.5b).

2.2.2 Ελατήρια λαδιού

Σε αντίθεση με το ρόλο των ελατηρίων συμπίεσης που στεγανοποιούν το θάλαμο καύσης από το στροφαλοθάλαμο, χρειάζεται να υπάρχει κάποιος μηχανισμός για να κατανέμει το λιπαντικό ομοιόμορφα πάνω στο χιτώνιο. Ο αριθμός των ελατηρίων λαδιού στο πακέτο των ελατηρίων είναι ένα ή δύο. Φυσιολογικά ένα μονό ελατήριο λαδιού είναι επαρκές, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να απαιτείται και ένα δεύτερο ελατήριο. Η εμφάνιση του ελατηρίου λαδιού διαφέρει από αυτή των ελατηρίων συμπίεσης, (Εικ. 2.5c και 2.5d).



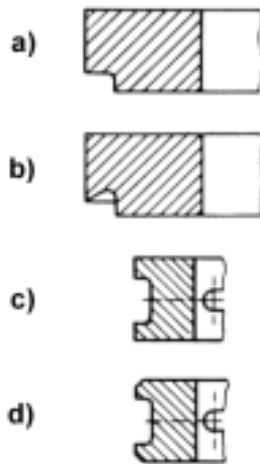
Εικόνα 2.2 – Τομή διαφόρων μορφών ελατηρίων συμπίεσης (ISO 6621-1).



Εικόνα 2.3 – Σχηματικές παραστάσεις ελατηρίων με εσωτερική φαλτσογωνιά (ISO 6621-1).



Εικόνα 2.4 – Σχηματική παράσταση ελατηρίου με σφηνοειδές προφίλ. (ISO 6621-1).



Εικόνα 2.5 – Σχηματικές παραστάσεις ελατηρίων συμπίεσης και λαδιού. (ISO 6621-1).

Το ελατήριο λαδιού φέρει οπές στην περιφέρειά του, (**Εικ. 2.1**), οι οποίες εξασφαλίζουν μία δίοδο διαφυγής του λιπαντικού από την περιοχή της ζώνης των ελατηρίων. Η περίσσεια του λιπαντικού συλλέγεται στην υποδοχή του ελατηρίου λαδιού και μεταφέρεται μέσω του εμβόλου πίσω στο στροφαλοθάλαμο. Η περίσσεια του λιπαντικού μπορεί να εισέλθει μέσα σε πιθανό διάκενο μεταξύ του τοιχώματος του χιτωνίου και της ποδιάς του εμβόλου. Τα ελατήρια λαδιού μπορούν να διαθέτουν ένα πρόσθετο ελατηριωτό τμήμα, συνήθως ελικοειδούς μορφής, καθώς η προένταση του ελατηρίου δεν είναι επαρκής σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτή η πρόσθετη ελαστική δύναμη των ελατηρίων λαδιού, τα αναγκάζει να λειτουργούν κάτω από τις πιο ακραίες συνθήκες λίπανσης, παρόλο που αυτά είναι τα ελατήρια που κατεξοχήν ρυθμίζουν την κατανομή του λιπαντικού. Τα ελατήρια λαδιού δεν είναι πάντοτε απαραίτητα, σε αντίθεση με τα ελατήρια συμπίεσης. Σε δίχρονα βενζινομηχανές, για παράδειγμα, το λιπαντικό αναμιγνύεται με το καύσιμο υλικό, και για το λόγο αυτό δεν χρειάζονται ελατήρια λαδιού.

2.3 Υλικά και επικαλύψεις ελατηρίων εμβόλου

Το υλικό ενός ελατηρίου εμβόλου είναι επιλεγμένο ώστε να ανταποκρίνεται στις διάφορες απαιτήσεις που προκύπτουν από τη λειτουργία της μηχανής. Επιπλέον, το υλικό πρέπει να ανθίσταται στη φθορά ακόμη και σε ακραίες συνθήκες. Η ελαστικότητα και η αντίσταση στη διάβρωση είναι παράμετροι μεγάλης σημασίας για το υλικό του ελατηρίου. Η επικάλυψη του ελατηρίου, αν κρίνεται απαραίτητη, πρέπει να συνεργάζεται σωστά με τα υλικά του ελατηρίου και του χιτωνίου, καθώς επίσης και με το λιπαντικό. Επειδή ένα από τα καθήκοντα του ελατηρίου είναι να απάγει θερμότητα από το έμβολο και να την οδηγεί στα τοιχώματα του χιτωνίου, υπάρχει απαίτηση ώστε το υλικό του να έχει καλή θερμική αγωγιμότητα. Συνήθως, ο φαιός χυτοσίδηρος χρησιμοποιείται ως το βασικό υλικό των ελατηρίων εμβόλου (Federal Mogul, 1998). Από τριβολογικής πλευράς, ο φαιός

χυτοσίδηρος είναι προνομιούχος, καθώς λειτουργεί ως στερεό λιπαντικό λόγω της κρυσταλλικής δομής του γραφίτη (που *απαρτίζεται από επίπεδα που σχηματίζουν επάλληλες στρώσεις*) υπό συνθήκες έλλειψης λιπαντικού. Επιπλέον η στερεή φάση του γραφίτη μπορεί να λειτουργήσει και σαν δεξαμενή λαδιού η οποία προμηθεύει λιπαντικό κατά την αρχική (στεγνή) εκκίνηση ή σε αντίστοιχες συνθήκες κακής λίπανσης (Glaeser, 1992).

Οι επικαλύψεις ελατηρίων χρησιμοποιούνται ευρέως. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας επικάλυψης είναι το χρώμιο, που χρησιμοποιείται εκεί όπου οι συνθήκες είναι διαβρωτικές και λειαντικές, και συνεπώς, πολύ απαιτητικές. Η επιμετάλλωση σκληρού χρωμίου είναι ιδιαίτερος κατάλληλη για το ελατήριο συμπίεσης.

Στις επιφάνειες των ελατηρίων, επιπρόσθετα με την επιμετάλλωση χρωμίου, μπορεί να γίνει θερμική κατεργασία ψεκασμού (κατεργασία πλάσματος) με μολυβδαίνιο, σύνθετες μεταλλικές ενώσεις, ενώσεις μετάλλων με κεραμικό υλικό ή κεραμικές ενώσεις, ως ενιαία επικάλυψη ή ως εσωτερική ενίσχυση της επικάλυψης του υλικού (Mollenhauer, 1997).

Πειραματικές εργασίες με νέες ενώσεις υπό μορφή κόνεως κατάλληλες για θερμικό ψεκασμό περιλαμβάνουν κράματα μολυβδαινίου – νικελίου – χρωμίου, οξείδιο του χρωμίου (Cr_2O_3) με συνδετικό υλικό μεταλλικού χρωμίου, οξείδιο του αργιλίου ή τιτανίου ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$), καρβίδιο του βολφραμίου (WC) με συνδετικό υλικό μεταλλικού κοβαλτίου, MoSi_2 , CrC-NiCr (Dufrane, 1989, Radil, 2001). Οι επιστρώσεις σκληρού χρωμίου μπορούν να βελτιωθούν ψεκάζοντας κεραμικό υλικό που περιέχει χρώμιο στο πρόσωπο του ελατηρίου αυξάνοντας έτσι την ικανότητα θερμικής φόρτισης. Μία πυκνή επικάλυψη καρβιδίου του χρωμίου θεωρείται υποσχόμενη σε εφαρμογές ελατηρίων εμβόλου σύμφωνα με μελέτες των Rastegar και Richardson (Rastegar και Richardson, 1997).

Λεπτές, σκληρές επικαλύψεις περιλαμβάνουν σύνθετου τύπου επικαλύψεις, όπως νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) και νιτρίδιο του χρωμίου (CrN). Παρ' όλα αυτά, επικαλύψεις τέτοιου τύπου είναι χρησιμοποιούνται σήμερα αποκλειστικά σε περιορισμένη παραγωγή για αγωνιστικές μηχανές και επιλεγμένες μηχανές παραγωγής (Federal Mogul, 1998, Broszeit et al., 1999). Πολυστρωματικές επικαλύψεις τύπου Ti-TiN έχουν πειραματικά εναποτεθεί πάνω σε χυτοσιδηρά ελατήρια εμβόλου και θεωρείται πως είναι περισσότερο ανθεκτικές σε φθορά σε σχέση με μια επίστρωση χρωμίου ή φωσφορικού άλατος, ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των στρωμάτων είναι μεγάλος (Zhuo et al., 2000).

Οι Haselkorn και Kelley έχουν εξετάσει διάφορους τύπους επικαλύψεων για χρήση σε μηχανές που αποβάλλεται χαμηλή θερμότητα και, συνεπώς, λειτουργούν κάτω από υψηλές θερμοκρασίες. Οι ερευνητές συμπέραναν πως ένα κράμα σιδήρου-μολυβδαινίου (που περιέχει υψηλή συγκέντρωση άνθρακα) και σύνθετων ενώσεων χρωμίου-πυριτίου, και το οποίο εφαρμόζεται με τη μέθοδο ψεκασμού θερμικού πλάσματος, και στη συνέχεια εφαρμόζεται επάνω του ατμός νιτρίδιου του χρωμίου υπό χαμηλή θερμοκρασία, τότε αποτελεί μια επίστρωση που πληροί τις απαιτήσεις μηχανών που αποβάλουν χαμηλά ποσά θερμότητας (Haselkorn και Kelley, 1992).

Οι επιφανειακές επικαλύψεις που εφαρμόζονται σε ολόκληρη την επιφάνεια ενός ελατηρίου βασίζονται σε υλικά όπως, για παράδειγμα, ο φώσφορος, διάφορα νιτρίδια, οξείδια του σιδήρου, χαλκός και κασσίτερος (Federal Mogul, 1998, Mollenhauer, 1997).

Η πιθανότητα χρήσης κεραμικών ελατηρίων εμβόλου αντί μεταλλικών σε προηγμένους κινητήρες έχει επίσης ερευνηθεί σε τριβολογικές δοκιμές μικροκλίμακας με κεραμικά υλικά που περιλαμβάνουν μονολιθικό οξείδιο του ζirkονίου, συμπύκνωμα μάζας καρβιδίου του πυριτίου, νιτρίδιο του πυριτίου (Dufrane 1989) και νιτρίδιο του τιτανίου με μία βαθμίδα νιτρίδιου του τιτανίου επάνω στην επιφάνεια ολίσθησης (Kustas και Buchholtz, 1996). Η ολίσθηση υπό συνθήκες έλλειψης λιπαντικού έχει αποδειχθεί καταστροφική για τα κεραμικά υλικά. Υλικά, όπως νιτρίδιο του πυριτίου και καρβίδιο του πυριτίου λειτουργούν ικανοποιητικά κάτω από συνθήκες ολίσθησης με λίπανση, ενώ το οξείδιο του ζirkονίου υφίσταται θραύση λόγω απότομης μεταβολής της θερμοκρασίας του.

2.4 Στεγανωτική ικανότητα των ελατηρίων εμβόλου

Τα ελατήρια εμβόλου αντιμετωπίζουν ποικίλες λειτουργικές απαιτήσεις. Οι συνθήκες επαφής μεταξύ χιτωνίου του κυλίνδρου και ελατηρίου εμβόλου συνιστούν ένα δυναμικό περιβάλλον. Σε αντίθεση με τα προβλήματα που σχετίζονται με τη στατική ικανότητα στεγανοποίησης, το ποικίλο σχήμα του χιτωνίου του κυλίνδρου και σε διαμήκης και σε περιφερειακές κατευθύνσεις κάνει τη στεγανοποίηση υπό δυναμικές συνθήκες ακόμη πιο δύσκολη. Το χιτώνιο του κυλίνδρου δεν έχει ποτέ απόλυτα κυλινδρική μορφή (λεπτομέρειες αναφέρονται στην Παράγραφο 4.2). Αυτό απαιτεί υψηλή ικανότητα προσαρμογής των ελατηρίων, όπως περιγράφεται και στην Παράγραφο 5.2.1.

2.4.1 Ικανότητα προσαρμογής των ελατηρίων

Με τον όρο «ικανότητα προσαρμογής» εννοούμε την ικανότητα των ελατηρίων εμβόλου να προσαρμόζονται σε ένα χιτώνιο κυλίνδρου που έχει υποστεί κάποιο βαθμό παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση είναι δυνατόν να προκαλείται από θερμικά και μηχανικά φορτία, από τη σύσφιξη των κοχλιών της κυλινδροκεφαλής και λόγω φθοράς. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το χιτώνιο του κυλίνδρου έχει ένα μη κυλινδρικό αξονικό σχήμα. Τα ελατήρια του εμβόλου, από την άλλη πλευρά, είναι κατασκευασμένα σχεδόν κυκλικά. Η παραμόρφωση του χιτωνίου του κυλίνδρου αυξάνει την κατανάλωση λιπαντικού, καθώς τα ελατήρια του εμβόλου δεν είναι σε θέση να προσαρμοστούν πλήρως στο προφίλ του σχήματος του χιτωνίου. Αυτή η περίπτωση παρουσιάζεται εμφανώς στην περίπτωση του ρονταρίσματος όπου τα συνεργαζόμενα εξαρτήματα δεν συνεργάζονται ιδανικά. Εκτός από την παραμόρφωση του χιτωνίου του κυλίνδρου λόγω της κίνησης του ελατηρίου κάτω από στατικές συνθήκες, η κάθετη τομή του χιτωνίου στη στιγμιαία θέση του ελατηρίου μεταβάλλει το σχήμα της και λόγω της κίνησης (και των κλίσεων) του εμβόλου στη διαδρομή μεταξύ του ΑΝΣ και του ΚΝΣ. Το ελατήριο πρέπει να έχει ελαστικότητα ώστε να επιτρέπει γρήγορες μεταβολές του σχήματός του και να προσαρμόζεται στη θέση του κυλίνδρου. Η ικανότητα προσαρμογής μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του εφαπτομενικού φορτίου ή με τη μείωση της αδρανειακής ροπής. Αυτό, από την άλλη πλευρά, δεν είναι πάντα επιθυμητό, καθώς τα υψηλότερα εφαπτομενικά φορτία αυξάνουν την τριβή. Η χαμηλή αδρανειακή ροπή επιτυγχάνεται με τη μείωση του πάχους του ελατηρίου, αλλά αυτό είναι κάτι το οποίο αυξάνει την πιθανότητα καταστροφής του ελατηρίου.

2.4.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ επιφανειών ελατηρίου – κυλίνδρου

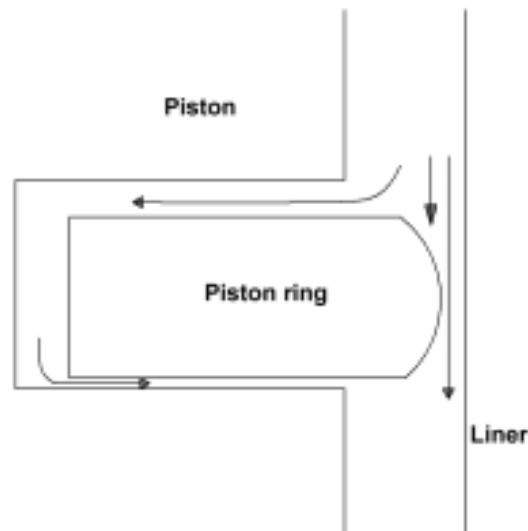
Η επιφανειακή τραχύτητα του χιτωνίου του κυλίνδρου, αλλά και της επιφάνειας επαφής του ελατηρίου του εμβόλου επηρεάζει το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης. Το πάχος αυτό είναι

εξαιρετικά μικρό στα σημεία όπου εφάπτονται οι κορυφές τραχυτήτων των επιφανειών. Σε υψηλές συνθήκες πίεσης στη μεμβράνη του λιπαντικού, οι κορυφές των τραχυτήτων των επιφανειών παραμορφώνονται ελαστικά, μειώνοντας το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης και σχηματίζοντας συνθήκες ελαστο-υδροδυναμικής λίπανσης.

2.4.3 Πρόληψη διαφυγής

«Διαφυγή» θεωρείται η κατάσταση όπου τα καυσαέρια διαφεύγουν από το θάλαμο καύσης περνώντας το σετ των ελατηρίων προς τον στροφαλοθάλαμο. Τα καυσαέρια διαφεύγουν από τα ελατήρια του εμβόλου σε διάφορα σημεία: α) στο διάκενο μεταξύ της υποδοχής και του ελατηρίου, β) περνάει στη μπροστινή πλευρά του ελατηρίου σε συνθήκες ανεπαρκούς λίπανσης, γ) ή περνάει από την πίσω πλευρά του ελατηρίου όταν αυτό δεν βρίσκεται σε επαφή με καμία από τις πλευρές της υποδοχής του (Εικ. 2.6). Η διαφυγή των θερμών καυσαερίων προκαλεί υπερθέρμανση στο έμβολο και στα ελατήριά του καθώς καταστρέφουν σε κάποιο βαθμό τη λιπαντική μεμβράνη. Τα θερμά καυσαέρια ρυπαίνουν το λιπαντικό και προκαλούν εισχώρηση του λιπαντικού σε αυτά. Όταν τα καυσαέρια φτάσουν στο στροφαλοθάλαμο ρυπαίνουν, επίσης, το λιπαντικό. Η διαφυγή δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ολοκληρωτικά εφόσον τα ελατήρια έχουν διάκενα και κινούνται μέσα στις υποδοχές τους. Αυτό σημαίνει ότι πάντοτε θα υπάρχει έστω και μικρή διαφυγή καυσαερίων. Η διαφυγή επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα την απόδοση ισχύος του κινητήρα ή αλλιώς, το θερμικό βαθμό απόδοσής του: η διαφυγή προκαλεί απώλεια μέρους της ισχύος των καυσαερίων και αυξάνει την τριβή ως ένα αποτέλεσμα λιγότερων ευνοϊκών συνθηκών λίπανσης. Το διάκενο μεταξύ του εμβόλου και του τοιχώματος του χιτωνίου είναι μεγαλύτερο στη δευτερεύουσα ωστική πλευρά του εμβόλου σε σχέση με την κύρια ωστική πλευρά. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι στη δευτερεύουσα ωστική πλευρά του εμβόλου, το διάκενο μεταξύ της πίσω πλευράς του ελατηρίου και της υποδοχής του είναι αρκετά μεγάλο και για το λόγο αυτό, αποτελεί μια μεγάλη περιοχή διαφυγής αερίων.

Διάφορες μετρήσεις έχουν δείξει ότι οι κλίσεις των ελατηρίων κατά τη λειτουργία τους επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος της διαφυγής αερίων που συμβαίνει στην περιοχή του πακέτου των ελατηρίων. Μια αρνητική κλίση στο δεύτερο ελατήριο μπορεί να προκαλέσει αστάθεια του ελατηρίου, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της διαφυγής. Μια θετική κλίση στο δεύτερο ελατήριο μπορεί, από την άλλη πλευρά, να προκαλέσει υψηλή επιφανειακή πίεση, που μπορεί να προκαλέσει ακτινική αστοχία ή αξονική κίνηση του ελατηρίου (Richardson, 1996).



Εικόνα2.6 – Διαφυγή καυσαερίων από ελατήριο εμβόλου. (ISO 6621-1).

2.4.4 Μείωση κατανάλωσης λιπαντικού και εκπομπών ρύπων



Μηχανισμοί κατανάλωσης λιπαντικού

Η κατανάλωση λιπαντικού στην περιοχή του εμβόλου έχει ερευνηθεί μέσω υπολογιστικών μοντέλων και πειραματικών μετρήσεων (De Petris et al., 1996, Gulwadi, 2000, Ariga, 1996).

Τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί κατανάλωσης λιπαντικού λαμβάνουν χώρα στο σύστημα του πακέτου των ελατηρίων. Το λιπαντικό μπορεί να εξατμίζεται από την περιοχή των ελατηρίων και του χιτωνίου του κυλίνδρου μέσα στο θάλαμο καύσης, μπορεί επίσης να απορρίπτεται από το ελατήριο μέσα στο θάλαμο καύσης λόγω αδρανειακών δυνάμεων, και τέλος, αέρια μπορεί να κινούνται πίσω από τα ελατήρια προς το θάλαμο καύσης μεταφέροντας λιπαντικό από το πακέτο των ελατηρίων. Σε όλες τις περιπτώσεις το λιπαντικό διαφεύγει από τον κύλινδρο μαζί με τα καυσαέρια.

Το εξατμισμένο λιπαντικό περνάει προς το θάλαμο καύσης μέσω των ελατηρίων και του χιτωνίου κατά την διάρκεια των καθοδικών κινήσεων του εμβόλου (προς το ΚΝΣ). Η ποσότητα λιπαντικού που παραμένει επάνω στο χιτώνιο εξαρτάται από το αποτέλεσμα της αποξέσεως του από τα ελατήρια (Gulwadi, 2000). Ο De Petris και οι συνεργάτες του, επισημαίνουν ότι η ανάστροφη διαφυγή, εννοώντας την ροή αερίου από το στροφαλοθάλαμο προς το θάλαμο καύσης κατά τη διάρκεια της φάσης της εξαγωγής, είναι μία από τις σημαντικότερες αιτίες μεταφοράς λιπαντικού στο θάλαμο καύσης (De Petris et al., 1996).

Κατά τη διάρκεια της ανοδικής κίνησης του εμβόλου (προς το ΑΝΣ), η λίπανση του πακέτου των ελατηρίων εξαρτάται από τη μεμβράνη του λιπαντικού που παρέμεινε στο χιτώνιο του κυλίνδρου κατά τη διάρκεια της προηγούμενης καθοδικής κίνησής του (προς το ΚΝΣ). Το πρώτο ελατήριο αποξέει λιπαντικό από το χιτώνιο, και το συγκεντρώνει επάνω από το ελατήριο. Αυτή η συκέντρωση ποσότητας λιπαντικού εκτινάσσεται από το ελατήριο προς το θάλαμο καύσης, όταν αυτό φτάνει στο ΑΝΣ, λόγω αδρανειακής δύναμης (Gulwadi, 2000).

Σε ολόκληρη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας της μηχανής, ποσότητες λιπαντικού παρευρίσκονται στην περιοχή του πακέτου των ελατηρίων. Μέρος αυτού μεταφέρεται με τη βοήθεια των αερίων από και προς το θάλαμο καύσης. Το μεταφερόμενο λιπαντικό προέρχεται από συσσώρευση λιπαντικού στο τέλος των διακένων των ελατηρίων και στις μπροστινές και πίσω άκρες των ελατηρίων, που προηγουμένως βρισκόταν στην επιφάνεια του χιτωνίου κυρίως (Gulwadi, 2000).

Επειδή οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις γίνονται ολοένα και πιο αυστηρές όσον αφορά την εκπομπή καυσαερίων στις μηχανές εσωτερικής καύσης, η ροή του λιπαντικού μέσα στο θάλαμο καύσης πρέπει να είναι κατά το δυνατόν περιορισμένη. Λόγω του ότι τα ελατήρια λαδιού είναι ένας παράγοντας ελέγχου ροής λιπαντικού στο πακέτο των ελατηρίων, η σημασία τους είναι πολύ μεγάλη. Αυτό, άλλωστε, φαίνεται και από υπολογιστικά μοντέλα, όπως αυτά που είχε παρουσιάσει ο Tian και οι συνεργάτες του. Οι ερευνητές συμπεράναν, μεταξύ άλλων, ότι η λίπανση μεταξύ των ακμών του ελατηρίου λαδιού και του χιτωνίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κλίση του ελατηρίου (Tian et al., 1998).



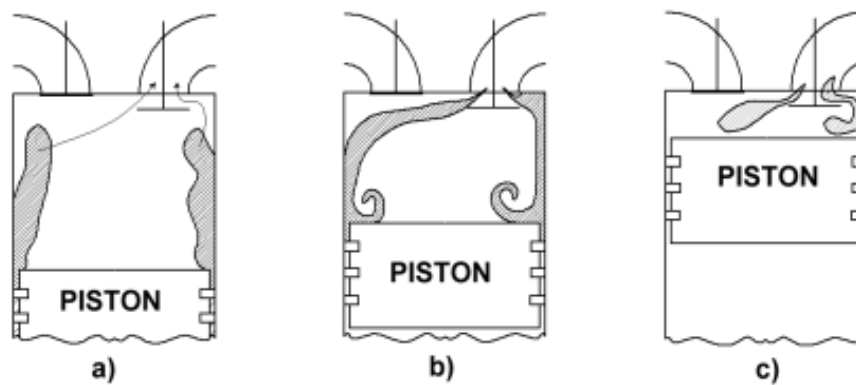
Μείωση εκπομπών ρύπων

Οι ενέργειες που αφορούν τη μείωση κατανάλωσης του λιπαντικού σχετίζονται με τις ενέργειες για τη μείωση των εκπομπών ρύπων, καθώς το καταναλισκόμενο λιπαντικό, ή αλλιώς, το λιπαντικό που κατευθύνεται στο θάλαμο καύσης μέσω του πακέτου των ελατηρίων, επηρεάζει άμεσα τις εκπομπές ρύπων της μηχανής.

Οι εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων δεν προκαλούνται μόνο από το λιπαντικό που έρχεται σε επαφή με τα καυσαέρια καθώς αυτά ρέουν διαμέσου του πακέτου των ελατηρίων, αλλά επίσης και από το μίγμα καυσίμου-αέρα που παγιδεύεται μέσα στις υποδοχές των ελατηρίων και παραμένει εκεί άκαυστο κατά τη διάρκεια της καύσης. Κατά τη φάση της εξαγωγής, το άκαυστο μίγμα ρέει έξω από τις υποδοχές (λόγω πτώσης της πίεσης) και αναμιγνύεται με τα καυσαέρια, προσθέτοντας έτσι ποσότητες άκαυστων υδρογονανθράκων σε αυτά (**Εικ. 2.7** και **2.7a**). Κατά την αρχή του χρόνου της εξαγωγής, καυσαέρια που περιλαμβάνουν άκαυστους υδρογονάνθρακες και διαφεύγουν από τον κύλινδρο, σχηματίζουν δίνη λόγω της μορφής του κυλίνδρου (**Εικ. 2.7b**). Η δίνη αυτή σχηματίζεται ακόμη περισσότερο προς το τέλος του χρόνου της εκτόνωσης (**Εικ. 2.7c**), προκαλώντας τελικά μια πτώση στην απόδοση και στην ωφέλιμη ισχύ της μηχανής.

Μια μέθοδος μείωσης της εκπομπής άκαυστων υδρογονανθράκων είναι η μετακίνηση του πρώτου ελατηρίου σε ψηλότερη θέση στην κεφαλή του εμβόλου (Lacey και Stockwell, 1999). Έτσι, ελαττώνεται η περιοχή όπου μπορεί να παραμείνει άκαυστο μίγμα αέρα-καυσίμου. Επιπλέον, το διάκενο μεταξύ του ελατηρίου και του τοιχώματος του χιτωνίου μπορεί να μειωθεί, ώστε να μειωθεί επακόλουθα και ο όγκος του εγκλωβισμένου αερίου. Όλες οι αλλαγές που αναφέρονται παραπάνω, αυξάνουν τις απαιτήσεις λίπανσης μιας και η λιπαντική μεμβράνη εκτίθεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις.

Τα ελατήρια λαδιού, όπως αναφέρθηκε, αποξέουν της περίσσεια λιπαντικού από το χιτώνιο, και μειώνεται, κατ' αυτόν τον τρόπο, η κατανάλωση λιπαντικού. Με κατάλληλη σχεδίαση των ελατηρίων μπορεί να γίνει ρύθμιση της ποσότητας λιπαντικού που παραμένει στο χιτώνιο ώστε να είναι επαρκές έπειτα από την καθοδική κίνηση του εμβόλου.



Εικόνα2.7 - Ροή αερίων στο θάλαμο καύσης και στο πακέτο ελατηρίων. (ISO 6621-1).

3. Ποδιά εμβόλου και υποδοχές ελατηρίων

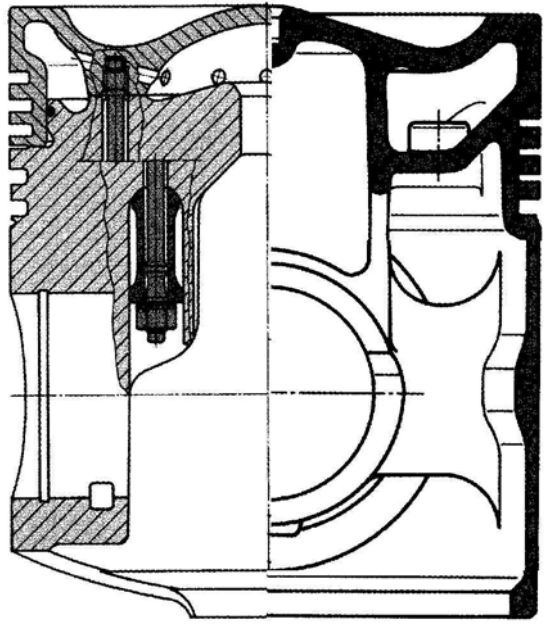
Η κύρια λειτουργία του εμβόλου είναι να μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Επιπλέον τα ελατήρια του εμβόλου στεγανοποιούν το θάλαμο καύσης από το στροφαλοθάλαμο και μεταφέρουν θερμότητα στα τοιχώματα του κυλίνδρου και έπειτα στο ψυκτικό υγρό. Η ποδιά του εμβόλου ενεργεί σαν επιφάνεια που μεταφέρει φορτία και ταυτόχρονα κρατάει στη σωστή θέση το έμβολο μέσα στον κύλινδρο.

3.1 Τύποι εμβόλου και γεωμετρία αυτών

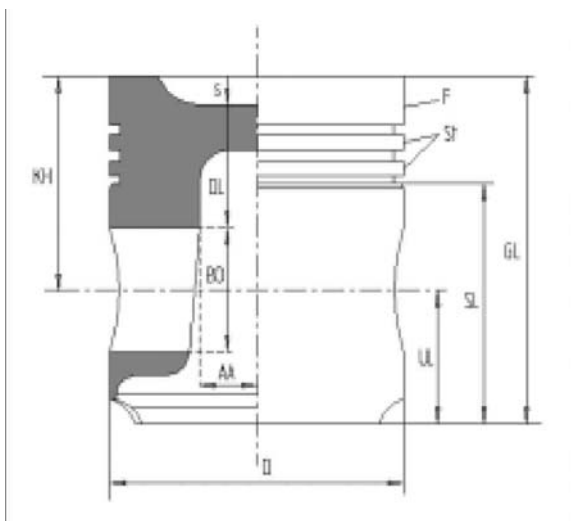
Υπάρχουν πολλοί τύποι εμβόλου που σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις λειτουργίας διαφόρων τύπων κινητήρων. Οι τύποι εμβόλου συνήθως κατατάσσονται ανάλογα με τη μέθοδο ψύξης τους, με το πεδίο εφαρμογής τους, ή με την μέθοδο κατασκευής τους. Οι τύποι εμβόλων ανάλογα με τον τρόπο λίπανσης και τον μηχανισμό ψύξης αναλύονται λεπτομερώς στην παράγραφο **7.11**. Τέσσερις κατηγορίες εμβόλων σύμφωνα με την μέθοδο κατασκευής τους παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Μη ψυχόμενα ή ψυχόμενα με ψεκασμό λιπαντικού, χυτά ή σφυρήλατα μονομεταλλικά έμβολα ελαφρού κράματος για αυτοκίνητα πολύστροφων κινητήρων και κινητήρες οχημάτων μικρής χρησιμότητας.
2. Μη ψυχόμενα ή ψυχόμενα με ψεκασμό λιπαντικού χυτά έμβολα ελαφρού κράματος με πρόσθετο εσωτερικό δακτύλιο στην υποδοχή του πρώτου ελατηρίου για βαριάς χρήσης μηχανές diesel υψηλής ταχύτητας.
3. Ενιαία ή σύνθετα έμβολα με ψυκτική δίοδο για μηχανές diesel υψηλών και μεσαίων ταχυτήτων βαριάς κατασκευής. Η δεξιά πλευρά της **Εικ.3.1**. δείχνει ένα ενιαίο χυτοσιδηρό έμβολο και η αριστερή πλευρά, ένα διμερές σύνθετο έμβολο.
4. Έμβολα για δίχρονες μηχανές diesel χαμηλών ταχυτήτων.

Οι πιο σημαντικές περιοχές του εμβόλου είναι η κεφαλή του, η ζώνη των ελατηρίων περιλαμβανομένης της πλευρικής περιφέρειας της κεφαλής πάνω από το πρώτο ελατήριο, οι υποδοχές του πείρου (ομφαλοί του εμβόλου) και η ποδιά. Η γεωμετρία αυτών των περιοχών μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής. Η κατασκευή ενός τυπικού εμβόλου και της διάταξης των ελατηρίων φαίνεται στην **Εικ.2.1**. Τυπικές διαστάσεις εμβόλου τετράχρονης μηχανής diesel φαίνονται στην **Εικ.3.2** και **Εικ.3.1**.



Εικόνα 3.1 – Σύνθεση εμβόλου με χάλυβα στο επάνω μέρος, αλουμίνιο στο κάτω και στοιχεία μπουλονιών αριστερά, μεμονωμένου κονδυλώδους χυτοσιδήρου δεξιά (Röhrlé,1995)



Εικόνα 3.2 – Διαστάσεις εμβόλου (Röhrlé,1995)

Ονοματολογία:

- F Κορυφή βάσης
- s Επάνω στρώμα πάχους
- St Βάση ελατηρίου
- KH Ύψος συμπίεσης
- DL Μήκος επιμήκυνσης
- GL Συνολικό μήκος
- BO Σφικτήρας οπής & διαμέτρου
- SL Μήκος ποδιάς
- UL Ελάχιστο μήκος
- AA Προεξοχή σφικτήρα εγκοπής
- D Διάμετρος εμβόλου

Πίνακας 3.1. Βασικές διαστάσεις από ελαφριά μέταλλα εμβόλων (Röhrlé, 1995).

	Μηχανές Diesel	
	Τετράχρονες	
Διάμετρος D [mm]	75-180	> 180
Συνολικό μήκος GL/D	0.9-1.3	1.1-1.6
Ύψος συμπίεσης KH/D	0.50-0.80	0.70-1.00
Διάμετρος οπής σφικτήρα BO/D	0.30*-0.40	0.36-0.44
Πλάτος κορυφής περιοχής F/D	0.10-0.20	0.14-0.22
1 ^η περιοχή ελατηρίου St/D**	0.07-0.09	0.07-0.09
Πλάτος κορυφής ελατηρίου [mm]	1.5-4.0	3.5-8.0
Μήκος ποδιάς SL/D	0.50-0.90	0.70-1.10
Περιοχή προεξοχής σφικτήρα AA/D	0.30-0.42	0.28-0.46
Προεξοχή κορώνας s/D	0.10-0.15***	0.13-0.20
Χαρακτηριστικό βάρος G _N /D [g/cm ³]	0.9-1.4	1.1-1.6
* Ελάχιστη αξία για τους πετρελαιοκινητήρες επιβατικών αυτοκινήτων		
** Τα στοιχεία που δίνονται για κινητήρες Diesel ισχύουν για την τοποθέτηση εμβόλων ελατηρίου		
*** Για τους κινητήρες άμεσης έγχυσης περίπ. 0,2 για την καύση της κοιλότητας διαμέτρου		

3.2 Υλικά κατασκευής εμβόλου

Για να επιτευχθούν χαμηλές μαζικές (αδρανειακές) δυνάμεις, υψηλή αντίσταση έναντι παραμόρφωσης, αποφυγή αστοχίας λόγω κόπωσης, και καλές ιδιότητες ολίσθησης, τα υλικά κατασκευής των εμβόλων πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις όπως για παράδειγμα.:

- χαμηλή πυκνότητα του υλικού κατασκευής για μικρότερο βάρος,
- υψηλή αντοχή κάτω από μεταβολές της θερμοκρασίας,
- υψηλή θερμική αγωγιμότητα,
- καλά χαρακτηριστικά φθοράς, και
- ευνοϊκή θερμική διαστολή

Τα τυπικά υλικά κατασκευής εμβόλων είναι ελαφρά κράματα, χυτοσίδηρος, κονδυλώδης χυτοσίδηρος, και κράματα χάλυβα. Τα έμβολα για μηχανές υψηλών ταχυτήτων κατασκευάζονται κυρίως από κράματα. Εκτός του αλουμινίου αυτά τα κράματα περιέχουν 11-13% πυρίτιο και περίπου από 1% χαλκό, νικέλιο και μαγνήσιο. Αυξάνοντας την περιεκτικότητα του πυριτίου σε περίπου 18-24% η θερμική διαστολή και η φθορά μπορούν να αυξηθούν, αλλά η αντοχή μειώνεται. Η αντοχή των κραμάτων πυριτίου-αλουμινίου μπορεί να αυξηθεί με τοπική χύτευση μικρών σχετικά κεραμικών ινών κατασκευασμένων από οξείδιο αλουμινίου με τη μορφή λεπτών ενιαίων κρυστάλλινων ινών), ή με πορώδη μεταλλικά μέρη. Σε μεγάλες αργόστροφες δίχρονες μηχανές, έμβολα από υλικά υψηλής ποιότητας σιδήρου, πρωτίστως κονδυλώδη χυτοσίδηρο με περλιτική βασική κατασκευή χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα. Σε εφαρμογές με υψηλό μηχανικό και θερμικό φορτίο το επάνω μέρος ενός σύνθετου εμβόλου απαρτίζεται από υψηλής αντοχής υλικά, όπως για παράδειγμα κονδυλώδη χυτοσίδηρο, ή χυτό, ή σφυρήλατο χάλυβα, με μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (40Mn4, 42CrMo4V και X45CrSi9). Τα χαμηλότερα τμήματα αποτελούνται κυρίως από κονδυλώδη χυτοσίδηρο (Röhrlé, 1995).

Η τάση για αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος των μηχανών καθορίζει τις απαιτήσεις βελτίωσης της ικανότητας μεταφοράς φορτίου των εμβόλων. Ένα έμβολο τύπου **ferrocomp** παρουσιάζεται σε μία δημοσίευση από τους Lipp και Schmidt. Ένα σύνθετο έμβολο απαρτίζεται από κορώνα και ποδιά σφυρήλατου χάλυβα. Αυτό το έμβολο μπορεί να λειτουργήσει με υψηλές πιέσεις κυλίνδρου πάνω από 25 MPa και διαμέτρους από 160 έως 640 mm. Το υλικό που χρησιμοποιείται στη σφυρήλατη ποδιά του εμβόλου είναι υψηλής ποιότητας κραμματωμένος χάλυβας 38MnVS6. Ένα από τα πλεονεκτήματα του σφυρήλατου χάλυβα είναι η υψηλή αντοχή σε κόπωση, ειδικά στην μη κατεργασμένη επιφάνεια. Η επιμήκυνση στο σημείο θραύσης είναι περισσότερο από τρεις φορές μεγαλύτερη και η σταθερά Young είναι 25% μεγαλύτερη σε σχέση με το χυτοσίδηρο GG-70. Η υψηλή πυκνότητα του σφυρήλατου χάλυβα ($7,85 \text{ g/cm}^3$) σε σύγκριση με τον κονδυλώδη χυτοσίδηρο ($7,2 \text{ g/cm}^3$) αντισταθμίζεται με την μείωση της γωνίας κατασκευής στις περιοχές όπου η επιφάνεια παραμένει ακατέργαστη και με τη βελτιστοποίηση της δομής της όλης διάταξης του εμβόλου. (Lipp and Schmidt, 2001).

Σε μελέτη του Inada παρουσιάζεται η κατασκευή ενός εμβόλου για μηχανές υψηλής συγκέντρωσης ισχύος. Τα νέα χαρακτηριστικά της κατασκευής είναι ένα έμβολο με εναζώτωση κονδυλώδη χυτοσίδηρου και ένα σύστημα με διπλά ακροφύσια ψύξης. Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδηλώνουν ότι η αντοχή στην οξείδωση και η διάρκεια ζωής σε θερμική καταπόνηση ενός εμβόλου από κονδυλώδη χυτοσίδηρο είναι δυνατόν να αυξηθούν με την εφαρμογή της διαδικασίας εναζώτωσης, και η αποδοτικότητα της ψύξης του εμβόλου να βελτιωθεί με την υιοθέτηση και την εφαρμογή ψυκτικών ακροφυσίων (Inada, 2001).

Οι επιμεταλλώσεις επιφάνειας που εφαρμόζονται στα έμβολα μπορούν να διαιρεθούν στους ακόλουθους τομείς εφαρμογής:

1. Επιμεταλλώσεις για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ολίσθησης
2. Επιμεταλλώσεις για την αύξηση της αντοχής σε φθορά
3. Επιμεταλλώσεις για τη βελτίωση των θερμικών ιδιοτήτων
4. Επιμεταλλώσεις για την αύξηση της αντοχής σε κρούσεις

Από τριβολογικής άποψης οι τομείς εφαρμογής 1 και 2 έχουν μεγαλύτερη σημασία. Επιστρώσεις μετάλλων και γραφίτη χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ολίσθησης των εμβόλων που κατασκευάζονται από κράματα αλουμινίου-πυριτίου. Επιστρώσεις μολύβδου και κασσίτερου χρησιμοποιούνται στις εξωτερικές επιφάνειες του αλουμινίου για να επιτύχουν ευνοϊκές ιδιότητες ρονταρίσματος. Το πάχος των μεταλλικών επιστρώσεων στα έμβολα για βενζινομηχανές κυμαίνονται συνήθως από 1 έως 2 μm . Γραφιτούχες επιστρώσεις με ρητίνες φαινολών πάχους από 10 έως 20 μm χρησιμοποιούνται σε έμβολα μεγάλης διαμέτρου και σε έμβολα αυτοκινήτων για μηχανές βενζίνης και diesel. Η χρήση λεπτών μεταλλικών στρωμάτων φωσφορικού άλατος μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες προσκόλλησης άλλων επιστρωμάτων (όπως τα προαναφερθέντα γραφιτούχα). Για να βελτιωθεί η αντοχή σε φθορά των εμβόλων αλουμινίου που λειτουργούν σε κυλίνδρους αλουμινίου, η επιφάνεια της ποδιάς των εμβόλων μπορεί να επιστρωθεί με ένα ανθεκτικό σε φθορά στρώμα σιδήρου ή χρωμίου που καλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα κασσιτέρου για να υποβοηθήσει το ροντάρισμα. Ένα σκληρό στρώμα χρωμίου μπορεί να βελτιώσει την αντοχή των υποδοχών των ελατηρίων στις κεφαλές χαλύβδινων εμβόλων σύνθετης κατασκευής (Röhrle, 1995).

Ο Durga και οι συνεργάτες του έχουν μελετήσει την επίδραση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας στη συμπεριφορά τριβόμενων επιφανειών σε πειράματα με ποδιές εμβόλων επιστρωμένες και μη, επάνω σε διαφορετικά επιστρώματα χιτωνίων κυλίνδρων συμπεριλαμβανομένου ενός επιστρώματος με ψεκασμό αποκαλούμενο II-25D (epoxy+BN+MoS₂+Graphite). Το υλικό βάσης της ποδιάς του εμβόλου που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές ήταν κράμα αλουμινίου 318 και το επίστρωμα που εφαρμόστηκε ήταν το προαναφερθέν επίστρωμα ψεκασμού II-25D. Τα ελατήρια των εμβόλων ήταν τυποποιημένα ελατήρια χυτοσίδηρου επιστρωμένα με κράμα FE-MO. Τα αποτελέσματα των δοκιμών τριβής έδειξαν ότι το επίστρωμα II-25D προκαλεί σημαντική μείωση του συντελεστή τριβής σε ολόκληρο το εύρος ταχύτητας εμβόλων (οριακός συντελεστής τριβής 0,07 και μέση τιμή σε ολόκληρο τον κύκλο 0,05). Οι ερευνητές ανέφεραν πως, δεδομένου ότι το II-25D είναι ένα επίστρωμα, η συμπεριφορά χαμηλής τριβής είναι αναμενόμενη ανεξάρτητα από το υπόστρωμα. Ως αποτέλεσμα των δοκιμών μονοκύλινδρης μηχανής, δηλώνεται ότι το επίστρωμα II-25D μειώνει σημαντικά την απολεσθείσα στρεπτική ροπή λόγω τριβής του κινητήρα σε σχέση με τα χιτώνια των κυλίνδρων χωρίς επίστρωση σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Με την επικάλυψη II-25D η αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος ήταν περίπου 4,5% (Durga et al. 1998).

3.3 Υποδοχές ελατηρίων εμβόλου

Σε έναν μεγάλο αριθμό κατασκευών εμβόλου, η ζώνη ελατηρίων αποτελείται από τρεις υποδοχές ελατηρίων (αύλακες). Επειδή η υποδοχή κάθε ελατηρίου και οι φλάντζες όταν υπάρχουν είναι μέρη του στεγανωτικού συστήματος του εμβόλου, που έχει επιπτώσεις στην διαφυγή των αερίων καύσης και στην κατανάλωση λιπαντικού, οι επιφάνειες των φλαντζών πρέπει να είναι πολύ υψηλής ποιότητας. Για παράδειγμα η τυπική πλευρική επιφάνεια επαφής ενός ελατηρίου εμβόλου έχει ποιότητα επιφάνειας $R_z=4\mu\text{m}$ ή $R_a=0.8\mu\text{m}$ (ISO 6621-4).

Κατεστραμμένες στεγανωτικές επιφάνειες οδηγούν σε αύξηση της απώλειας συμπίεσης και σε μείωση της αποτελεσματικής πραγματικής μέσης πίεσης. Συγχρόνως η αυξανόμενη διαφυγή καυσαερίων παρεμποδίζει το σχηματισμό ικανοποιητικού φιλμ λιπαντικού μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης και μπορεί να προκαλέσει φθορά στα ελατήρια του εμβόλου.

Για να αυξηθεί η αντοχή σε φθορά των υποδοχών ελατηρίου στα έμβολα των πετρελαιομηχανών βαρέων καυσίμων, οι υποδοχές είναι είτε σκληρυμένες επαγωγικά είτε καλύπτονται από χρώμιο.

Η αντοχή των πλευρών της υποδοχής του ελατηρίου μπορεί να επηρεάσει την κατασκευαστική γεωμετρία του προσώπου του ελατηρίου που θα ολισθαίνει επάνω στο χιτώνιο του κυλίνδρου (Dowson, 1993). Προκειμένου να βελτιωθεί η αντοχή σε φθορά της υποδοχής ελατηρίου στις κεφαλές σύνθετων εμβόλων από χάλυβα μπορεί να γίνει επικάλυψη με ένα σκληρό στρώμα χρωμίου. Για να προστατευθεί η υποδοχή του πρώτου ελατηρίου, μερικές φορές ακόμα και του δεύτερου, στις μηχανές diesel υψηλής απόδοσης (ισχύος), τοποθετούνται κατά τη διαδικασία χύτευσης των εμβόλων, οι αποκαλούμενοι φορείς ελατηρίων κατασκευασμένοι από χυτοσίδηρο υψηλής κραμάτωσης. Οι φορείς ελατηρίων κατασκευάζονται κατά προτίμηση από Niresist, έναν ωστενιτικό χυτοσίδηρο με έναν συντελεστή θερμικής διαστολής σχεδόν ίσο με αυτόν του αλουμινίου (Röhrlé, 1995).

4. Χιτώνιο κυλίνδρου

Δεδομένου ότι το έμβολο και τα ελατήρια εμβόλων κινούνται μέσα στον κύλινδρο, η ποιότητα της επιφάνειας αυτού αποτελεί ένα σημαντικό τριβολογικό στοιχείο ως επιφάνεια ολίσθησης που συνεργάζεται με το έμβολο και τα ελατήρια εμβόλων.

4.1 Υλικά κατασκευής χιτωνίου κυλίνδρου

Οι κύλινδροι μπορούν να κατασκευαστούν από χυτοσίδηρο που περιέχει προσμίξεις μαγγανίου, χρωμίου, μολυβδαινίου, βαναδίου και τιτανίου σε κράματα, ή από χάλυβα, ή από αλουμίνιο.

Ο χυτοσίδηρος είναι το συνηθέστερο υλικό κατασκευής χιτωνίων μεγάλων μηχανών. Τα χαρακτηριστικά των υλικών χυτοσιδηρών χιτωνίων κυλίνδρων παρουσιάζονται στην **Εικ. 4.1**. Κύλινδροι κατασκευασμένοι από κονδυλώδη χυτοσίδηρο με κεραμικές επιφάνειες ολίσθησης (σύνθετες ενώσεις κεραμικών – μετάλλων) έχουν χρησιμοποιηθεί σε αργόστροφες δίχρονες μηχανές diesel.

Η επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να επιστρωθεί με ένα σκληρό στρώμα χρωμίου για να βελτιώσει την αντοχή στη φθορά (Affenzeler, 1996). Ο φαιός χυτοσίδηρος όταν χρησιμοποιείται ως υλικό της επιφάνειας των κυλίνδρων, έχει τριβολογικά πλεονεκτήματα, δεδομένου ότι η φάση γραφίτη του υλικού δίνει μια ξηρή λιπαντική δράση και, επιπλέον, ενεργεί ως δεξαμενή στερεού λιπαντικού που παρέχει καλή λίπανση στην ψυχρή εκκίνηση του κινητήρα ή σε παρόμοιες περιπτώσεις ανεπαρκούς λίπανσης (Glaeser, 1992).

	Σύσταση [%]							
	C	Si	Mn	P	Cr	S	Mo	Ni
Standard 45	2.8-3.2	1.7-2.4	0.5-0.8	0.4-0.45	0.25-0.4	< 0.03	-	-
Standard P	2.8-3.2	1.7-2.4	0.5-0.8	0.6-0.8	0.25-0.4	< 0.3	-	-
HE G40	2.6-2.8	1.1-1.6	< 0.8	< 0.08	-	< 0.08	1.0-1.5	1.0-1.5
ASTM 247	3.1-3.4	1.85-2.3	-	< 0.12	< 0.35	< 0.18	0.25	0.50

Πίνακας 4.1 – Τυπική σύσταση υλικών για κατασκευή χυτοσιδηρών χιτωνίων κυλίνδρου (Affenzeler, 1996).

Για να βελτιωθεί η αντοχή στη φθορά ενός κυλίνδρου από αλουμίνιο, μια κεραμική φάση σωματιδίων μπορεί να ενσωματωθεί κατά τη διαδικασία της χύτευσης μέσα στην επιφάνεια του αλουμινίου, καθώς κατασκευάζεται το σώμα του κινητήρα. Στα σώματα μηχανών από αλουμίνιο μπορούν να τοποθετηθούν με χύτευση ή πρεσσάρισμα χυτοσιδηρά χιτώνια.

4.2 Πρόσδοση τραχύτητας στο χιτώνιο

Η σύγχρονη τάση σε ότι αφορά το φινίρισμα της εσωτερικής επιφάνειας του κυλίνδρου κατευθύνεται από απαιτήσεις μείωσης της κατανάλωσης λιπαντικού, αύξησης της διάρκειας ζωής και αύξησης της αντίστασης έναντι της φθοράς και των γραμμώσεων. Για τον περιορισμό των εκπομπών άκαυστων υδρογονανθράκων και σωματιδίων, μέσω της μείωσης της κατανάλωσης λιπαντικού, η τραχύτητα (R_a) της εσωτερικής επιφάνειας των κυλίνδρων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,25 και 0,4 μm και η τιμή R_z μεταξύ 3 και 6 μm (Affenzeller, 1996). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με λεπτομερειακή επεξεργασία των επιφανειών. Το φινίρισμα της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου σχετίζεται άμεσα με την αντίσταση στην εμφάνιση γραμμώσεων. Η αυξανόμενη τριβή, που οδηγεί στη φθορά, συνδέεται με τη στίλβωση του χιτωνίου (Galligan, 1999 b).

Η λεγόμενη διαδικασία «honing» εφαρμόζεται για το τελικό φινίρισμα της χυτοσιδηρής επιφάνειας του χιτωνίου. Τα σημάδια κατεργασίας της εσωτερικής διαμέτρου διαμορφώνουν ένα διαγώνιο σχέδιο στην επιφάνεια του χιτωνίου (σταυροειδής κατεργασία). Οι τελικές γραμμώσεις που προκύπτουν από την κατεργασία, το βάθος και η διεύθυνσή τους ελέγχουν την ποσότητα λιπαντικού που συγκρατείται επάνω στο χιτώνιο, και βελτιώνουν τον τρόπο εξάπλωσής του. Δεδομένου ότι οι προϋποθέσεις για μια πολύ καλή λίπανση και για καλή στεγανωτική ιδιότητα είναι αντίθετες η μια προς την άλλη, οι απαιτήσεις σε ότι αφορά της εσωτερική τοπογραφία του χιτωνίου απαιτούν μεγάλη ακρίβεια. (Ohlsson, 1996, Lenthall, 1996).

Στις αργόστροφες, δίχρονης μηχανές diesel, η εσωτερική επιφάνεια κάθε χιτωνίου είναι παραδοσιακά φινιρισμένες με ένα ειδικό κοπτικό εργαλείο αντί της διαδικασίας «honing» προκειμένου να βελτιωθεί το ροντάρισμα (αρχική ωφέλιμη φθορά) της μηχανής.

Η ποιότητα της ακονισμένης επιφάνειας επηρεάζεται από τη γεωμετρία και τις ανοχές της διαμέτρου, την τραχύτητα της επιφάνειας, τις διαδικασίες και το πλήθος των σταδίων μηχανικής κατεργασίας, καθώς επίσης και από το υλικό, τη σκληρότητα και τον τύπο των «λειαντικών πετρών». Για να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, το χιτώνιο κατεργάζεται μηχανικά συνήθως σε τέσσερα στάδια:

1. **Πρώτο ξεχόνδρισμα** – για την πρόσδοση της βασικής γεωμετρίας (βασικής διαμέτρου).
2. **Πρώτο ακόνισμα** – για την ευθυγράμμιση του χιτωνίου.
3. **Τελικό ακόνισμα** – για την πρόσδοση της επιθυμητής τραχύτητας στην επιφάνεια.
4. **Φινίρισμα** – για την εξομάλυνση της επιφάνειας.

Στο τρίτο στάδιο απομακρύνονται τα ίχνη που άφησαν στην επιφάνεια τα δύο πρώτα στάδια. Το τέταρτο στάδιο, το φινίρισμα δηλαδή, αντικαθιστά εν μέρει τη διαδικασία ρονταρίσματος, η οποία βελτιώνει τις ανοχές διαστάσεων του κυλίνδρου, αυξάνει την απόδοση των μηχανών και μειώνει την κατανάλωση λιπαντικού (Ohlsson, 1996).

Πολλοί παράμετροι έχουν χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό της φινιρισμένης επιφάνειας:

- Δισδιάστατες (2D) παράμετροι, όπως η τιμή R_a (μέση απόκλιση της τραχύτητας της επιφάνειας), η τιμή R_z (μέση τραχύτητα της επιφάνειας), και η τιμή R_{max} .

- Παράμετροι που περιγράφουν το σχήμα της επιφάνειας, όπως η ασυμμετρία αυτής (R_{sk}) και η κύρτωση (R_{ku}).
- Λειτουργικά χαρακτηρισμένες δισδιάστατες (R_k) και τρισδιάστατες (S_k) παράμετροι, όπως οι R_{pk} και S_{pk} (το μειωμένο μέγιστο ύψος των τραχυτήτων, που αφορά το ροντάρισμα), τα R_k και S_k (το ουσιαστικό βάθος τραχύτητας, που αφορά την αντοχή σε φθορά και την ικανότητα μεταφοράς φορτίου), και τα R_{vk} και S_{vk} (το απομένον βάθος των γραμμώσεων του ακονίσματος, που αφορά τον διαθέσιμο όγκο λαδιού για τη λίπανση).
- Παράμετροι βασισμένες σε σχεδιαστικές μεθόδους για τον έλεγχο της μηχανικής κατεργασίας, όπως R_{qpe} (είναι η τιμή R_q της επιφάνειας που δίνει μια τιμή επιφανειακής τραχύτητας για το τέταρτο στάδιο του φινιρίσματος), R_{qve} (είναι η τιμή R_q του τρίτου σταδίου του τελικού ακονίσματος) και M_{r2e} (αφορά την τομή δύο τεμνόμενων γραμμών που καθορίζεται από τους γωνιακούς συντελεστές R_{qpe} και R_{qve} , και προσδιορίζει την τοπογραφία της επιφάνειας σε σχέση με την υφή των γραμμώσεων του ακονίσματος) (Ohlsson, 1996).

Το βάθος παραμόρφωσης της επιφάνειας που δημιουργείται από διάφορες μηχανικές κατεργασίες παρουσιάζεται στον **Πίνακα 4.2**.

Μηχανική κατεργασία	Βάθος παραμόρφωσης
Συνήθης κατεργασία	70 – 80 μm
Εκλεπτυσμένη μηχανική κατεργασία– Κεραμική	50 – 60 μm
Βασικός τύπος ακονίσματος – Με διαμάντι	25 – 35 μm
Βασικός τύπος ακονίσματος – CBN	10 – 15 μm
Βασικός τύπος ακονίσματος – SiC	10 – 15 μm
Τελικό ακόνισμα επιφάνειας – Με διαμάντι	15 – 20 μm
Τελικό ακόνισμα επιφάνειας – CBN	5 – 10 μm
Τελικό ακόνισμα επιφάνειας – SiC	5 – 10 μm

Πίνακας 4.2 – Μηχανικές κατεργασίες σε σχέση με την προκαλούμενη παραμόρφωση (Lenthall, 1996).

4.3 Μακρόμορφη απόκλιση χιτωνίων κυλίνδρου

Πρακτικά, είναι φυσιολογικό ότι το χιτώνιο του κυλίνδρου δεν είναι τέλεια κυλινδρικό και δεν ακολουθεί την ονομαστική διάμετρο σε ολόκληρο το μήκος του. Η παραμόρφωση της διαμέτρου προκαλεί προβλήματα συνεργασίας μεταξύ των ελατηρίων του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου, και συνεπώς, αυξημένη κατανάλωση λιπαντικού.

Η μη-κυκλικότητα της διαμέτρου του κυλίνδρου μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικές σειρές Fourier (Affenzeller, 1996, Chittenden και Priest, 1993, Ma et al., 1996, 1997a.):

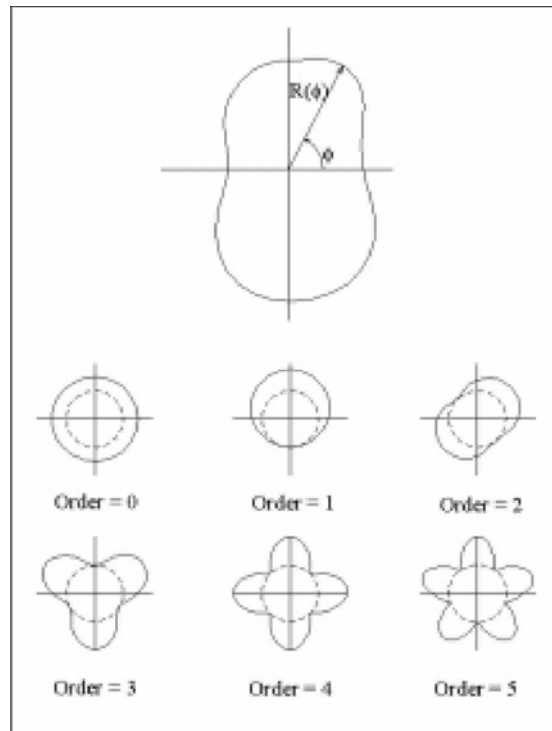
$$R(\phi) = \sum_{i=0}^{i=n} (A_i \cos \phi + B_i \sin \phi) \quad (4.1)$$

όπου:

R(ϕ)	η ακτινική συντεταγμένη
ϕ	η γωνιακή συντεταγμένη
A _i , B _i	οι σταθερές πλάτους
i	η σειρά
n	η μεγαλύτερη σειρά παραμόρφωσης που εξετάζεται

Το σύστημα συντεταγμένων και οι διάφορες σειρές Fourier της παραμόρφωσης της διαμέτρου παρουσιάζονται στην **Εικ. 4.1**.

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τη μη-κυκλικότητα της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου. Τα χιτώνια των κυλίνδρων κατεργάζονται μηχανικά σε ένα επίπεδο ακρίβειας που καθορίζεται από τις απαιτούμενες ανοχές. Η επιτρεπτή διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 100 φορές το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης μεταξύ των ελατηρίων εμβόλου και του χιτωνίου. Επομένως, η απόκλιση από την κυκλικότητα μέσα στις ανοχές κατασκευής είναι πιθανό να έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση της διάταξης του εμβόλου. Η μηδενική και η πρώτη σειρά Fourier σχετικά με την παραμόρφωση της διαμέτρου (**Εικ. 4.1**) είναι συνάρτηση του μεγέθους, αλλά και της ακριβούς θέσης των ανοχών της διαμέτρου του κυλίνδρου (Chittenden και Priest, 1993).



Εικόνα 4.1 – Κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων και σειρές Fourier (After Chittenden and Priest, 1993).

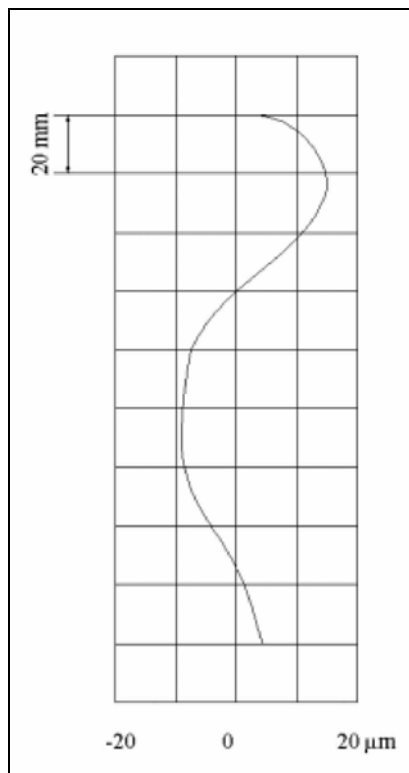
Κατά τη συναρμολόγηση της μηχανής μπορεί να προκληθούν παραμορφώσεις στα χιτώνια των κυλίνδρων. Ένα παράδειγμα αυτού αποτελεί το σφίξιμο των κοχλιών της κυλινδροκεφαλής. Η τοποθέτηση του χιτωνίου του κυλίνδρου μεταξύ της κυλινδροκεφαλής και της υποδοχής του στο κατώτερο σημείο του σώματος της μηχανής, προκαλεί μια παραμόρφωση προς τα έξω της εσωτερικής επιφάνειάς του (Reipert και Voigt, 2001).

Η ανεπαρκής ψύξη ή η υπερβολική ψύξη μιας συγκεκριμένης περιοχής του κυλίνδρου μπορεί να προκαλέσει διαφορά στη διαστολή γύρω από την περιφέρεια του κυλίνδρου, αλλά και κατά μήκος αυτού, που οδηγεί στην παραμόρφωση της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου (Chittenden και Priest, 1993). Το μέγεθος της θερμικής διαστολής είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από την παραμόρφωση που προκαλείται λόγω της σύσφιξης των κοχλιών της κυλινδροκεφαλής (Reipert και Voigt, 2001).

Η πίεση των αερίων ασκείται σε μια περιορισμένη περιοχή του τοιχώματος του κυλίνδρου. Η παραμόρφωση του χιτωνίου του κυλίνδρου λόγω της πίεσης που αναπτύσσεται κατά την καύση είναι σημαντική μόνο στις ιδιαίτερα μεγάλες μηχανές diesel με λεπτό τοίχωμα υγρών χιτωνίων (Chittenden και Priest, 1993).

Η μέγιστη παραμόρφωση λόγω της σύσφιξης των κοχλιών της κυλινδροκεφαλής, της θερμικής διαστολής και των πιέσεων των αερίων, παρατηρείται στο ανώτερο μέρος του κυλίνδρου (Reipert και Voigt, 2001). Η ικανότητα προσαρμογής των ελατηρίων μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της τάξεως της παραμόρφωσης.

Εκτός από τη μη-κυκλικότητα της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου, η παραμόρφωση του χιτωνίου του κυλίνδρου μπορεί να είναι αξονική. Ένα αξονικό σχέδιο της παραμόρφωσης του χιτωνίου του κυλίνδρου παρουσιάζεται στην **Εικ. 4.2**.



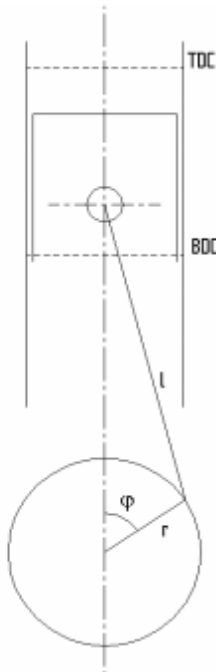
Εικόνα. 4.2 – Αξονικό διάγραμμα παραμόρφωσης χιτωνίου κυλίνδρου (After Affenzeller and Gläser, 1996).

5. Μηχανική ελατηρίων εμβόλου

5.1 Κινηματική και κινητική των ελατηρίων εμβόλου

Μια από τις σημαντικότερες απαιτήσεις στο πακέτο των ελατηρίων σχετίζεται με τη δυναμική των ελατηρίων: ακτινική και αξονική κίνηση και στρέψη ελατηρίου. Η κίνηση και η στρέψη του ελατηρίου σε σχέση με το κέντρο του επηρεάζουν τη λειτουργία του, τον σχηματισμό μεμβράνης λιπαντικού, την τριβή και τη φθορά με το χιτώνιο του κυλίνδρου, και την διαφυγή καυσαερίων διαμέσου του πακέτου των ελατηρίων.

Η κύρια κίνηση των ελατηρίων του εμβόλου είναι όμοια με την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου. Σε μια ανάλυση της λίπανσης των ελατηρίων του εμβόλου, είναι απαραίτητο να καθορίζεται η ταχύτητα κάθε ελατηρίου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου. Ο μηχανισμός του στροφάλου φαίνεται στην **Εικ. 5.1**. Η στιγμιαία ταχύτητα της παλινδρομικής κίνησης του εμβόλου μπορεί να υπολογιστεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια με τον παρακάτω τύπο (Maass και Klier, 1981):



$$S_p = r\omega(\sin \phi + \lambda \sqrt{2 \sin 2\phi}) \quad (5.1)$$

όπου :

S_p = στιγμιαία ταχύτητα εμβόλου

r = ακτίνα στροφάλου

ω = γωνιακή ταχύτητα στροφάλου

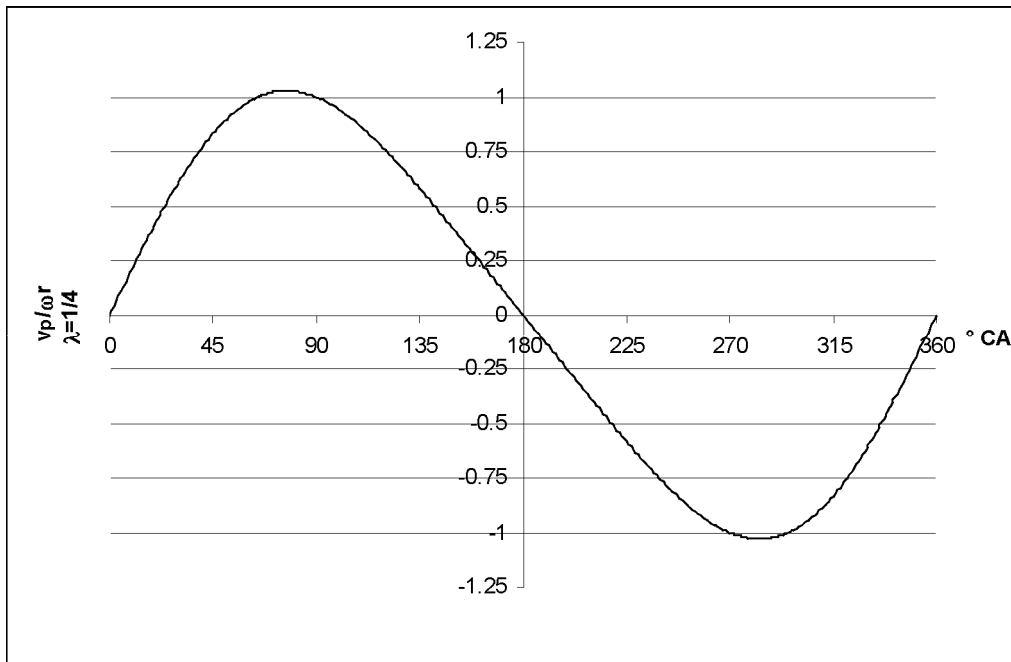
ϕ = γωνία στροφάλου

λ = λόγος στροφάλου – διωστήρα

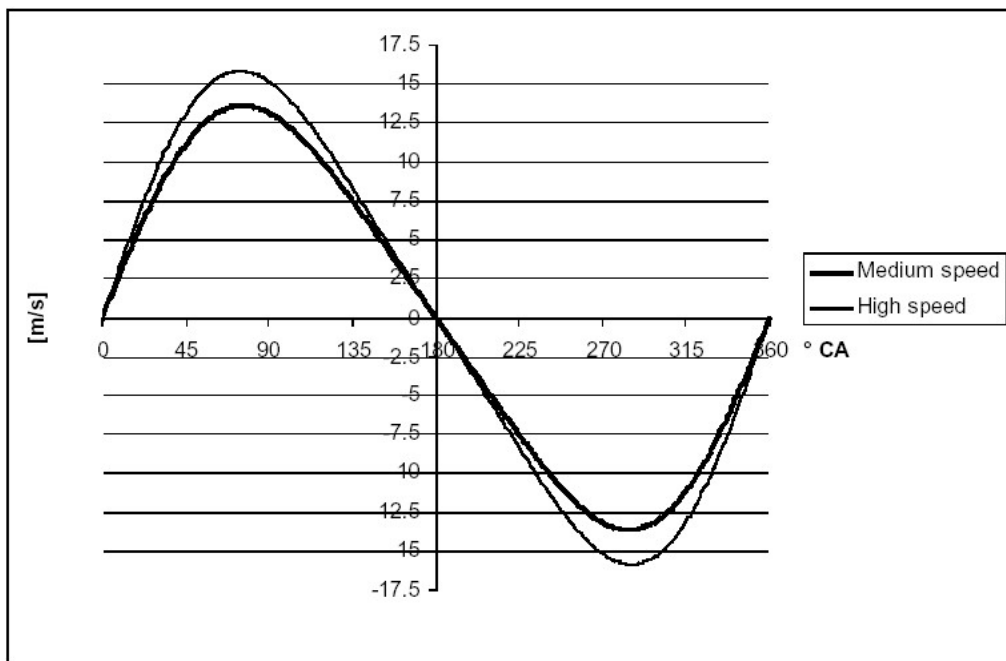
l = μήκος διωστήρα

Εικόνα 5.1 - Μηχανισμός στροφάλου με παραμέτρους θέσεως του εμβόλου.

Η ακριβής ταχύτητα του εμβόλου μπορεί να υπολογιστεί με παραγωγή της παραπάνω εξίσωσης προσδιορίζοντας την απόσταση μεταξύ του εμβόλου και του άνω νεκρού σημείου. Η συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας εμβόλου και γωνίας στροφάλου παρουσιάζεται στην **Εικ. 5.2**. Η **Εικ. 5.3** παρουσιάζει τη μεταβολή της ταχύτητας του εμβόλου για δυο πραγματικές μηχανές diesel συναρτήσει της γωνίας στροφάλου.



Εικόνα 5.2 – Γραφική παράσταση της σχετικής ταχύτητας εμβόλου (v_p/ω_r) συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για $\lambda=1/4$.



Εικόνα 5.3 – Γραφική παράσταση της στιγμιαίας ταχύτητας εμβόλου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για μηχανή diesel μέσης και υψηλής ταχύτητας περιστροφής.

Η επιτάχυνση του ελατηρίου εμβόλου επηρεάζει το φαινόμενο ανύψωσης του ελατηρίου. Η επιτάχυνση του εμβόλου μπορεί να μετρηθεί από την εξίσωση της ταχύτητας του εμβόλου με την παραγωγή αυτής. Η σχέση μεταξύ της επιτάχυνσης του εμβόλου και της γωνίας στροφάλου παρουσιάζεται στην **Εικ. 5.4**. Στην **Εικ. 5.5** παρουσιάζονται οι καμπύλες της επιτάχυνσης του εμβόλου για δυο πραγματικές μηχανές diesel συναρτήσει της γωνίας στροφάλου. Η παρακάτω εξίσωση δίνει μία προσεγγιστική τιμή για την επιτάχυνση του εμβόλου. (Maass και Klier, 1981) :

$$a_p = \omega^2 r (\cos \phi + \lambda \cos \phi 2\phi)$$

όπου :

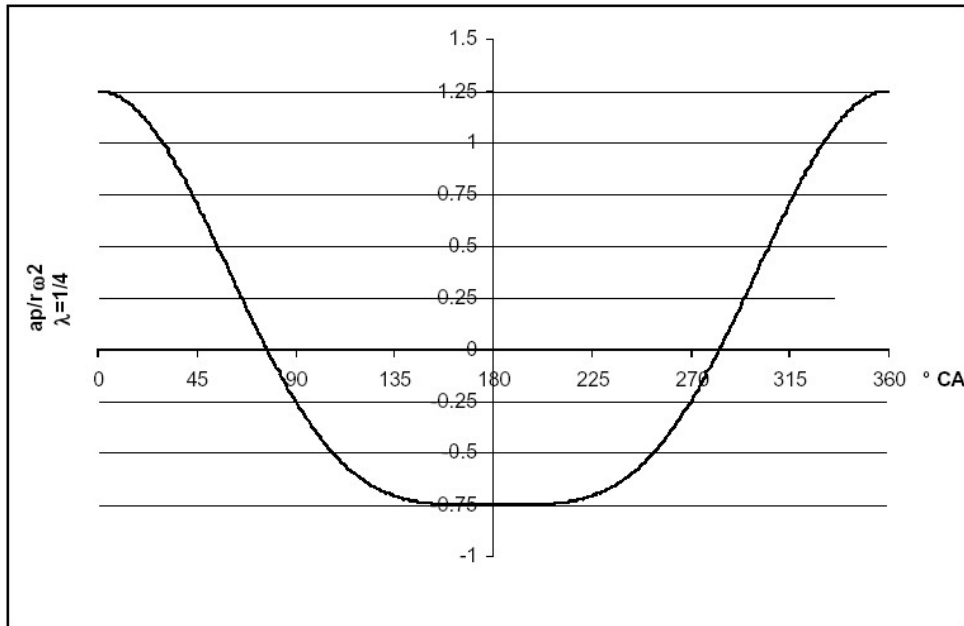
a_p = επιτάχυνση εμβόλου

r = ακτίνα στροφάλου

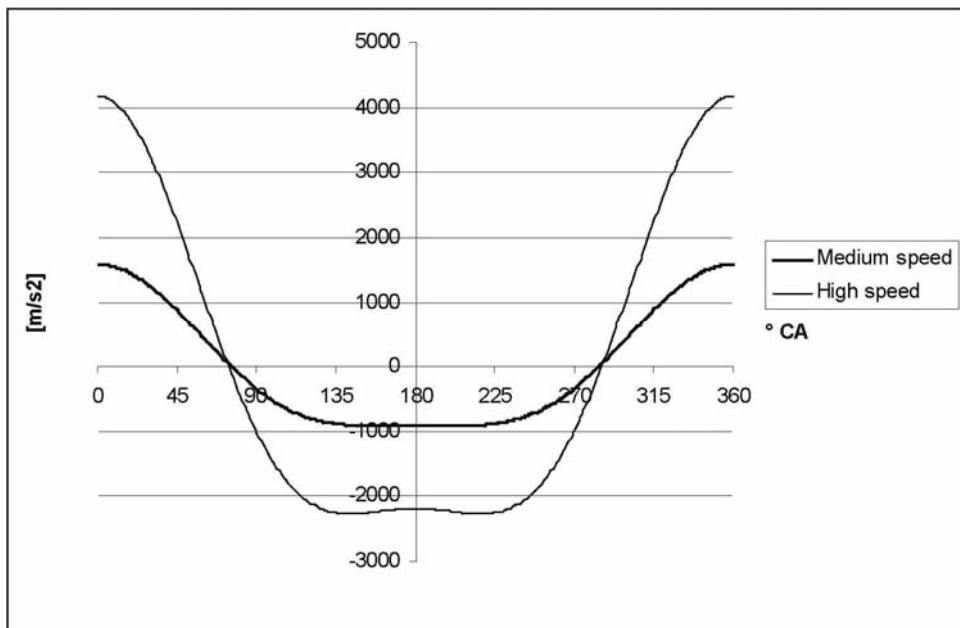
ω = γωνιακή ταχύτητα στροφάλου

ϕ = γωνία στροφάλου

λ = λόγος ακτίνας στροφάλου – μήκους διωστήρα

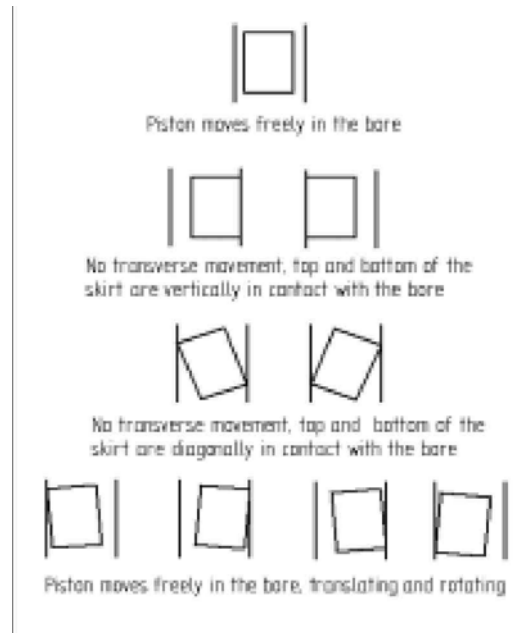


Εικόνα 5.4 – Γραφική παράσταση της σχετικής επιτάχυνσης εμβόλου ($a_p/\omega^2 r$) συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για $\lambda=1/4$.



Εικόνα 5.5 – Καμπύλες επιτάχυνσης εμβόλου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για έμβολα μηχανών diesel μέσης και υψηλής ταχύτητας περιστροφής.

Εκτός από την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου, η δευτερεύουσα κίνηση του εμβόλου επηρεάζει την επαφή του ελατηρίου με το χιτώνιο και κατ' επέκταση τη λειτουργία του. Το διάκενο μεταξύ του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου επιτρέπει πλευρικές κινήσεις και κλίσεις του εμβόλου ανάλογα με τις δυνάμεις και με τις ροπές που δρουν πάνω σ' αυτό. Οι βασικές κινήσεις του εμβόλου στην εσωτερική διάμετρο του κυλίνδρου παρουσιάζονται στην **Εικ. 5.6** (Haddad και Tjan, 1995, Chittenden και Priest, 1993).



Εικόνα 5.6 - Βασικές κινήσεις του εμβόλου στην εσωτερική διάμετρο του κυλίνδρου.

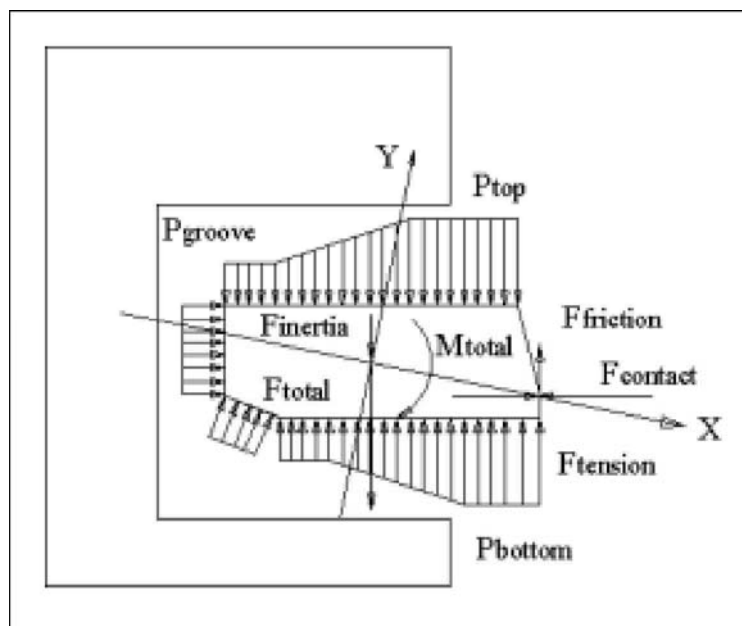
5.2 Δυνάμεις και ροπές των ελατηρίων εμβόλου

Οι δευτερεύουσες κινήσεις του ελατηρίου του εμβόλου μπορούν να διαιρεθούν σε κίνηση του ελατηρίου σε κάθετη διεύθυνση, περιστροφική κίνηση, ανύψωση, και κλίση του ελατηρίου. Αυτές οι κινήσεις προκύπτουν από διαφορετικά φορτία που επενεργούν επάνω στο ελατήριο. Τέτοια φορτία είναι για παράδειγμα τα αδρανειακά φορτία λόγω της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης του εμβόλου, φορτία που αποσβένονται από τη μεμβράνη λιπαντικού, φορτία λόγω της διαφοράς πιέσεων κατά μήκος της περιφέρειας του ελατηρίου, και φορτία τριβής λόγω ολίσθησης μεταξύ των επιφανειών του ελατηρίου και του χιτωνίου του κυλίνδρου. Οι δυνάμεις που δρουν στο ελατήριο παρουσιάζονται στην **Εικ. 5.7**. (Ejakov et al., 1999).

Η πίεση των αερίων επάνω, κάτω και πίσω από το ελατήριο δημιουργεί απορρέουσες δυνάμεις στην κατατομή του ελατηρίου (Dowson, 1993). Οι αδρανειακές δυνάμεις που ενεργούν στα ελατήρια του εμβόλου, όπως επίσης αυτές που ενεργούν στον υπόλοιπο μηχανισμό του στροφαλοφόρου που παλινδρομεί μεταβάλλονται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας της μηχανής (βλέπε **Εικ. 5.2** και **5.4**) (Röhrlé, 1995). Η πλευρική φόρτιση του εμβόλου επάνω στα

τοιχώματα του εξαρτάται και από τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται το έμβολο με την μικρή κεφαλή του διωστήρα (Röhrlie,1995). Η επίδραση του διακένου μεταξύ του χιτωνίου του κυλίνδρου και του εμβόλου επάνω στην κίνηση του εμβόλου και του ελατηρίου και οι δυνάμεις που εμφανίζονται επάνω στο ελατήριο παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.1, στην **Εικ. 5.6**. Η διάτμηση της μεμβράνης του λιπαντικού, οι δυνάμεις τριβής-ολίσθησης και η πίεσης επαφής μεταξύ του ελατηρίου και του χιτωνίου προκαλούν κάθετες και εφαπτομενικές δυνάμεις στην επιφάνεια επαφής του ελατηρίου.

Η ελαστική παραμόρφωση του εμβόλου και του χιτωνίου μπορούν να επηρεάσουν την κατασκευαστική γεωμετρία της επιφάνειας επαφής του ελατηρίου και την επαφή του με το χιτώνιο του κυλίνδρου, που προκαλεί μια μη κανονική κατανομή της πίεσης επαφής μεταξύ του χιτωνίου του κυλίνδρου και του προσώπου του ελατηρίου του εμβόλου και μπορεί λόγω αυτού να οδηγήσει στην αύξηση της διαφυγής καυσαερίων και της κατανάλωσης λιπαντικού (Dowson, 1993).



Εικόνα 5.7 – Δυνάμεις που ενεργούν επάνω σε ένα ελατήριο εμβόλου (Ejakov, et al., 1999).

Ο πείρος του εμβόλου τοποθετείται συχνά με εκκεντρότητα σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του εμβόλου. Αυτή η διάταξη εφαρμόζεται ώστε να αποφευχθεί ο θόρυβος που δημιουργείται από το έμβολο ή και για να μειωθεί το θερμικό φορτίο στις υποδοχές των ελατηρίων (Röhrlie, 1995). Οι Haddad και Tjan χρησιμοποίησαν ένα πρόγραμμα σε υπολογιστή για να ερευνήσουν την επίδραση της εκκεντρότητας του πείρου του εμβόλου, του κέντρου βάρους, και της εκκεντρότητας του στροφάλου από τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου, στην μηχανική απόδοση και στο θόρυβο της μηχανής. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραβλέπουν ότι, γενικά, οι απώλειες της κινητικής ενέργειας μειώνονται όταν η εκκεντρότητα του πείρου του εμβόλου δίδεται προς την κύρια ωστική πλευρά του εμβόλου και η μηχανική απόδοση αυξάνεται όταν η εκκεντρότητα του πείρου του εμβόλου δίδεται προς τη δευτερεύουσα ωστική πλευρά του εμβόλου. Στα συμπεράσματα της εργασίας τους, οι ερευνητές επισημαίνουν ότι η εκκεντρότητα του πείρου του εμβόλου είναι η πιο ευαίσθητη παράμετρος που παράγει αξιοσημείωτες μεταβολές στην απώλεια κινητικής ενέργειας και στη μηχανική απόδοση. Επιπλέον, η απώλεια κινητικής ενέργειας μπορεί να μειωθεί, και η μηχανική απόδοση μπορεί να αυξηθεί τοποθετώντας την εκκεντρότητα του πείρου

του εμβόλου στην ωστική πλευρά του εμβόλου (Haddan και Tjan, 1995). Οι Chittenden και Priest σε δική τους έρευνα κατέληξαν στα ίδια συμπεράσματα. Σύμφωνα με τις προβλέψεις τους, η κατάσταση φθοράς στα σημεία επαφής θα επιδεινωθεί και οι απώλειες τριβής θα αυξηθούν εάν η εκκεντρότητα του πείρου του εμβόλου δοθεί προς τη δευτερεύουσα ωστική πλευρά του εμβόλου (Chittenden και Priest, 1993).

5.3 Πίεση επαφής ελατηρίου

5.3.1 Πίεση επαφής λόγω συμπίεσης του ελατηρίου

Η ελαστική δύναμη των ελατηρίων του εμβόλου εξαρτάται από τον τύπο του ελατηρίου και την κατηγορία της ονομαστικής πίεσης επαφής. Για παράδειγμα, η θεωρητική πίεση επαφής που χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς των ελαστικών δυνάμεων των ελατηρίων ορθογωνικής και (σφηνοειδούς) διατομής που κατασκευάζονται από χάλυβα είναι περίπου $0,19 \text{ N/mm}^2$. Η πίεση επαφής των ελατηρίων συμπίεσης είναι μικρότερη απ' ό,τι αυτή των ελατηρίων λαδιού (Dowson, 1993). Στην περίπτωση των ελατηρίων λαδιού με πρόσθετο εσωτερικό σπειροειδές ελατήριο η πίεση είναι περίπου 1 N/mm^2 . Οι τιμές των ονομαστικών πιέσεων επαφής και ειδικών ελαστικών δυνάμεων για ποικίλα ελατήρια εμβόλου συνοψίζονται σε τυποποιημένα πρότυπα, όπως ISO 6621..6626(ISO 6621-4).

Σύμφωνα με εργασία του Dowson, το φορτίο που προκαλείται από την ελαστική πίεση στα ελατήρια που λειτουργούν με πιέσεις καυσαερίων που εισχωρούν στο πίσω μέρος τους κυμαίνεται τυπικά από 104-105 Pa. Αυτή η πίεση αντιστοιχεί περίπου στο 1% ή λιγότερο της μέγιστης τιμής της πίεσης των αερίων (Dowson, 1993).

Οι πιέσεις επαφής που προέρχονται από την συμπίεση του ελατηρίου προκειμένου να τοποθετηθεί στην υποδοχή του αφού ελευθερωθεί στην τελική εσωτερική διάμετρο του κυλίνδρου είναι καθορισμένες σε άφθαρτα ελατήρια εμβόλου. Η κατάσταση αυτή αλλάζει σημαντικά στην περίπτωση που τα ελατήρια έχουν φθορές.

5.3.2 Πίεση επαφής λόγω πίεσης αερίων

Η πίεση των αερίων πίσω από το πρώτο ελατήριο συμπίεσης μεταβάλλεται ανάλογα με την πίεση που επικρατεί μέσα στον κύλινδρο. Η πίεση των αερίων πίσω από το δεύτερο ελατήριο συμπίεσης είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με την πίεση πίσω από το πρώτο ελατήριο. Η πίεση των αερίων πίσω από το ελατήριο λαδιού παραμένει σε ολόκληρο τον κύκλο λειτουργίας σχεδόν ίση με την πίεση που επικρατεί μέσα στον στροφαλοθάλαμο. Με την πίεση των αερίων να ασκείται στα ελατήρια του εμβόλου, η πίεση επαφής και συνεπώς η ανομοιομορφία της είναι σημαντική. Από την άλλη πλευρά, οι πιέσεις των αερίων έχουν σημασία μόνο για μια μικρή περίοδο του κύκλου λειτουργίας της μηχανής (Chittenden και Priest, 1993).

5.3.3 Πρόσθετα φορτία λόγω παραμόρφωσης της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου και του ελατηρίου

Εφόσον το ελατήριο και/ή η παραμόρφωση της διαμέτρου του κυλίνδρου οδηγεί σε ανομοιόμορφες πιέσεις επαφής, οι τοπικές πιέσεις μπορούν στιγμιαία να αυξηθούν αξιοσημείωτα σε υψηλότερες τιμές σε σχέση με την μέση τιμή της πίεσης επαφής. Σε μεγάλης κλίμακας παραμόρφωση, το ελατήριο δεν μπορεί να συνεργαστεί σωστά με τον κύλινδρο. Για να υποστηριχτεί το φορτίο του ελατηρίου, το ελατήριο πρέπει να παράγει κατά την κίνησή του μεγαλύτερες υδροδυναμικές πιέσεις στις περιοχές όπου τα τοιχώματα του κυλίνδρου είναι πιο κοντά στο ελατήριο (Ma et al., 1997a). Η παραμόρφωση της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου αναλύεται με περισσότερες λεπτομέρειες στην παράγραφο 4.2.

Οι επιφανειακές πιέσεις επηρεάζονται από την αρχική εσωτερική τραχύτητα του κυλίνδρου από την φθορά και την ποιότητα (φινίρισμα) της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου, όπως επίσης και από την ποιότητα επιφάνειας του ελατηρίου του εμβόλου.

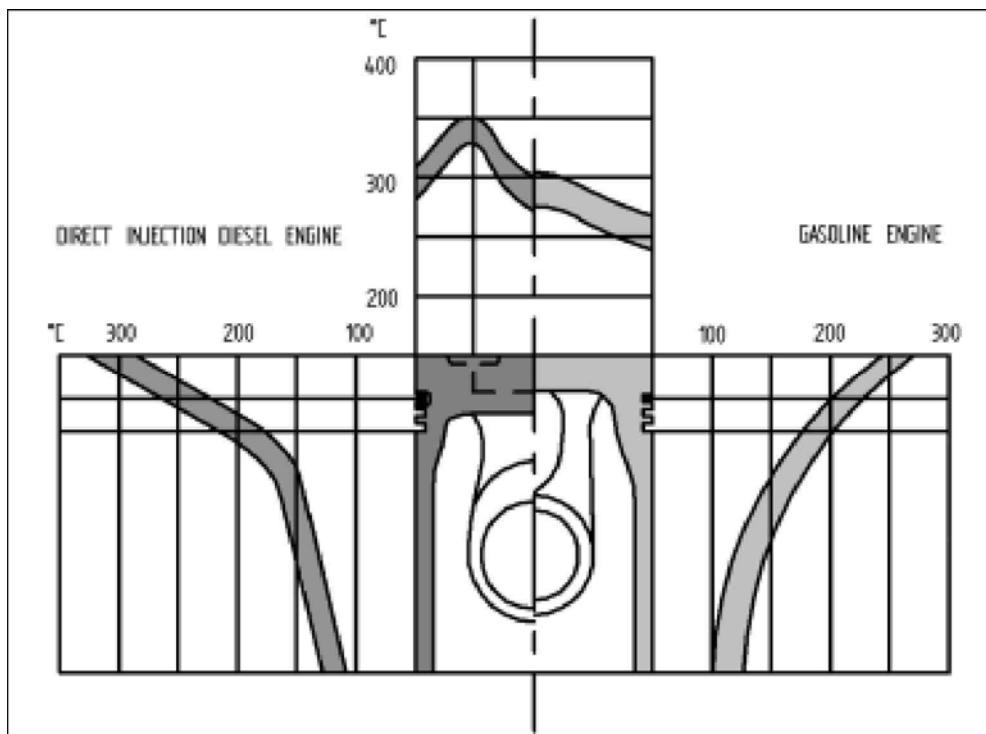
5.3.4 Ανομοιόμορφη κατανομή πίεσης λόγω κλίσης του ελατηρίου

Η κλίση ενός ελατηρίου επηρεάζει την ροή των αερίων, άρα και την αναπτυσσόμενη πίεση πίσω από τα ελατήρια του εμβόλου, η οποία προκαλεί ανομοιόμορφες πιέσεις επαφής που επηρεάζουν την καλή συνεργασία μεταξύ ελατηρίων και χιτωνίου. Κατά την κλίση του ελατηρίου, διαφορετικά τμήματα της επιφάνειας επαφής του ελατηρίου συμβάλουν διαδοχικά στην επαφή του ελατηρίου με το χιτώνιο, και αυτό οδηγεί σε ανομοιόμορφη πίεση επαφής. Η κλίση του ελατηρίου μπορεί να επηρεαστεί από το προφίλ του προσώπου του ελατηρίου. Ο Tian μελέτησε τη δυναμική συμπεριφορά των ελατηρίων εμβόλου και κατέληξε στο συμπέρασμα πως η χρήση ελατηρίων με συμμετρικό βαρελοειδές προφίλ, προκαλούσε μικρότερες κλίσεις του ελατηρίου κατά την κίνησή του και ταυτόχρονα σταθερότερες μέσες πιέσεις επαφής κατά τις ακτινικές διευθύνσεις, που ήταν μικρότερες από τις αντίστοιχες πιέσεις που αναπτύσσονταν με τη χρήση ελατηρίων με ορθογωνικό προφίλ.

6. Θερμικά φορτία

6.1 Μακροσκοπικά θερμικά φορτία

Η περιοχή της ζώνης των ελατηρίων, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής του εμβόλου πάνω από το πρώτο ελατήριο και το ίδιο το πρώτο ελατήριο, είναι άμεσα εκτεθειμένη στα καυσαέρια και, συνεπώς, υποβάλλεται σε παροδικές μεταβολές θερμοκρασίας. Στην **Εικ. 6.1** παρουσιάζεται μια σχηματική παράσταση κατανομής των αντιπροσωπευτικών θερμοκρασιών λειτουργίας μηχανών αυτοκινήτων diesel και otto στο πλήρες φορτίο (Röhrlé, 1995).



Εικόνα 6.1 – Σχηματική παράσταση κατανομής θερμοκρασιών λειτουργίας σε έμβολα μηχανών αυτοκινήτων υπό πλήρες φορτίο (Röhrlé, 1995).

Οι παροδικές μέγιστες θερμοκρασίες μέσα στο θάλαμο καύσης κατά τη διάρκεια της καύσης-εκτόνωσης σε μια μηχανή diesel μπορούν να φτάσουν μέχρι τους 2500 °C περίπου (Saad et al., 1991). Η μεγάλη ροή θερμότητας προκαλεί προβλήματα, όπως θερμικές τάσεις και περιορισμό της λιπαντικής μεμβράνης (Liu και Reitz, 1998). Τα μηχανικά φορτία είναι κατά πολύ μεγαλύτερα των θερμικών. Οι μεταβολές υψηλών θερμοκρασιών κατά την καύση στο επάνω μέρος ενός εμβόλου προκαλεί μείωση της σκληρότητας του κράματός του (Röhrlé, 1995), και μείωση της μηχανικής και διατμητικής αντοχής του καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται.

Η θερμοκρασία της κεφαλής του εμβόλου πάνω από το πρώτο ελατήριο είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτή των ελατηρίων του. Σε αυτή την περιοχή το λιπαντικό υποβάλλεται στα μεγαλύτερα φορτία όσον αφορά τη θερμική και οξειδωτική σταθερότητά του.

Τα χαρακτηριστικά του λιπαντικού σχετικά με αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, επιδρούν στο βαθμό σχηματισμού εναποθέσεων άνθρακα. Συνεπώς, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται συμβάλλουν έμμεσα στη φθορά, τη λείανση και την απόξεση (Saad et al., 1991).

Οι τοπικές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μεταξύ των αερίων καύσης και των μεταλλικών επιφανειών αυξάνουν τη μεταφορά θερμότητας, η οποία πραγματοποιείται κυρίως με συναγωγή καθώς η μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας είναι μικρή. Ο σχηματισμός εναποθέσεων άνθρακα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απορρόφησης της ακτινοβολούμενης θερμότητας. Περίπου το 40 έως 70% της συνολικής ροής θερμότητας από την κεφαλή του εμβόλου πραγματοποιείται μέσω της περιοχής ζώνης των ελατηρίων στα τοιχώματα του κυλίνδρου και στη συνέχεια προς το ψυκτικό μέσο (Röhrlé, 1995).

Εκτός από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, η διαστολή λόγω αύξησης της θερμότητας, καθώς και η παραμόρφωση που προκύπτει στην κεφαλή του εμβόλου, στα ελατήρια και στον κύλινδρο που επίσης σχετίζεται με τη θερμότητα, προκαλούν δυναμική απώλεια της σωστής συνεργασίας μεταξύ των ελατηρίων και του χιτωνίου.

6.2 Μικροσκοπικά θερμικά φορτία

Η θερμοκρασία επάνω σε μια επιφάνεια ολίσθησης είναι στις περισσότερες περιπτώσεις υψηλότερη από τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του υλικού της επιφάνειας αυτής λόγω της τριβής που λαμβάνει χώρα επάνω στην επιφάνεια ολίσθησης. Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, που εκφράζει την αρχή της διατήρησης της ενέργειας, η θερμότητα και το έργο είναι δύο αμφίδρομες μορφές ενέργειας που σχετίζονται μεταξύ τους. Ως εκ τούτου η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μια φυσική συνέπεια του έργου λόγω τριβής. Αξίζει, εντούτοις, να αναφερθεί ότι η θερμική ενέργεια δεν μπορεί να μετατραπεί εξολοκλήρου σε ωφέλιμο μηχανικό έργο, όπως δηλώνεται στο δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής (Matthews, 2000). Η θέρμανση λόγω τριβής εμφανίζεται ως θέρμανση των ρευστών λόγω του ιξώδους τους, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ των επιφανειών επαφής που βρίσκονται σε σχετική κίνηση, και ως θέρμανση των στερεών επιφανειών που έχουν επαφή ολίσθησης ή κύλισης.

6.2.1 Θέρμανση λόγω τριβής σε μη λιπασμένες επιφάνειες ολίσθησης

Η άνοδος της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας ολίσθησης από παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής, εξαρτάται από την ισχύ τριβής (P_μ) και την αλληλεπίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως η πραγματική επιφάνεια επαφής, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, η θερμοκρασία και ο όγκος του περιβάλλοντος υλικού, και η ψύξη που παρέχεται από ένα ρευστό λιπαντικό. Η ισχύς τριβής ορίζεται από τη σχέση:

$$P_\mu = F_\mu \times v = F_N \times \mu \times v \quad (6.1)$$

όπου F_μ είναι η δύναμη τριβής,
 v η ταχύτητα ολίσθησης ή κύλισης,
 F_N η κάθετη δύναμη, και
 μ ο συντελεστής τριβής.

Η επίδραση του έργου λόγω τριβής στη θερμοκρασία των επιφανειών ολίσθησης μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη, ανάλογα με το βάθος επίδρασης μέσα στην επιφάνεια και το λόγο των συνεργαζόμενων επιφανειών:

1. Παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού, σε βάθος περίπου μερικών δεκάτων του μm κάτω από την επιφάνεια. Η κατανομή αυτή της εσωτερικής θερμοκρασίας, μπορεί να θεωρηθεί περίπου σταθερή για ολόκληρη την επιφάνεια ολίσθησης και αυξάνει όταν αυξάνει το φορτίο και η ταχύτητα (Kong και Ashby, 1991).
2. Το έργο λόγω τριβής προκαλεί σημαντική στιγμιαία αύξηση των τοπικών θερμοκρασιών στις κορυφές των τραχυτήτων των επιφανειών μιας και επάνω σ' αυτές λαμβάνει χώρα η ολίσθηση. Λόγω του πολύ μικρού όγκου του υλικού που έχουν αυτές οι κορυφές των τραχυτήτων, οι στιγμιαίες θερμοκρασίες που παρατηρούνται είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές στο εσωτερικό του υλικού, αλλά και από τη θερμοκρασία της συνολικής επιφάνειας (Kong και Ashby, 1991). Σύμφωνα με εργασία των Bowden και Tabor, οι στιγμιαίες υψηλές θερμοκρασίες, ή θερμά σημεία, μπορούν να φτάσουν τη θερμοκρασία τήξης του ενός εκ των δύο συνεργαζόμενων υλικών που έχει το χαμηλότερο σημείο τήξης (Bowden και Tabor, 1971). Οι τοπικά υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να αυξηθούν εάν αυξηθεί η ταχύτητα ολίσθησης, ενώ είναι λιγότερο ευαίσθητες στο επιβαλλόμενο φορτίο (Kong και Ashby, 1991).

Οι παραπάνω βασικές αρχές σχετικά με την κατανομή της θερμοκρασίας σε επιφάνειες ολίσθησης έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη λογισμικού, το οποίο προορίζεται για την ανάλυση των θερμοκρασιών σε απλές επιφάνειες ολίσθησης (Ashby et al., 1990). Ένα παράδειγμα από τη χρήση τέτοιου λογισμικού φαίνεται στην **Εικ. 6.2**. Τα πρότυπα αυτά λογισμικά πραγματεύονται με μη λιπασμένες επιφάνειες, αλλά παρόλα αυτά οι βασικές αρχές τους θα μπορούσε να θεωρηθεί πως βρίσκουν εφαρμογή και σε επιφάνειες ολίσθησης με οριακή λίπανση ή σε περιπτώσεις όπου το λιπαντικό έχει εξαντληθεί.

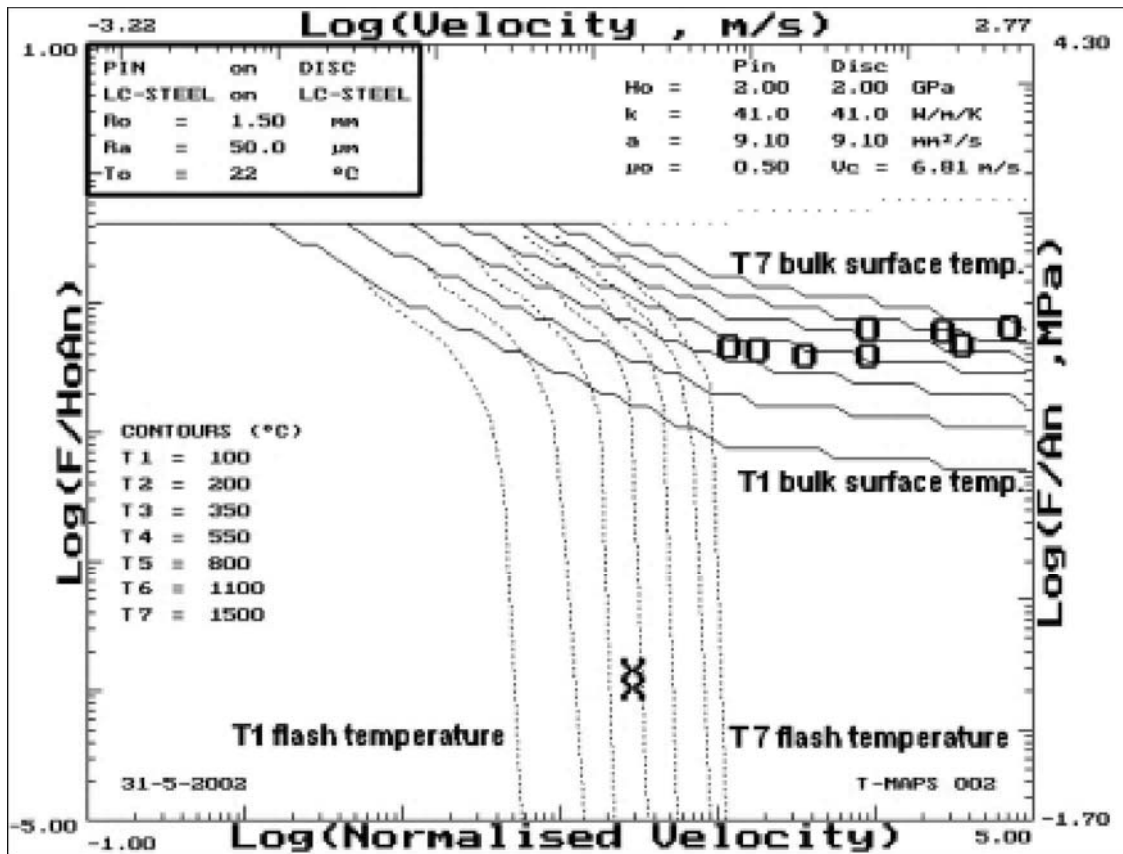
6.2.2 Θέρμανση του λιπαντικού που οφείλεται στο ιξώδες

Η άνοδος της θερμοκρασίας ενός υγρού λιπαντικού που οφείλεται στην εσωτερική τριβή λόγω του ιξώδους του εξαρτάται από την αλληλεπίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως η ειδική θερμότητα του λιπαντικού και ο ρυθμός ροής του. Το έργο λόγω της εσωτερικής αντίστασης ροής που οφείλεται στο δυναμικό ιξώδες και τη σχετική ταχύτητα μεταξύ της ακίνητης και της κινούμενης επιφάνειας, που έχουν επαφή ολίσθησης είναι:

$$F_{\eta} / A = \eta \times v / h \quad (6.2)$$

- όπου F_{η} η δύναμη λόγω ιξώδους που είναι αντίθετη προς τη φορά κίνησης,
 A το εμβαδόν της επιφάνειας που ολισθαίνει,
 η το δυναμικό ιξώδες του ρευστού,
 v η ταχύτητα ολίσθησης, και
 h το πάχος του λιπαντικού στρώματος.

Η ισχύς τριβής που οφείλεται σε απώλειες λόγω ιξώδους υπολογίζεται ως γινόμενο της δύναμης τριβής F_{η} και της ταχύτητας ολίσθησης v . Οι διακυμάνσεις του ιξώδους λόγω της θερμοκρασίας και της πίεσης καθιστούν τον υπολογισμό της ισχύος τριβής αρκετά πολύπλοκο. Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του έργου ιξώδους θα μπορούσε να αγνοηθεί, μιας και οι επιπτώσεις είναι σημαντικά μικρότερες από τις επιπτώσεις του έργου τριβής σε συνθήκες ξηράς τριβής ή οριακής λίπανσης των επιφανειών επαφής.



Εικόνα 6.2 – Παράδειγμα σε ένα χάρτη υπολογισμένων υψηλών θερμοκρασιών η επιφάνεια όγκου των θερμοκρασιών του φορτίου (του κάθετου άξονα) και της ταχύτητας ολίσθησης (του οριζόντιου άξονα) για χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ολισθαίνει ενάντια αυτού χωρίς λιπαντικό. Οι διευκρινίσεις του διαγράμματος των υψηλών θερμοκρασιών (οι διαμορφωμένες θερμοκρασίες T1...T7 διακλαδίζονται προς τα κάτω από το κέντρο του σχήματος) αυξάνονται απότομα με την αύξηση της ταχύτητας ολίσθησης, καθώς οι αντίστοιχες θερμοκρασίες της επιφάνειας όγκου (οι διαμορφωμένες θερμοκρασίες T1...T7 διακλαδίζονται δεξιά από το κέντρο του σχήματος) απαιτούν και οι δύο μία υψηλότερη ταχύτητα και ένα υψηλότερο φορτίο. Το παραγόμενο γράφημα χρησιμοποιεί χάρτες T 2.0 λογισμικού, οι οποίοι περιγράφονται στην αναφορά (Ashby et al., 1990).

7. Λίπανση ελατηρίων και ποδιάς εμβόλου

7.1 Παροχή λιπαντικού

7.1.1 Μηχανισμοί παροχής λιπαντικού και ποσότητα λιπαντικού



Τύποι εμβόλων

Η λίπανση του εμβόλου είναι στις περισσότερες περιπτώσεις στενά συνδεδεμένη με τη ψύξη του, αν και υπάρχουν κάποιοι τύποι εμβόλων για τα οποία δεν απαιτείται ψύξη. Τα έμβολα χωρίζονται σε κατηγορίες ως εξής:

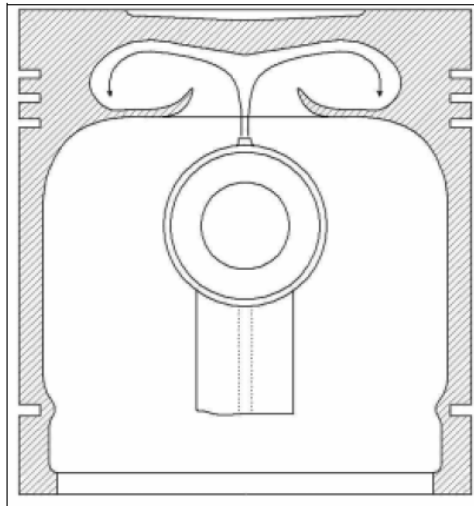
1. έμβολα που δεν ψύχονται καθόλου ή ψύχονται μέσω του λιπαντικού υπό μορφή ψεκασμού (**oil-spray cooling**),
2. έμβολα που διαθέτουν σύστημα ψύξης με λιπαντικό (**oil-cooled pistons**) και
3. έμβολα στα οποία εδράζεται η κεφαλή του διωστήρα.

Στις πολύστροφες μηχανές εσωτερικής καύσης γίνεται χρήση εμβόλων της πρώτης κατηγορίας. Το κάτω μέρος του εμβόλου ψύχεται μέσω του λιπαντικού υπό τη μορφή ψεκασμού εάν αυτό είναι απαραίτητο. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα έμβολα τα οποία διαθέτουν εσωτερικές διόδους και οπές ψύξης. Η παροχή του λιπαντικού στο έμβολο γίνεται συνήθως μέσα από το διωστήρα, και προέρχεται από τα έδρανα βάσης. Στην **Εικ. 7.1** φαίνεται ένα έμβολο μορφής **αναδευτήρα**, όπου το άνω έδρανο του διωστήρα έχει διαμορφωθεί με κατάλληλη οπή ώστε το λιπαντικό να εκτοξεύεται στο έμβολο. Το λιπαντικό διαχέεται και στις δύο αντίθετες πλευρές της εσωτερικής κοιλότητας του εμβόλου, καθώς αυτό κινείται παλινδρομικά σε κάθε κύκλο.



Παροχή λιπαντικού

Το λιπαντικό είναι απαραίτητο στα ελατήρια του εμβόλου και στο χιτώνιο του κυλίνδρου παρέχοντας την απαραίτητη υδροδυναμική ή μικτή λίπανση προκειμένου να μειωθεί η τριβή και να αποφευχθεί το κόλλημα του εμβόλου. Επιπροσθέτως της λιπαντικής του δράσης, το λιπαντικό δρα και ως μεταφορέας θερμότητας μιας και απάγει θερμότητα από το έμβολο και το χιτώνιο του κυλίνδρου. Ακόμη περισσότερο, το λιπαντικό είναι απαραίτητο ώστε να αποτραπεί το κόλλημα των ελατηρίων συμπίεσης στις υποδοχές τους. Η παροχή του λιπαντικού προς το έμβολο και το χιτώνιο γίνεται συνήθως από τον στροφαλοθάλαμο με άμεσο ή έμμεσο τρόπο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παροχή του λιπαντικού εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανής και από την απαιτούμενη ποσότητα του λιπαντικού. Στους πολύστροφους κινητήρες μικρού κυβισμού η παροχή της απαραίτητης ποσότητας λιπαντικού γίνεται με χρήση της μεθόδου λίπανσης **με εκτόξευση**, κατά την οποία ο διωστήρας διαθέτει διαμόρφωση που βυθίζεται στο λιπαντικό που βρίσκεται στην ελαιολεκάνη της μηχανής και κατά την περιστροφική του κίνηση εκτοξεύει λιπαντικό προς το έμβολο και τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Για τους κινητήρες μεγαλύτερου κυβισμού θα πρέπει το λιπαντικό να διοχετευτεί προς το έμβολο υπό πίεση, καθώς αυτοί οι κινητήρες απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες λιπαντικού. Μια από τις μεθόδους που ακολουθούνται για την παροχή του λιπαντικού προς το έμβολο είναι αυτή κατά την οποία το λιπαντικό διέρχεται μέσα από τα κύρια έδρανα βάσης προς τον στροφαλοφόρο και από εκεί οδηγείται στα κομβία στροφάλου και έπειτα μέσω του διωστήρα προς το έμβολο.

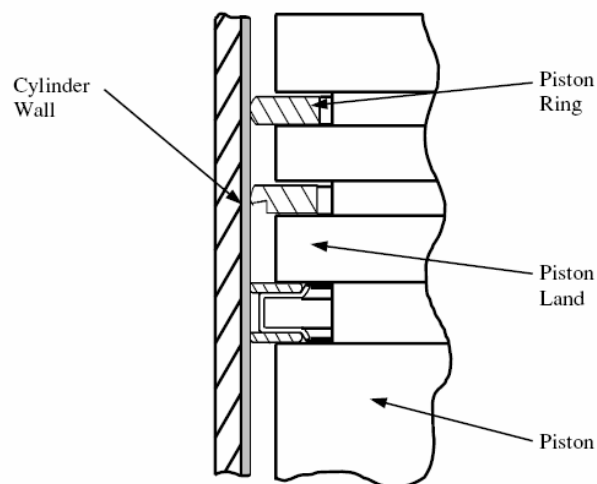


Εικόνα 7.1 - Έμβολο τύπου **αναδευτήρα** (“Shaker”-piston).

↪ **Μηχανισμοί μεταφοράς του λιπαντικού**

Οι μηχανισμοί μεταφοράς του λιπαντικού έχουν μελετηθεί με τη βοήθεια μιας διαδιάστατης τεχνικής φθορισμού που προκαλείται με τη χρήση ακτινών laser. Αυτή η τεχνική είναι δυνατό να αποκαλύψει πληροφορίες σχετικά με την κατανομή του λιπαντικού στις επιφάνειες του εμβόλου και μεταξύ των ελατηρίων και του χιτωνίου του κυλίνδρου. Η συσσώρευση λιπαντικού στην περιοχή της κεφαλής (**crownd land**), που όπως φαίνεται και στην **Εικ. 7.2** είναι η περιοχή του εμβόλου πάνω από το πρώτο ελατήριο συμπίεσης, έχει μελετηθεί από τον Thirouard και τους συνεργάτες του. Η συσσώρευση του λιπαντικού προερχόταν πιθανότατα από την απόξεση του κυλίνδρου από το πρώτο ελατήριο σε χρόνους κατά τους οποίους το έμβολο κινείται από το Κ.Ν.Σ. προς το Α.Ν.Σ (**ανοδική απόξεση**). Στην περιοχή μεταξύ του δευτέρου και του πρώτου ελατηρίου συμπίεσης (**second land**) έχουν παρατηρηθεί δύο μηχανισμοί ροής λιπαντικού

- α) ροή λιπαντικού λόγω αδρανειακών δυνάμεων στην αξονική διεύθυνση και
- β) εξαναγκασμένη ροή λιπαντικού λόγω της ροής των αερίων καύσης στην περιφερειακή διεύθυνση.



Εικόνα 7.2 - Διάταξη των ελατηρίων συμπίεσης επάνω στο έμβολο (Gamble, 2003).

Η απόξεση του κυλίνδρου από το πρώτο ελατήριο συμπίεσης παρατηρείται σε ταχύτητες περιστροφής της μηχανής πάνω από 1.600 στροφές ανά λεπτό. Λόγω της αυξημένης πίεσης των αερίων καύσης παρατηρείται επίσης ότι το έμβολο κλίνει προς την ωστική πλευρά. Η κλίση του εμβόλου και του ελατηρίου προκαλούν απόξεση του λιπαντικού από το χιτώνιο του κυλίνδρου κοντά στην περιοχή του πρώτου ελατηρίου, κατά τη κίνηση του εμβόλου από το Κ.Ν.Σ. προς το Α.Ν.Σ (**ανοδική απόξεση**), καθώς δεν υπάρχει υδροδυναμική πίεση να αντισταθμίσει τις ακτινικές δυνάμεις. Το λιπαντικό που αποξέεται από τον κύλινδρο μεταφέρεται στην περιοχή της κεφαλής (**crowd land**). Ένας δεύτερος μηχανισμός μεταφοράς λιπαντικού που παρατηρείται σχετίζεται με τη ροή λιπαντικού από την περιοχή μεταξύ του δεύτερου και του πρώτου ελατηρίου συμπίεσης (**second land**) στην περιοχή της κεφαλής (**crowd land**) (Thirouard et al., 1998).

Ακόμη περισσότερο, οι Thirouard και συνεργάτες παρατήρησαν ότι υπάρχουν 3 πιθανοί μηχανισμοί μεταφοράς λιπαντικού στην περιοχή μεταξύ του δεύτερου και του πρώτου ελατηρίου συμπίεσης (**second land**):

1. Με απόξεση του λιπαντικού από τον κύλινδρο από το πρώτο ελατήριο συμπίεσης κατά την κίνηση του εμβόλου από το Α.Ν.Σ. προς το Κ.Ν.Σ (**καθοδική απόξεση**) ή από το δεύτερο ελατήριο συμπίεσης κατά την κίνηση του εμβόλου από το Κ.Ν.Σ. προς το Α.Ν.Σ (**ανοδική απόξεση**). Αν το δεύτερο ελατήριο διαμορφωθεί με κωνοειδές (σφηνοειδές) προφίλ προσώπου τότε η απόξεση του λιπαντικού, από τον κύλινδρο κατά την κίνηση του εμβόλου από το Κ.Ν.Σ. προς το Α.Ν.Σ (**ανοδική απόξεση**), δεν είναι δυνατή.
2. Με την κίνηση του λιπαντικού μέσω των δύο άνω υποδοχών των ελατηρίων συμπίεσης. Το λιπαντικό ρέει μέσα στην υποδοχή του κάθε ελατηρίου συμπίεσης και έπειτα αντλείται προς το εξωτερικό της υποδοχής ως αποτέλεσμα της ακτινικής κίνησης του ελατηρίου μέσα σε αυτήν.
3. Με τη μεταφορά του λιπαντικού λόγω των αερίων της καύσης, μεταξύ των διακένων των ελατηρίων συμπίεσης. Η ροή του λιπαντικού παρατηρείται είτε προς είτε από το θάλαμο καύσης (Thirouard et al., 1998).

7.1.2 Ποιότητα λιπαντικού

Η ποιότητα του λιπαντικού υποβαθμίζεται λόγω της επερχόμενης γήρανσης και ρύπανσης αυτού. Τα διάφορα πρόσθετα που διαθέτει το λιπαντικό εξασθενούν και σωματίδια που προέρχονται από την καύση, όπως είναι σωματίδια αιθάλης και μεταλλικά σωματίδια λόγω φθοράς ή τριβής, ρυπαίνουν το λιπαντικό. Στην περιοχή των ελατηρίων συμπίεσης το φαινόμενο λαμβάνει χώρα κοντά στα ελατήρια και μεταξύ αυτών. Η υποβάθμιση προκαλείται ειδικότερα από αέρια καύσης υψηλής θερμοκρασίας.



Τροποποιητές τριβής

Ένα λιπαντικό αποτελείται από τη βασική λιπαντική ουσία (προϊόν βάσης) και τα διάφορα πρόσθετα. Τα πρόσθετα ποικίλουν ανάλογα με το ρόλο που καλείται να επιτελέσει το λιπαντικό. Τα πλέον συνηθισμένα πρόσθετα λιπαντικών είναι τα λιπαρά πρόσθετα (αντι-τριβικά πρόσθετα), βελτιωτές ιξώδους και πρόσθετα που λειτουργούν κατά τη φθοράς όπως είναι το ZDDP.

Ενώσεις του μολυβδαινίου όπως το (Molybdenum dialkylthiocarbamate / MoDTC) είναι ένα πρόσθετο βασικού λιπαντικού που μειώνει την τριβή στις επιφάνειες επαφής. Τα λιπαντικά κινητήρων με ή χωρίς αντι-τριβικά πρόσθετα έχουν μελετηθεί από τους Glidewell και Korcek. Στη μελέτη τους φάνηκε ότι η τριβή στις περιπτώσεις λιπαντικών που περιείχαν MoDTC ήταν μικρότερη σε σχέση με τις περιπτώσεις λιπαντικών που δεν περιείχαν MoDTC. Σε συνθήκες μείωσης του προσθέτου MoDTC, στις περιπτώσεις βασικών λιπαντικών όπου περιείχαν MoDTC ως πρόσθετο, η τριβή ήταν ίση με των λιπαντικών όπου το MoDTC δεν περιεχόταν ως πρόσθετο. Με την πάροδο του χρόνου, η επίδραση του προσθέτου MoDTC στο μηχανισμό της τριβής μειώνεται σημαντικά (Glidewell και Korcek, 1998).

7.1.3 Ρύπανση του λιπαντικού



Διάστημα αλλαγής λιπαντικού

Η αλλαγή του λιπαντικού είναι επιτακτική και σχετίζεται τόσο με την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του, κυρίως του ιξώδους του, όσο και με την οξείδωσή του, αλλά και με την παρουσία στερεών ή υγρών ρύπων που αναμιγνύονται με το λιπαντικό με την πάροδο του χρόνου χρήσης του. Η παρουσία ρύπων στα λιπαντικά των κινητήρων είναι γενικά ανεπιθύμητη, καθώς οι στερεοί ρύποι είναι πιθανό να προκαλέσουν φθορά λόγω αποξέσεων, ενώ οι υγροί ρύποι μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση, τριβολογική και χημική φθορά καθώς και μεταβολή του ιξώδους. Στις πετρελαιομηχανές μπορεί να εμφανιστεί ανεπιθύμητη λείανση του χιτωνίου του κυλίνδρου (**bore polishing**), εάν παρουσιαστούν διαβρωτικοί παράγοντες ή σωματίδια λόγω απόξεσης στο λιπαντικό (Godfrey, 2000).

Με την πάροδο του χρόνου εμφανίζεται συσσώρευση των ρύπων στο λιπαντικό του κινητήρα. Το μειονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται με την αλλαγή του ρυπασμένου λιπαντικού με νέο. Πρόσφατες έρευνες από τους Bijwe και συνεργάτες του κατέδειξαν την αναγκαιότητα για την αντικατάσταση του λιπαντικού του στροφαλοθαλάμου ανά τακτά χρονικά διαστήματα (Bijwe et al., 2000). Η αλλαγή του λιπαντικού μπορεί να καθορισθεί σύμφωνα με το χρόνο χρήσης του λιπαντικού, ειδικά στις περιπτώσεις μηχανών μικρού κυβισμού, ή σύμφωνα με την ποιότητα του λιπαντικού, όπως αυτή καθορίζεται από δειγματοληπτικές αναλύσεις ή μέσω της απόκρισης αισθητήρα σωματιδίων στην ελαιολεκάνη ή στο κύκλωμα κυκλοφορίας του λιπαντικού (Chambers et al., 1988, Hunt, 1993). Όταν γίνεται χρήση προγράμματος ανάλυσης του λιπαντικού, θα πρέπει η τοποθεσία και ο χρόνος της δειγματοληψίας ενός μεταχειρισμένου λιπαντικού να επιλέγεται προσεκτικά, καθώς και οι δύο αυτοί παράγοντες μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος του λιπαντικού, σχετικά με την κατάσταση της μηχανής. Στους κινητήρες όπου χρησιμοποιείται ελαιολεκάνη για το λιπαντικό (**wet sump engines**), το σημείο δειγματοληψίας του λιπαντικού, θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ της αντλίας και του φίλτρου του λιπαντικού. Αντιθέτως οι κινητήρες με ξηρό κάρτερ τύπου **dry sump**, διαθέτουν δεξαμενή λαδιού που είναι εκτός του χώρου της μηχανής. Το λιπαντικό αντλείται εντός της μηχανής από τη δεξαμενή λαδιού με τη βοήθεια αντλίας, κατόπιν το λιπαντικό καταλήγει στην ελαιολεκάνη και από εκεί και πάλι με τη βοήθεια δεύτερης αντλίας και κυκλώματος επιστροφής, επιστρέφει στη δεξαμενή λαδιού. Αυτή ακριβώς η γραμμή επιστροφής χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία, με δεδομένο ότι η πίεση είναι κατάλληλη ώστε να είναι δυνατή η άντληση δείγματος λιπαντικού από το κύκλωμα, άντληση που μπορεί να υποβοηθηθεί με τη χρήση αντλίας κενού (Fitch and Troyer, 2000). Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός

ότι το λιπαντικό κοντά στα ελατήρια συμπίεσης είναι πολύ πιο ακάθαρμο από το λιπαντικό στην ελαιολεκάνη της μηχανής ή στη δεξαμενή λαδιού (Fox et al., 1997, Dato και Fox, 2002).

Πέρα από τις οξειδώσεις που υφίσταται το λιπαντικό και τις προσμείξεις του με ρύπους που μειώνουν τη διάρκεια ζωής του, η μείωση του ιξώδους και των προσθέτων του (Glidewell and Korcek, 1998) είναι επίσης σημαντικοί λόγοι που καθιστούν επιτακτική την αλλαγή του. Το πρόσθετο τύπου MoDTC/ZnDTP, που είναι ισχυρό αντι-τριβικό πρόσθετο, μπορεί να καταναλωθεί λόγω οξείδωσης καθώς είναι γνωστό ότι το πρόσθετο συμμετέχει και στην αντιοξειδωτική προστασία των μεταλλικών επιφανειών από το λιπαντικό (Korcek et al., 2001). Η RULER™ (Remaining Useful Life Evaluation Routine) είναι μια από τις πρόσφατες μεθόδους ανάλυσης και εκτίμησης του υπολειπόμενου ωφέλιμου χρόνου ζωής του λιπαντικού ενός κινητήρα, που έχουν προστεθεί στις υπάρχουσες, μέσω της οποίας οι παραμένουσες συγκεντρώσεις από ZDDP, φαινυλικών και αμινικών αντιοξειδωτικών μπορούν εύκολα να παρακολουθηθούν (Jefferies και Ameye, 1998).



Ρύποι στερεών σωματιδίων

Η επιβλαβής επίδραση των στερεών σωματιδίων στο λιπαντικό της μηχανής είναι ιδιαίτερα εμφανής κατά την επαφή των σωματιδίων με μαλακότερα υλικά στο χώρο του κυλίνδρου, όπως είναι η ποδιά του εμβόλου και οι τριβείς ολίσθησης, όπως επίσης και σε υψηλά φορτισμένες επιφάνειες επαφής όπως είναι αυτή του εκκεντροφόρου και του στελέχους της βαλβίδας. Το λιπαντικό του στροφαλοθάλαμου το οποίο περιέχει ρινίσματα στερεών σωματιδίων οδηγεί στη φθορά της ποδιάς του εμβόλου κάτω από τα ελατήρια συμπίεσης του εμβόλου. Η φθορά της επιφάνειας κάτω από τα ελατήρια είναι εμφανής λόγω της λείας και στιλβωμένης μορφής που παρουσιάζει, ειδικά από την ωστική πλευρά της ποδιάς του εμβόλου. Τα ελατήρια του εμβόλου καταπονούνται από φθορά λόγω απόξεσης εφόσον τα στερεά σωματίδια έχουν το κατάλληλο μέγεθος σε κατάλληλες συγκεντρώσεις ως προς το λιπαντικό. Η λείανση του εσωτερικού του κυλίνδρου είναι ακόμη ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο της ύπαρξης μικρών στερεών σωματιδίων στο λιπαντικό, ενώ τα σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους μπορούν να προκαλέσουν γραμμώσεις (Godfrey, 2000, Jiang και Wang, 1998).

Η προέλευση των στερεών ρύπων μπορεί να οφείλεται στην αιθάλη της καύσης, απορροφημένη σκόνη υπό τη μορφή διοξειδίου του πυριτίου ή παρεμφερών ανόργανων υλικών και σωματιδίων που προκαλούν φθορά λόγω τριβής, οι οποίες αποτελούνται από σιδηρούχες ενώσεις, χαλκό, μόλυβδο, χρώμιο, αλουμίνιο, κασίτερο και κράματα νικελίου (Macián et al., 2001). Κατά την περίοδο ρονταρίσματος της μηχανής η πιθανότητα για απόξεση μεγαλύτερων σωματιδίων λόγω φθοράς είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την περίοδο κανονικής λειτουργίας της μηχανής (Kaisheng et al., 1998). Η συσσώρευση σωματιδίων στο λιπαντικό της μηχανής μπορεί να αποφευχθεί αποτελεσματικά με τη χρήση φίλτρων λιπαντικού με κατάλληλη ονομαστική τιμή συγκράτησης σωματιδίων (Jiang και Wang, 1998, Jones και Eleftherakis, 1995). Έχει επίσης βρεθεί ότι η επανακυκλοφορία των αερίων της καύσης χωρίς παγίδα αιθάλης αυξάνει τα επίπεδα των σωματιδίων του άνθρακα στο λιπαντικό.

Οι κύριες κατηγορίες στερεών σωματιδίων στα λιπαντικά των στροφαλοθαλάμων είναι τα σωματίδια άνθρακα, ή καύσης, και τα μεταλλικά ή σωματίδια λόγω φθοράς. Τα σωματίδια άνθρακα μπορούν να προσδιορισθούν με τη χρήση υπέρυθρης φασματοσκοπίας μετασχηματισμού Fourier

(Fourier transform infra-red spectroscopy / FTIR), μια μέθοδος που είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό της παρουσίας ή μη διαφόρων ανόργανων υλικών συμπεριλαμβανομένων και προϊόντων αντίδρασης (McClelland και Jones, 2001). Το περιεχόμενο σε μεταλλικά σωματίδια μπορεί ποσοτικά να προσδιορισθεί με τη μέθοδο φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης (atomic absorption spectrometry / ICP-AES). Για παράδειγμα (Hunt, 1993). Σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις από τους Truhan και συνεργάτες, η αιθάλη ως διαβρωτικό μέσο, τα μεταλλικά σωματίδια που προκαλούν φθορά, καθώς και τα οξειδωτικά σωματίδια, προκαλούν μικρότερη φθορά λόγω απόξεσης σε σχέση με τα σωματίδια σκόνης διοξειδίου του πυριτίου όταν περιέχονται σε υψηλότερη συγκέντρωση (Truhan et al., 1995).

Γενικά, απόλυτα όρια για τον τύπο, το μέγεθος και τη συγκέντρωση των σωματιδίων που ρυπαίνουν το λιπαντικό της μηχανής δεν μπορούν να οριστούν, καθώς τα όρια είναι πάντα σχετικά με τον τύπο της μηχανής. Ως πρακτικός κανόνας μπορεί να οριστεί ότι σε όλα τα συστήματα λίπανσης το μέγεθος των σωματιδίων θα πρέπει να παραμένει αρκετά κάτω από το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης σε οποιοδήποτε λιπαντικό μηχανισμό και, βεβαίως, αυτή η θεώρηση έχει εφαρμογή και στις μηχανές. Η ονομαστική τιμή συγκράτησης σωματιδίων στα φίλτρα των συστημάτων λίπανσης σε συνήθεις εφαρμογές είναι της τάξης των 15-20 μm.



Υγροί ή διαλυμένοι ρύποι και προϊόντα οξείδωσης του λιπαντικού

Οι υγροί ρύποι των λιπαντικών μπορούν να εμφανιστούν για πολλούς λόγους, δηλαδή λόγω των καταλοίπων ή των προϊόντων της καύσης, λόγω συμπύκνωσης των υδρατμών ή λόγω παρουσίας προϊόντων οξείδωσης στο λιπαντικό. Οι υγροί ρύποι των λιπαντικών τείνουν να μειώσουν το ιξώδες του λιπαντικού ή / και να προκαλούν διάβρωση των επιφανειών λίπανσης. Η επίδραση των όξινων ρύπων μπορεί να υποβαθμιστεί μέσω ουδετεροποίησης, δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα περισσότερο βασικό λιπαντικό στις περιπτώσεις όπου αναμένεται να εμφανιστούν όξινα προϊόντα καύσης. Οι περισσότεροι υγροί ή διαλυμένοι ρύποι είναι πολύ δύσκολο να διαχωριστούν με μηχανικό τρόπο από το λιπαντικό και εξαίρεση σε αυτό τον κανόνα αποτελεί το νερό.

Τα καρβοξυλικά οξέα και άλλα προϊόντα αντίδρασης ως αποτέλεσμα της οξείδωσης του λιπαντικού μπορούν να προσδιορισθούν και να ποσοτικοποιηθούν με τη χρήση υπέρυθρης φασματοσκοπίας μετασχηματισμού Fourier (Fourier transform infra-red spectroscopy / FTIR). Ο ολικός αριθμός οξέων (total acid number / TAN) ή ο ολικός αριθμός βάσεων (total base number / TBN), είναι αριθμοί που δείχνουν την ολική επίδραση των όξινων και βασικών προϊόντων που υπάρχουν στο λιπαντικό αντίστοιχα και μπορούν να προσδιορισθούν με τις τυποποιημένες μεθόδους ASTM D663, D664 και D974 (Dong et al., 2000). Το περιεχόμενο σε νερό μπορεί να προσδιορισθεί για παράδειγμα με τη μέθοδο Karl Fischer (DIN 51 777).

Ο όγκος του λιπαντικού που είναι παγιδευμένος μεταξύ των ελατηρίων συμπίεσης του εμβόλου είναι περισσότερο ακάθαρτος από το συνολικό όγκο του λιπαντικού στον κινητήρα. Αυτό προκύπτει ως φυσική συνέπεια της παρουσίας καυσίμου, υδρατμών και άλλων προϊόντων καύσης στο θάλαμο καύσης της μηχανής. Το φαινόμενο αυτό έχει λάβει ακόμη χειρότερες διαστάσεις λόγω των αυστηρών προδιαγραφών εκπομπών ρύπων, που απαιτούν μικρότερες ποσότητες λιπαντικού στις επιφάνειες του χιτωνίου του κυλίνδρου και μεγαλύτερο χρόνο παραμονής του λιπαντικού μεταξύ των ελατηρίων συμπίεσης. Η κακή ποιότητα του λιπαντικού μεταξύ των ελατηρίων συμπίεσης θα

πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν γίνεται εκτίμηση των τριβολογικών συνθηκών κάτω από τις οποίες λειτουργούν τα ελατήρια του εμβόλου (Fox, 1996, Moritani και Nozawa, 1999, Gamble et al., 2001).

Οι Fox και συνεργάτες έχουν επαληθεύσει πειραματικά ότι η σύνθεση του λιπαντικού που βρίσκεται παγιδευμένο εντός των ελατηρίων συμπίεσης είναι πολύ διαφορετική από αυτή του λιπαντικού που βρίσκεται σε κυκλοφορία στον υπόλοιπο χώρο της μηχανής. Τα ευρήματα της εργασίας τους δείχνουν ότι το λιπαντικό υπόκειται σε σημαντική διάλυση από το καύσιμο και τα συμπυκνώματα υδρατμών κατά την ψυχρή εκκίνηση και κατά τη διάρκεια της προθέρμανσης της μηχανής, που οδηγεί σε κατακερματισμό του λιπαντικού σε διάφορες υγρές και στερεές φάσεις, μείωση του βασικού του αριθμού, μείωση της αντιοξειδωτικής του συμπεριφοράς, αλλαγές των ιδιοτήτων ιξώδους και ακατάλληλη λίπανση των ελατηρίων συμπίεσης (Fox, 1996, Fox et al., 1997, Dato και Fox, 2002).

7.1.4 Σχηματισμός αποθέσεων άνθρακα - Ελατήριο αποθέσεων άνθρακα

Ο σχηματισμός αποθέσεων άνθρακα στην περιοχή της κεφαλής (**crown land** /Εικ. 7.2) μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό εξανθρακωμάτων που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του κυλίνδρου και οδηγεί σε λείανση της εσωτερικής επιφάνειάς του. Με την εξέλιξη του φαινομένου παρατηρείται τοπική λείανση της επιφάνειας του κυλίνδρου και αυξημένη κατανάλωση λιπαντικού.

Σε κάποιες εφαρμογές κινητήρων ο κίνδυνος της λείανσης της εσωτερικής επιφάνειας του κυλίνδρου λόγω του σχηματισμού αποθέσεων άνθρακα μπορεί να παρεμποδιστεί με την χρήση ενός ιδιαίτερου τύπου για το πρώτο ελατήριο (**Εικ. 7.2**) που αποτρέπει το σχηματισμό αποθέσεων άνθρακα (anti-polishing ring). Αυτό το ελατήριο περιορίζει το πάχος των αποθέσεων άνθρακα στην περιοχή της κεφαλής (**crown land** /Εικ. 7.2) και έτσι μειώνει την επαφή μεταξύ του χιτωνίου του κυλίνδρου και της περιοχής της κεφαλής του εμβόλου (Amoser, 2001, Geist and Barrow, 2001). Τα αποτελέσματα αυτής της πρακτικής σε πετρελαιομηχανές μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία (Demmerle et al., 2001).

7.2 Συνθήκες λίπανσης, φορτίο, ταχύτητα, ιξώδες και επιφανειακά φαινόμενα

Η περιοχή μεταξύ των ελατηρίων συμπίεσης υπόκειται σε διάφορες συνθήκες λίπανσης ανάλογα με τη στιγμιαία ταχύτητα, το φορτίο και τις διάφορες μεταβολές της τοπικής τραχύτητας, καθώς και σε μεταβολές της τροφοδοσίας του λιπαντικού. Οι επιθυμητές συνθήκες λίπανσης είναι αυτές κατά τις οποίες έχουμε πλήρη διαβροχή των ελατηρίων, καθώς σε αυτή την περίπτωση η φθορά των επιφανειών είναι αμελητέα. Βέβαια, αυτό είναι αδύνατο να επιτευχθεί με τις σημερινές απαιτήσεις μας σε υποδύναμη των μηχανών. Η υψηλή πίεση των αερίων της καύσης και οι ταχύτητες του εμβόλου ξεπερνούν τις βέλτιστες τιμές ως προς τη λίπανση της μηχανής. Επομένως, στην περιοχή των ελατηρίων η λίπανση είναι κυρίως μικτή και οριακή. Η μεταφορά του λιπαντικού στα ελατήρια στην περιοχή της μικτής λίπανσης είναι λίγο ή πολύ ανεπαρκής. Για παράδειγμα, η υψηλή πίεση των αερίων καύσης μπορεί να διαρρήξει τη συνέχεια της μεμβράνης του λιπαντικού. Οι διάφορες καταστάσεις λίπανσης περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- Συνθήκες πλήρους διαβροχής των ελατηρίων συμπίεσης: Το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού καλύπτει πλήρως ολόκληρη την επιφάνεια στην περιοχή των ελατηρίων συμπίεσης. Τα φορτία παραλαμβάνονται αποκλειστικά από τη μεμβράνη του λιπαντικού. Τέτοιες συνθήκες παρατηρούνται όταν η ταχύτητα ολίσθησης των ελατηρίων του εμβόλου είναι μεγάλη και όταν στην πίσω πλευρά του ελατηρίου επενεργεί μικρή πίεση, συνθήκες που είναι συνήθεις στο μεσοδιάστημα της κίνησης του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ ή αντίστροφα.
- Συνθήκες μερικής διαβροχής των ελατηρίων συμπίεσης: Μόνο ένα μέρος των ελατηρίων διαβρέχεται από το λιπαντικό. Σε αυτή την περιοχή ένα μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται από τη μεμβράνη του λιπαντικού, ενώ το υπόλοιπο μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται από την τραχύτητα των επιφανειών και τις δυνάμεις των αερίων της καύσης. Αυτές οι συνθήκες παρατηρούνται στις θέσεις των νεκρών σημείων όπου η ταχύτητα του εμβόλου είναι η μικρότερη δυνατή και η πίεση στην πίσω πλευρά του ελατηρίου είναι μεγάλη.
- Συνθήκες μηδενικής διαβροχής των ελατηρίων συμπίεσης: Η διαθεσιμότητα του λιπαντικού στο χιτώνιο είναι η ελάχιστη δυνατή. Το λιπαντικό αναγκάζεται να κινηθεί μακριά από την περιοχή των ελατηρίων συμπίεσης κυρίως λόγω της αναποτελεσματικής τροφοδοσίας λιπαντικού στην περιοχή αυτή ή / και λόγω μεγάλης πίεσης που εφαρμόζεται στο ελατήριο. Η αύξηση της ταχύτητας του εμβόλου αυξάνει και το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού, Ωστόσο, μετά από κάποια τιμή της ταχύτητας η μεμβράνη δε μπορεί να διατηρήσει το πάχος της.



Επίδραση του ιξώδους

Η επίδραση του ιξώδους του λιπαντικού στην τριβολογική συμπεριφορά των ελατηρίων του εμβόλου έχει μελετηθεί από τους Durga και συνεργάτες (Durga et al., 1998). Το ιξώδες του λιπαντικού επηρεάζει την τιμή της τριβής κάτω από συνθήκες καθαρά υδροδυναμικής λίπανσης όταν τα ελατήρια διαβρέχονται πλήρως από το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού. Υψηλότερες τιμές τριβής παρατηρούνται με υψηλότερες τιμές ιξώδους. Μια ελαφρά αύξηση της τριβής, που παρατηρείται στο μεσοδιάστημα της κίνησης του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ ή αντίστροφα, φαίνεται ότι μπορεί να οφείλεται μερικώς σε διάτμηση στρωμάτων λιπαντικού λόγω αυξημένης ταχύτητας. Τα ελατήρια υπόκεινται σε υψηλή επιφανειακή πίεση στο μεσοδιάστημα της κίνησης του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ ή αντίστροφα που με τη σειρά της οδηγεί σε συνθήκες μηδενικής διαβροχής και συνεπαγόμενη αύξηση του συντελεστή τριβής.



Επίδραση της τραχύτητας και του ανάγλυφου των τριβόμενων επιφανειών

Η τραχύτητα και η υφή ή το ανάγλυφο των τριβόμενων επιφανειών έχουν σημαντική επίδραση στην τριβή στην οποία υπόκεινται τα ελατήρια συμπίεσης. Οι Sui και Ariga έχουν μελετήσει την επίδραση του ανάγλυφου της επιφάνειας στο πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού και στην τριβή των ελατηρίων. Το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού στο πρώτο ελατήριο δεν επηρεάζεται σημαντικά από το ανάγλυφο της επιφάνειας και γι' αυτό το λόγο οι μεταβολές στην τιμή της τριβής είναι αμελητέες. Το δεύτερο ελατήριο και τα ελατήρια λαδιού, παρουσιάζουν μεταβολές στην τριβή ανάλογα με τη διεύθυνση της υφής της επιφάνειας του κυλίνδρου. Οι διαμήκεις γραμμώσεις της επιφάνειας προκαλούν μεγαλύτερη τριβή σε σχέση με τις εγκάρσιες γραμμώσεις που προκαλούν

μικρότερη τριβή. Η επίδραση του ανάγλυφου ή της υψής της επιφάνειας στην τιμή της τριβής παρατηρείται κάτω από συνθήκες μικτής ή οριακής λίπανσης, όπου έχουμε επαφή μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών. Οι Sui και Ariga συμπέραναν ότι στις περιπτώσεις όπου η τραχύτητα της επιφάνειας δε μπορεί να μειωθεί στο επιθυμητό επίπεδο, θα πρέπει να γίνει βελτιστοποίηση της διεύθυνσης των γραμμώσεων της επιφάνειας (Sui και Ariga, 1993).

Η κατεργασία του χιτωνίου του κυλίνδρου σε σταυρωτή διάταξη έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει την υδροδυναμική λίπανση των ελατηρίων (Michail και Barber, 1995). Οι Hu και συνεργάτες μελέτησαν την επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας και τους παράγοντες που καθορίζουν τη ροή του λιπαντικού. Μοντελοποίησαν την επιφανειακή πίεση και την κλίση του ελατηρίου. Ως αποτέλεσμα, έδειξαν ότι το ανάγλυφο των επιφανειών και η κατανομή του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού μεταξύ του χιτωνίου του κυλίνδρου και των ελατηρίων του εμβόλου δεν είναι συμμετρικά. Οι μικρο-μεταβολές του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού προκαλούνται από ακατάλληλο σχεδιασμό των ελατηρίων, στατική παραμόρφωση του χιτωνίου του κυλίνδρου και δυναμικά φορτία στα ελατήρια του εμβόλου (Hu et al., 1994).

7.2.1 Υπολογισμός του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού

Υπάρχουν πάρα πολλά θεωρητικά μοντέλα σχετικά με τη λίπανση των ελατηρίων εμβόλου. Το κοινό σημείο σε όλα αυτά τα μοντέλα είναι η εξίσωση Reynolds. Η εξίσωση Reynolds περιέχει παραμέτρους του ιξώδους λιπαντικού, της γεωμετρίας, της πίεσης και της σχετικής ταχύτητας των επιφανειών. Η εξίσωση μπορεί να επιλυθεί ως προς την κατανομή της πίεσης, του φορτίου, της δύναμης τριβής και της ροής του λιπαντικού.

Οι υπολογισμοί για το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού συμπεριλαμβάνουν πολλά είδη λίπανσης. Τα είδη αυτά είναι υδροδυναμική, μικτή και οριακή λίπανση. Επιπροσθέτως, αναφέρεται η ελαστο-υδροδυναμική λίπανση που κατά περίπτωση θεωρείται ως επέκταση της υδροδυναμικής. Διάφορα μοντέλα λίπανσης έχουν αναπτυχθεί για μελέτη με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και προγραμμάτων προσομοίωσης.

Η πλήρης υδροδυναμική λίπανση συμβαίνει όταν δεν υπάρχει επαφή των τραχυτήτων των λιπαινόμενων επιφανειών. Αυτό είναι δυνατό στο μεσοδιάστημα της κίνησης του εμβόλου από το ANΣ στο ΚΝΣ ή, διαφορετικά, όταν η σχετική επιφανειακή ταχύτητα είναι μέγιστη. Η πλήρης υδροδυναμική λίπανση απαιτεί την πλήρη διαβροχή της περιοχής των ελατηρίων έτσι ώστε να υπάρχει πάντα αρκετό λιπαντικό μεταξύ της επιφάνειας του χιτωνίου και των ελατηρίων ώστε να μην εμφανιστεί επαφή των τραχυτήτων τους. Οι συνθήκες λίπανσης στο μεσοδιάστημα της κίνησης του εμβόλου από το ANΣ στο ΚΝΣ ή αντίστροφα είναι συνήθως υδροδυναμικού χαρακτήρα όσο υπάρχει αρκετή ποσότητα λιπαντικού μπροστά από την ακμή του ελατηρίου. Ωστόσο, κοντά στα νεκρά σημεία του κύκλου του εμβόλου παρατηρείται μικτή λίπανση. Πειραματικά αποτελέσματα από τους Han και Lee κατέδειξαν ότι η επιφάνεια επαφής του ελατηρίου δεν είναι πλήρως λιπασμένη, δηλαδή έχουμε συνθήκες μερικής ή μηδενικής διαβροχής. Συνεπώς, η οριακή συνθήκη Reynolds δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την περίπτωση. Οι Ma και συνεργάτες σύγκριναν δύο διαφορετικά μοντέλα λίπανσης, ένα μοντέλο πλήρους διαβροχής και ένα μοντέλο που χαρακτηρίζεται από τη συνέχεια της ροής του λιπαντικού. Στο πρώτο μοντέλο τα ελατήρια του εμβόλου θεωρείται ότι διαθέτουν επαρκή ποσότητα λιπαντικού, ενώ στο δεύτερο μοντέλο το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού του προηγούμενου ελατηρίου λαμβάνεται ως το διαθέσιμο πάχος

μεμβράνης του λιπαντικού του επόμενου ελατηρίου. Το συμπέρασμα της μελέτης ήταν ότι το 10–40 % της μετωπικής επιφάνειας του ελατηρίου είναι καλυμμένη με μεμβράνη λιπαντικού. Συνεπώς, το δεύτερο αυτό μοντέλο φαίνεται ότι θα πρέπει να προτιμάται σε σχέση με το πρώτο (Ma et al., 1997a).

Όταν η σχετική ταχύτητα των επιφανειών μειώνεται, το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού που χωρίζει τις λιπαινόμενες επιφάνειες επίσης μειώνεται. Η επαφή των κορυφών των τραχυτήτων μπορεί να παρατηρηθεί αν το πάχος της μεμβράνης γίνει αρκετά μικρό. Η οριακή τιμή του πάχους της μεμβράνης για την περίπτωση μικτής λίπανσης του μοντέλου μπορεί να προσδιορισθεί με πολλούς τρόπους, αλλά εξαρτάται πάντοτε από την τραχύτητα των λιπαινόμενων επιφανειών.

Οριακή λίπανση παρατηρείται όταν η επαφή μεταξύ των λιπαινόμενων επιφανειών είναι συνεχής. Το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού μειώνεται σε τέτοιο σημείο, ώστε το λιπαντικό να λιπαίνει μόνο μεταξύ των κορυφών και των εσοχών των τραχυτήτων των λιπαινόμενων επιφανειών, ενώ το φορτίο παραλαμβάνεται από τις κορυφές των τραχυτήτων και όχι από τη μεμβράνη του λιπαντικού.

Στην υδροδυναμική λίπανση, όπου η πίεση είναι υψηλή, οι επιφάνειες αρχίζουν να παραμορφώνονται ελαστικά ανάλογα με την ασκούμενη πίεση. Κατά την διάρκεια αυτής της ελαστο-υδροδυναμικής λειτουργίας, οι επιφάνειες πλησιάζουν περισσότερο απ' ό,τι επιτρέπεται από τις ανοχές της κατασκευής και η ελαστικότητα των επιφανειών αλληλεπιδρά με το λιπαντικό ή με την πίεση του λιπαντικού. Ελαστο-υδροδυναμική λειτουργία των ελατηρίων του εμβόλου παρατηρείται σε όλες τις μηχανές εσωτερικής καύσης κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτόνωσης όπου τα φορτία πιέσεων είναι υψηλά.

Τα μοντέλα προσομοίωσης των ελατηρίων του εμβόλου περιλαμβάνουν ένα πλήθος διαφορετικών καταστάσεων που περιέχονται στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός ελατηρίου επάνω στο χιτώνιο. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά εξαιρούνται από συγκεκριμένα μοντέλα, καθώς δεν θεωρούνται σημαντικά για το σκοπό για τον οποίο τα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί. Άλλα χαρακτηριστικά θεωρούνται ιδιαίτερος πολύπλοκα στην εφαρμογή τους, ενώ, τέλος, υπάρχουν κι εκείνα των οποίων η προσομοίωση απαιτεί πάρα πολύ μεγάλο χρόνο υπολογισμών. Όλα σχεδόν τα υδροδυναμικά μοντέλα λίπανσης υπολογίζουν την τιμή της πίεσης της μεμβράνης του λιπαντικού ώστε να προσδιορισθεί πειραματικά και να υπάρχουν στοιχεία. Το ελατήριο και η επιφάνεια του χιτωνίου μοντελοποιούνται συνήθως σε δύο διαστάσεις και με αυτό τον τρόπο η επαφή τους θεωρείται ομοιόμορφη σε όλη την περίμετρο. Βεβαίως, αυτό δε συμβαίνει σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του ελατηρίου, καθώς στο έμβολο ασκούνται διαφορετικές κάθετες δυνάμεις στις ωστικές πλευρές και στις κάθετες σ' αυτές. Για το λόγο αυτό, τα διάκενα των υποδοχών των ελατηρίων είναι διαφορετικά στις δύο αυτές κατευθύνσεις γιατί το έμβολο πιέζεται προς την ωστική πλευρά του κυλίνδρου. Σχετικά με τις κλίσεις του εμβόλου πληροφορίες παρατίθεται στην **Εικ. 5.6**.

Η δισδιάστατη μελέτη αγνοεί οποιεσδήποτε μεταβολές μεγεθών στην περιφερειακή διεύθυνση. Από την άλλη, στην τρισδιάστατη μελέτη του προβλήματος καταναλώνονται σημαντικά ποσά υπολογιστικών πόρων και υπολογιστικού χρόνου, σε σχέση με τη δισδιάστατη μελέτη. Σε οποιοδήποτε μοντέλο σχετικό με τη μεμβράνη του λιπαντικού θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως είναι η επάρκεια του λιπαντικού μεταξύ των ελατηρίων, οι ιδιότητες του λιπαντικού, η ακτινική τάση του ελατηρίου, η πίεση των αερίων της καύσης, το προφίλ του

προσώπου των ελατηρίων, η ταχύτητα της μηχανής, οι θερμοκρασίες της επιφάνειας του κυλίνδρου και των επιφανειών του εμβόλου μεταξύ των ελατηρίων και το ανάγλυφο των λιπαινόμενων επιφανειών (Tian et al., 1996). Σχετικοί υπολογισμοί και μετρήσεις από τους Richardson και Borman έχουν δείξει ότι το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού του ελατηρίου λαδιού διαφέρει σημαντικά από θεωρητικούς υπολογισμούς κατά τους χρόνους στους οποίους το έμβολο κινείται από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ. Το μετρούμενο πάχος της μεμβράνης είναι μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίζεται μέσω θεωρητικών μοντέλων. Ο λόγος για αυτή τη διαφορά εντοπίζεται στην πλεονάζουσα ποσότητα λιπαντικού που μεταφέρεται από την ποδιά του εμβόλου και την κάθετη προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου κίνηση του εμβόλου (**piston slap-motion**). Αυτοί οι παράγοντες παρεμποδίζουν το ελατήριο λαδιού να εφάπτεται στο προφίλ της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου με αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού (Richardson και Borman, 1992). Το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού κοντά στο ελατήριο λαδιού αυξάνεται όταν η ελαστική τάση του ελατηρίου μειώνεται. Επίσης, το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού μειώνεται όταν το πάχος του ελατηρίου μειώνεται αντίστοιχα (Seki et al., 2000).

Τα μοντέλα διαφέρουν ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης της ροής του λιπαντικού προς την επαφή ελατηρίου και επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου. Η μεμβράνη του λιπαντικού μπροστά από το ελατήριο μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει σταθερό πάχος. Ένα μοντέλο κατά το οποίο το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού του προηγούμενου ελατηρίου λαμβάνεται ως το διαθέσιμο πάχος μεμβράνης του λιπαντικού του επόμενου ελατηρίου είναι πιο ρεαλιστικό. Βέβαια, ούτε αυτή η προσέγγιση ανταποκρίνεται πλήρως στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς η μεμβράνη του λιπαντικού είναι σε συνεχή αλληλεπίδραση με τις επιφάνειες του εμβόλου μεταξύ των ελατηρίων συμπίεσης.

Οι Akalin και Newaz έχουν αναπτύξει ένα αξονο-συμμετρικό, υδροδυναμικό, μικτό μοντέλο λίπανσης προκειμένου να προσομοιώσουν τα τριβολογικά φαινόμενα και την επαφή μεταξύ του ελατηρίου του εμβόλου και της επιφάνειας του χιτωνίου. Η προσομοίωσή τους έδειξε ότι η περιοχή της υδροδυναμικής λίπανσης σημειώνεται στο μεγαλύτερο μέρος κάθε χρόνου του εμβόλου. Ωστόσο, ο συντελεστής τριβής φαίνεται να αυξάνεται στο ΑΝΣ και στο ΚΝΣ, καθώς η μικτή λίπανση είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός λίπανσης σε αυτά τα σημεία της διαδρομής του εμβόλου. Οι ερευνητές συνέκριναν τα αποτελέσματα αυτά που προέκυψαν από προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με πειραματικά και είδαν ότι υπήρξε ικανοποιητική ταύτιση των τιμών του συντελεστή τριβής (Akalin και Newaz, 2001). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία, η επιφανειακή τραχύτητα και η ταχύτητα του εμβόλου είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι, καθώς επηρεάζουν καθολικά το είδος του μηχανισμού λίπανσης. Η επίδραση του κάθετου φορτίου στο συντελεστή τριβής κατά την περίοδο όπου παρατηρήθηκε μικτή λίπανση ήταν μικρή.

Για τους υπολογισμούς του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού πρέπει να γίνονται ορισμένες παραδοχές, ώστε να διατηρηθεί το μέγεθος του μοντέλου εντός λογικών ορίων. Το λιπαντικό υγρό θεωρείται συνήθως ως Νευτώνειο ρευστό, ενώ περισσότερα πολύπλοκα μοντέλα εμπεριέχουν και χαρακτηριστικά διάτμησης του λιπαντικού (Tian et al., 1996). Κάποια μοντέλα λίπανσης υποθέτουν ότι το ιξώδες είναι σταθερό μεταξύ της επιφάνειας επαφής του ελατηρίου και της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου. Οι Richardson και Borman θεώρησαν ότι το ιξώδες δεν παραμένει σταθερό, αλλά μεταβάλλεται στο δικό τους μοντέλο (Richardson και Borman, 1992).

Η υδροδυναμική κατανομή της πίεσης υπολογίζεται από τις υδροδυναμικές εξισώσεις, αλλά είναι ακόμη απαραίτητος ο καθορισμός της πίεσης με την προσθήκη οριακών συνθηκών στο πρόβλημα. Η πίεση του λιπαντικού μπροστά και πίσω από το ελατήριο λαμβάνεται ως ίση με την πίεση των αερίων μπροστά και πίσω από το ελατήριο αντίστοιχα. Στην εμπρός πλευρά του ελατηρίου, το υπάρχον λιπαντικό στο χιτώνιο είτε διέρχεται κάτω από το ελατήριο είτε συσσωρεύεται μπροστά από το ελατήριο. Αν η ποσότητα του λιπαντικού που συσσωρεύεται μειωθεί αρκετά, τότε παρατηρούνται συνθήκες μηδενικής διαβροχής του ελατηρίου. Αυτό σημαίνει ότι η μεμβράνη του λιπαντικού που στηρίζει το ελατήριο παραλαμβάνει μικρότερο φορτίο σε σχέση με κάποιο ελατήριο που βρίσκεται υπό συνθήκες πλήρους διαβροχής. Μεταξύ της εμπρόσθιας ακμής του ελατηρίου και του χιτωνίου του κυλίνδρου δεν θα υπάρχει πλέον μεμβράνη λιπαντικού. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να «μεταφραστεί» αυτή η οριακή συνθήκη στη γλώσσα των υπολογιστικών μοντέλων (Richardson και Borman, 1992).



Οριακές συνθήκες κατά την προσομοίωση της μεμβράνης του λιπαντικού

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση του μηχανισμού λίπανσης είναι διάφορες. Η κριτική που δέχονται κάποια μοντέλα έγκειται στα μη αξιόπιστα αποτελέσματα που παράγουν λόγω κάποιων παραδοχών που γίνονται. Η συνθήκη Sommerfeld επιτρέπει τόσο τις θετικές όσο και τις αρνητικές τιμές πίεσης. Η συνθήκη Half-Sommerfeld ορίζει ως μηδενικές όλες τις αρνητικές τιμές της πίεσης και αυτό χαρακτηρίζεται ως περιοχή σπηλαίωσης. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που διατηρούν σταθερό το ισοζύγιο μάζας, ώστε να συμπεριλάβουν την επίδραση των περιοχών σπηλαίωσης στην επάρκεια και τη ροή του λιπαντικού.



Παραμόρφωση της επιφάνειας του κυλίνδρου σε μοντέλα λίπανσης

Η παραμόρφωση της επιφάνειας του κυλίνδρου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κίνηση του ελατηρίου του εμβόλου και συγκεκριμένα στον τρόπο με τον οποίο το ελατήριο «ακολουθεί» κατά τη κίνησή του το ανάγλυφο της επιφάνειας του κυλίνδρου. Η παραμόρφωση του κυλίνδρου επηρεάζει την επαφή μεταξύ του εμβόλου και της επιφάνειας του χιτωνίου και, συνεπαγόμενα, το φαινόμενο διαφυγής που δεν είναι τίποτε άλλο από τη διαρροή καυσίμου μίγματος και καυσαερίων προς την περιοχή του στροφαλοθαλάμου και, αντίστροφα, διαρροή λιπαντικού προς το χώρο καύσης. Όσο αυξάνεται η παραμόρφωση του κυλίνδρου το φαινόμενο εντείνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης του λιπαντικού και των επιβλαβών εκπομπών των καυσαερίων. Επομένως, είναι σημαντικό να συμπεριληφθεί η παραμόρφωση του κυλίνδρου στα διάφορα υπολογιστικά μοντέλα λίπανσης. Οι Loenne και Ziemba πρότειναν ότι η παραμόρφωση του κυλίνδρου μπορεί να περιγραφεί από σύνθεση άπειρων όρων σειράς Fourier (Loenne, 1972, Loenne και Ziemba, 1988). Αυτή η παραδοχή της παραμόρφωσης της επιφάνειας του κυλίνδρου έχει επίσης εφαρμοστεί από τους Ma και συνεργάτες, οι οποίοι υπέθεσαν ότι η παραμόρφωση υφίσταται μόνο στην περιφερειακή διεύθυνση και όχι στην αξονική διεύθυνση του κυλίνδρου. Επιπλέον, κατέδειξαν ότι η παραμόρφωση του κυλίνδρου είναι, κατά κάποιο τρόπο, επιθυμητή καθώς μπορεί να μειώσει τις δυνάμεις τριβής στα ελατήρια συμπίεσης (Ma et al., 1997b). Στο ANS, η πίεση λόγω της καύσης και συνεπαγόμενα η πίεση που ενεργεί στην πίσω πλευρά του πρώτου ελατηρίου είναι τόσο υψηλή που και μεγάλες παραμορφώσεις του κυλίνδρου «διορθώνονται» από την ικανότητα του πρώτου ελατηρίου να ακολουθεί το ανάγλυφο της επιφάνειας του κυλίνδρου κατά την κίνησή του (ελαστικότητα). Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η μεγάλη παραμόρφωση του κυλίνδρου δεν επιτείνει

το φαινόμενο διαφυγής. Οι προσομοιώσεις σχετικά με την τριβή παρατίθενται αναλυτικότερα στην παράγραφο 8.1.2.

7.2.2 Μετρήσεις του πάχους της μεμβράνης λιπαντικού

Το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού σε κάθε ένα από τα ελατήρια του εμβόλου συνδέεται στενά με την κατανάλωση λιπαντικού, τις απώλειες λόγω τριβής που εμφανίζονται κατά την κίνηση του εμβόλου και το «άρπαγμα» που εμφανίζεται στον κύλινδρο της μηχανής. Είναι σημαντική η μελέτη της επίδρασης μεμονωμένων παραγόντων ή παραμέτρων, όπως είναι η ταχύτητα της μηχανής, το ιξώδες του λιπαντικού και το προφίλ της επιφάνειας επαφής του ελατηρίου, στη μεμβράνη του λιπαντικού μέσω πρότυπων κινητήρων. Ωστόσο, προκειμένου να κατανοηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των συνθηκών λειτουργίας της μηχανής, του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού και περαιτέρω φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την επαφή των επιφανειών με το λιπαντικό, το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού συγκεκριμένης μηχανής πρέπει να μετρηθεί σε πρότυπους κινητήρες λειτουργίας με καύση (**firing engines**) (Takiguchi et al., 2000).

Αρκετοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει πρότυπες μηχανές και έχουν αποδείξει ότι το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της ταχύτητας της μηχανής ή του ιξώδους του λιπαντικού και περισσότερο ακόμη με τη μείωση του φορτίου (μέσης πίεσης κυλίνδρου) ή της θερμοκρασίας. Βέβαια, τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί δεν ακολουθούν πλήρως τα θεωρητικά μοντέλα. Ο βαθμός επίδρασης αυτών των παραγόντων είναι διαφορετικός και η αλληλεπίδρασή τους σε κινητήρες με καύση (**firing engines**) έχει σοβαρές επιπτώσεις στο πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού (Richardson και Borman, 1992, Dearlove και Cheng, 1995, Shenghua et al., 1996, Harigaya et al., 2000).

Το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού κάτω από τα ελατήρια του εμβόλου όπως έχει μετρηθεί από αρκετούς ερευνητές σε πρότυπους κινητήρες ανάφλεξης (**firing engines**) ή και κινητήρες οχημάτων έχει πινακοποιηθεί στη μελέτη των Grice και συνεργάτες. Το ελάχιστο πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού που παρουσιάζεται στους πίνακες μεταβάλλεται από 0 μm έως 12 μm και το μέγιστο πάχος από 2.5 μm έως 24 μm (Grice et al., 1990).

Το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού μπορεί να υπολογιστεί μέσω της μέτρησης της απόστασης μεταξύ των ελατηρίων συμπίεσης και του κυλίνδρου με κοινούς χωρητικούς, επαγωγικούς και μαγνητικούς αισθητήρες ή αισθητήρες των οποίων η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο φαινόμενο **Hall (Hall-principle)** (Josef and Merker, 1998). Η μέθοδος φθορισμού μέσω ακτίνων laser (laser-induced fluorescence technique / LIF) χρησιμοποιείται πιο συχνά για τη μέτρηση του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού (Frølund and Schramm, 1997). Οι μετρήσεις του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού σε κινητήρες ανάφλεξης (**firing engines**) είναι πολύ δύσκολες και απαιτητικές, με υψηλές απαιτήσεις και περιορισμούς στις παραμέτρους που θα πρέπει να καθορισθούν για την διεξαγωγή της μέτρησης και στις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής. Τέτοιου είδους μετρήσεις παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία (Moore, 1993, 1995, 1998, Eilts και Wachtmeister, 1993, Barrow et al., 1995, Frølund και Schramm, 1997, Josef και Merker, 1998, Nakayama et al., 1998).

Οι Arcoumanis και συνεργάτες έχουν κατασκευάσει μια παλινδρομική διάταξη για τη μελέτη της λίπανσης στον κινητήρα, στην οποία η κάθετη δύναμη μεταβάλλεται μαζί με το εφαρμοζόμενο φορτίο, η θέση του ελατηρίου του εμβόλου αλλάζει ανάλογα με την κίνηση του εμβόλου κατά τη διάρκεια του κύκλου. Οι μετρήσεις του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού δείχνουν ότι οι ελάχιστες τιμές είναι της τάξης των 1–2 μm ακριβώς μετά τα ΑΝΣ και ΚΝΣ, ενώ οι μέγιστες τιμές των 5–11 μm παρουσιάζονται στο μέσον της διαδρομής του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ και αντίστροφα (Arcoumanis et al., 1995).

Ο Mattsson (Mattsson, 1995) διεξήγαγε μετρήσεις σε κινητήρα Scania DSC9, άμεσου ψεκασμού, υπερτροφοδοτούμενο, εξακύλινδρο, με διάμετρο κυλίνδρου 115 mm και διαδρομή εμβόλου 136 mm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού ανάμεσα στην επιφάνεια του χιτωνίου του κυλίνδρου και το δεύτερο ελατήριο του εμβόλου, στην ωστική πλευρά του εμβόλου ήταν από 4,5 έως 5 μm, όταν η μηχανή λειτουργούσε υπό χαμηλές στροφές. Με την αύξηση των στροφών στις 1.000 και 1.500 rpm χωρίς φορτίο το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού βρέθηκε να είναι όχι μεγαλύτερο από 0,5 μm. Μερικά από τα συμπεράσματα της μελέτης μεταξύ άλλων ήταν:

- το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της ταχύτητας, ειδικά κατά το χρόνο της συμπίεσης,
- κατά τη λειτουργία της μηχανής στο «ρελαντί» το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού στο πρώτο ελατήριο αυξάνεται κατά το χρόνο της εκτόνωσης και
- τα αποτελέσματα προσομοιώσεων και μετρήσεων αναφορικά με το πρώτο ελατήριο και το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού εκεί, είναι σε ικανοποιητική συμφωνία όταν έγιναν αλλαγές στο φορτίο και την ταχύτητα, αλλά οι υπολογιζόμενες τιμές ήταν περίπου 3 με 6 φορές μεγαλύτερες από τις μετρούμενες τιμές για ολόκληρο το εύρος τιμών του φορτίου και της ταχύτητας (Mattsson, 1995).

Σε προηγούμενη εργασία από τους Takiguchi και συνεργάτες, το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού μετρήθηκε και στις δύο ωστικές πλευρές του εμβόλου σε απόσταση 33 mm από το πρώτο ελατήριο συμπίεσης. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένας τετράχρονος, μονοκύλινδρος, ατμοσφαιρικός κινητήρας ντίζελ, άμεσου ψεκασμού, με διάμετρο κυλίνδρου 72 mm και μήκος εμβόλου επίσης 72 mm. Από τα αποτελέσματα προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα για το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού (Takiguchi et al., 1998):

- η τάση που παρατηρείται για αύξηση του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής ή μειώνεται το φορτίο της μηχανής, συχνά αντιστρέφεται. Βρέθηκε ότι η μεταβολή του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού είναι μεγαλύτερη από τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ή του φορτίου. Φάνηκε επίσης ότι, το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού, μεταβάλλεται σημαντικά στους διάφορους χρόνους του εμβόλου και μεταξύ των ωστικών πλευρών και των κάθετων πλευρών σε αυτές (δηλαδή κατά τη διεύθυνση του πείρου του εμβόλου).
- το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού στα ελατήρια συμπίεσης αυξήθηκε σημαντικά στους χρόνους εκτόνωσης και εισαγωγής του καύσιμου μίγματος στην ωστική πλευρά και κατά το χρόνο εισαγωγής του μίγματος στις πλευρές κατά τη διεύθυνση του πείρου. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης ποσότητας του λιπαντικού που παρέχεται από την ποδιά του εμβόλου προς το ελατήριο

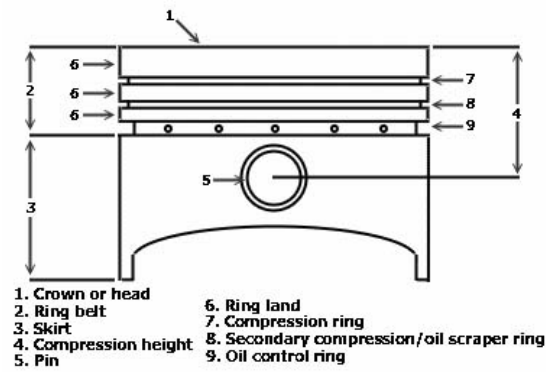
λαδιού κοντά στο ΑΝΣ κατά τους χρόνους συμπίεσης και εξαγωγής των αερίων της καύσης και στις κάθετες πλευρές κοντά στο ΑΝΣ κατά το χρόνο της εξαγωγής των αερίων της καύσης,

- το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού στα ελατήρια κατά τους χρόνους που το έμβολο κινείται από το ΚΝΣ προς το ΑΝΣ είναι μικρότερο σε σχέση με τους χρόνους που έχουν προηγηθεί, ενώ φάνηκε ότι το πάχος έτεινε να γίνει ομοιόμορφο μεταξύ των διαφόρων ελατηρίων. Αυτό θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα της κακής ροής του λιπαντικού προς τα ελατήρια κοντά στο ΚΝΣ και
- το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού στα ελατήρια επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την ποσότητα του παρεχομένου λιπαντικού σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής ή το φορτίο και αυτό ισχύει τόσο για τις ωστικές πλευρές του εμβόλου, όσο και για τις κάθετες σε αυτές. Η ροή και η ποσότητα του λιπαντικού μεταβάλλεται σημαντικά με την κάθετη προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου κίνηση του εμβόλου (**piston slap-motion**).

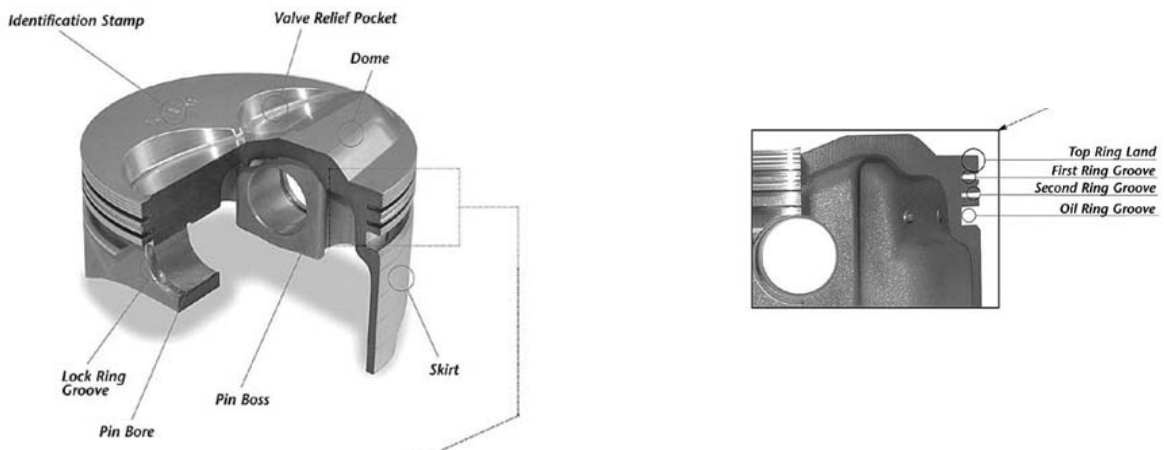
Περαιτέρω μελέτες από τους Takiguchi και συνεργάτες και Seki και συνεργάτες επιβεβαίωσαν τα παραπάνω ευρήματα όσον αφορά στη συμπεριφορά του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού και τόνισαν τη σημαντική επίδραση της κάθετης προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου κίνησης του εμβόλου (**piston slap-motion**) στο πάχος αυτό. (Takiguchi et al., 2000, Seki et al., 2000). Οι ερευνητές επίσης ανέφεραν ότι:

- ένας πιθανός λόγος για την αύξηση του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού στο πρώτο και δεύτερο ελατήριο, τόσο στις ωστικές πλευρές όσο και στις κάθετες πλευρές, κατά τη διάρκεια του χρόνου της εκτόνωσης, είναι η μικρή προσβασιμότητα των αερίων και άρα, η χαμηλότερη πίεση που ενεργεί στην πίσω πλευρά του ελατηρίου σε σχέση με τη πίεση των αερίων που ενεργούν στην επιφάνεια επαφής του ελατηρίου (Takiguchi et al., 2000),
- η επίδραση της τάσης κατά την επαπτομενική διεύθυνση του ελατηρίου λαδιού και του πάχους του ίδιου του ελατηρίου σε σχέση με το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού, φαίνεται να έχει σημασία μόνο στην περιοχή κοντά στο ΑΝΣ. Το πάχος αυξάνεται με τη μείωση της τάσης κατά την επαπτομενική διεύθυνση, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται και το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού και στα δύο υπόλοιπα ελατήρια του εμβόλου (Seki et al., 2000).

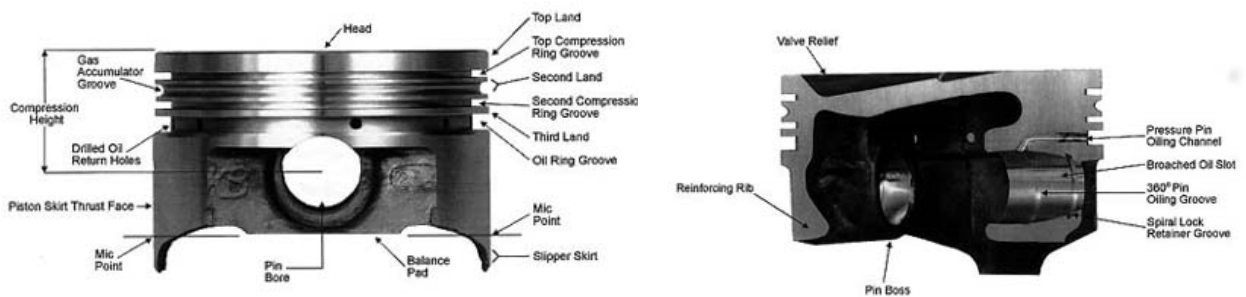
Η μεγάλη σημασία των μετρήσεων του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού στους κινητήρες ανάφλεξης δεν έγκειται μόνο στην αριθμητική τιμή του πάχους. Επιπροσθέτως, είναι θεμελιώδης η ανάγκη αύξησης της γνώσης σχετικά με τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία του εμβόλου και επηρεάζουν τόσο την επαφή μεταξύ των ελατηρίων συμπίεσης και της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου, και, συνεπώς, τη λίπανση των ελατηρίων του εμβόλου.



Εικόνα 7.3α - Σχηματική παράσταση εμβόλου και των λεπτομερειών του (forums.nasioc.com, 2008).



Εικόνα 7.3β - Σχηματική παράσταση εμβόλου και των λεπτομερειών του (forums.nasioc.com, 2008).



Εικόνα 7.3γ - Σχηματική παράσταση εμβόλου και των λεπτομερειών του (forums.nasioc.com, 2008).

8. Τριβή των ελατηρίων και της ποδιάς του εμβόλου έναντι του χιτωνίου του κυλίνδρου

Αυτή η ενότητα καλύπτει διάφορα θέματα σχετικά με το συντελεστή τριβής μεταξύ των ελατηρίων του εμβόλου, της ποδιάς του εμβόλου και της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου αντίστοιχα. Η μελέτη του συντελεστή τριβής μεταξύ των προαναφερόμενων επιφανειών είναι απαραίτητη και σχετική με το θερμικό βαθμό απόδοσης της μηχανής η_E καθώς αυτός εκφράζεται ως

$$\eta_E = \eta_i \cdot \eta_m = \eta_c \cdot \eta_f \cdot \eta_m \quad (8.1)$$

όπου η_i είναι ο ενδεικνύμενος βαθμός απόδοσης, η_m είναι ο μηχανικός βαθμός απόδοσης, η_c είναι ο βαθμός απόδοσης του κύκλου και η_f είναι ο σχετικός βαθμός απόδοσης (Maass, 1979). Οι απώλειες λόγω τριβής αποτελούν μεγάλο μέρος των συνολικών μηχανικών απωλειών και γι' αυτό το λόγο οι απώλειες λόγω τριβής θεωρούνται πολύ σημαντικές ως προς το θερμικό βαθμό απόδοσης ενός κινητήρα.

Οι απώλειες λόγω τριβής μπορούν να εκφραστούν ως προς την πίεση που επικρατεί στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Έτσι, η μέση πίεση τριβής, p_f εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ της ενδεικνύμενης μέσης πίεσης (p_i) και της μέσης πραγματικής πίεσης (p_e) της μηχανής, ως εξής:

$$p_f = p_i - p_e \quad (8.2)$$

8.1 Τριβή των ελατηρίων εμβόλου στην επιφάνεια του χιτωνίου

8.1.1 Θεμελιώδεις αρχές της τριβής των ελατηρίων εμβόλου

Η επαφή ολίσθησης μεταξύ των ελατηρίων του εμβόλου και της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου περιλαμβάνει πολλούς μηχανισμούς τριβής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας της μηχανής. Λόγω διακυμάνσεων στο φορτίο, την ταχύτητα και τα διάφορα επιφανειακά φαινόμενα, οι συνθήκες λίπανσης στην περιοχή επαφής ελατηρίου / κυλίνδρου είναι συνεχώς μεταβαλλόμενες, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στις μεταβολές της τριβολογικής συμπεριφοράς και της συμπεριφοράς σε φθορά των υλικών.

Η τριβή του ελατηρίου επηρεάζεται από το φορτίο που παραλαμβάνει το ελατήριο, τις ιδιότητες της επιφάνειας και τις συνθήκες λίπανσης όπως αυτές καθορίζονται από την ταχύτητα ολίσθησης, το ιξώδες και τη ροή του λιπαντικού στην περιοχή των λιπαινόμενων επιφανειών. Το φορτίο που παραλαμβάνει το ελατήριο αποτελείται από το εφελκυστικό φορτίο με το οποίο προ-φορτίζεται το ελατήριο κατά την εφαρμογή του στο έμβολο και από φορτία λόγω πίεσης των αερίων της καύσης που ασκούνται στην πίσω πλευρά του ελατηρίου. Εφαρμογές των Takiguchi και των συνεργατών του με έμβολα δύο και τριών ελατηρίων έχουν δείξει ότι ο αριθμός των ελατηρίων επηρεάζει την τριβολογική τους συμπεριφορά, αλλά το συνολικό εφελκυστικό φορτίο είναι αυτό που τελικά καθορίζει τις απώλειες τριβής στα ελατήρια (Takiguchi et al., 1996).

Αναφορικά με το διάγραμμα Stribeck, οι συνθήκες λίπανσης στην περιοχή επαφής ελατηρίου / κυλίνδρου εμφανίζουν μεγάλες και απότομες κινήσεις στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος (Taylor, 1998).

Ως μια σύντομη ανασκόπηση των μηχανισμών τριβής σε μια ενεργή επαφή ελατηρίου / κυλίνδρου αναφέρεται ότι ο μηχανισμός τριβής που είναι ενεργός κοντά στα νεκρά σημεία των διαδρομών του εμβόλου είναι ένας συνδυασμός οριακών και μικτών συνθηκών λίπανσης. Επιπλέον, εμφανίζεται μια μείωση του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης ακριβώς στα νεκρά σημεία, ενώ ο μηχανισμός τριβής που είναι ενεργός στο μέσο διάστημα της κίνησης του εμβόλου από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ ή αντίστροφα είναι υδροδυναμικός (Wakuri et al., 1995, Arcoumanis et al., 1997, Durga et al., 1998, Coy, 1998). Η μέγιστη δύναμη τριβής που εμφανίζεται κάτω από οριακές συνθήκες λίπανσης κοντά στο ΑΝΣ, έχει βρεθεί ότι μειώνεται με την αύξηση του ιξώδους, ενώ η πίεση τριβής P_f που επηρεάζεται ισχυρά από τις υδροδυναμικές συνθήκες λίπανσης μεταξύ του ΑΝΣ και του ΚΝΣ, έχει βρεθεί ότι αυξάνει με την αύξηση του ιξώδους του λιπαντικού (Hamatake et al., 2001).

Ο σχηματισμός του λιπαντικού επιδρά ισχυρά στο σχηματισμό των οριακών στρωμάτων στις λιπαινόμενες επιφάνειες. Πρόσθετα που δρουν κατά της φθοράς όπως το ZDDP, πρόσθετα που τροποποιούν το συντελεστή τριβής όπως το MoDTC και ασβεστόχα πρόσθετα που δημιουργούν στρώματα CaCO_3 κατά της φθοράς, ελέγχουν ισχυρά τις συνθήκες τριβής στα οριακά στρώματα. Πρόσφατες μελέτες από ένα μεγάλο αριθμό ερευνητών έχουν δείξει ότι οι οργανικές μολυβδαινούχες ενώσεις, όπως είναι το MoDTC και το διφωσφορικό μολυβδαίνιο (MoDTP) μειώνουν σημαντικά το συντελεστή τριβής κάτω από συνθήκες λίπανσης των οριακών στρωμάτων (Glidewell και Korcek, 1998, Tung και Tsergounis, 2000, Saini et al., 2001, Hamatake et al., 2001, Korcek et al., 2001). Ανάλογη μελέτη από τον Zhang και τους συνεργάτες του έδειξε ότι οι θειούχες οργανικές ενώσεις μολυβδαινίου αποσυντίθενται και σχηματίζουν ολισθηρά στρώματα MoS_2 πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες και σε υψηλές θερμοκρασίες (Zhang et al., 2001).

Η διαθεσιμότητα του λιπαντικού, είτε εξετάζονται συνθήκες πλήρους διαβροχής είτε μηδενικής διαβροχής, καθορίζει τον ακριβή μηχανισμό τριβής στα νεκρά σημεία του κύκλου του εμβόλου και την επίδραση της ελαστο-υδροδυναμικής λίπανσης μεταξύ των νεκρών σημείων. Σε συνδυασμό με την παροχή του λιπαντικού, ο στιγμιαίος μηχανισμός τριβής εξαρτάται από την ταχύτητα, το φορτίο, το πραγματικό ιξώδες του λιπαντικού και τη γεωμετρία της επαφής στην ολίσθηση.

Κάτω από συνθήκες μηδενικής διαβροχής, ο φαιός χυτοσίδηρος προσφέρει μείωση των δυνάμεων τριβής, λόγω της κρυσταλλικής φάσης του γραφίτη που δρα ως στερεό λιπαντικό και ως δεξαμενή λιπαντικού (Glaeser, 1992).

Η τριβολογική συμπεριφορά του εμβόλου, των ελατηρίων του εμβόλου και των επιφανειών του χιτωνίου του κυλίνδρου μπορεί να εκφραστεί με πολλούς τρόπους, ανάλογα με το σκοπό της τριβολογικής ανάλυσης. Η πιο αναλυτική μελέτη αποτελείται από καμπύλες τριβής στις οποίες (i) ο συντελεστής τριβής ή (ii) η δύναμη τριβής παριστάνεται γραφικά ως προς (iii) το χρόνο του εμβόλου ή (iv) τη γωνία στροφάλου. Οι καμπύλες τριβής για οποιοδήποτε από τους παραπάνω τύπους γραφημάτων αποτελούν σημαντικό εργαλείο της τριβολογικής ανάλυσης των συνθηκών λίπανσης και δίνουν την πιθανότητα εμφάνισης φθοράς μεταξύ του ελατηρίου, του εμβόλου και του κυλίνδρου. Μετρήσεις της τριβής με τη χρήση σταθμισμένων όρων ως προς (v) το συντελεστή τριβής ή (vi) τη δύναμη τριβής, για την περιοχή της κίνησης του εμβόλου στο μέσο του διαστήματος από το

ΑΝΣ προς το ΚΝΣ και αντίστροφα, είναι πολύ χρήσιμοι για την εκτίμηση των διαφόρων συνθηκών λίπανσης, όπως αυτές συνοδεύονται από συνδυασμούς διαφορετικών τριβολογιών σταθερών. Μετρήσεις της τριβής με τη χρήση σταθμισμένων όρων ως προς (vii) το συντελεστή τριβής ή (viii) τη δύναμη τριβής για ολόκληρο τον κύκλο λειτουργίας του εμβόλου περιέχουν λιγότερες πληροφορίες για τη χρήση τους σε μελέτες συνθηκών λίπανσης, αλλά είναι πολύ χρήσιμες για την εκτίμηση των απωλειών λόγω τριβής της μηχανής. Ο υπολογισμός των απωλειών λόγω τριβής της μηχανής με βάση την καμπύλη του συντελεστή τριβής σε ότι αφορά το ζεύγος εμβόλου / κυλίνδρου, απαιτεί τη λεπτομερή γνώση της κάθετης δύναμης μεταξύ του εμβόλου και του κυλίνδρου. Μετρήσεις της τριβής με τη χρήση σταθμισμένων όρων μπορούν να εκφραστούν και ως (ix) πίεσης τριβής P_f που όπως αναφέρθηκε δίνεται από τη **Σχέση 8.2**.

8.1.2 Προσομοίωση της τριβής

Μεταξύ του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού και της τριβής υπάρχει μια αλληλένδετη σχέση. Ο Wakuri και οι συνεργάτες του έχουν παρατηρήσει ότι η πλήρως υδροδυναμική λίπανση στα ελατήρια του εμβόλου δεν μπορεί να εξασφαλισθεί και γι αυτό το λόγο ο θεωρητικός υπολογισμός της τριβής θα πρέπει πάντα να περιέχει συνθήκες μικτής λίπανσης, όπου παρατηρείται επαφή των τραχυτήτων των επιφανειών (Wakuri et al., 1995). Είναι επίσης δεδομένο ότι τα διάφορα υπολογιστικά μοντέλα λίπανσης δεν διαθέτουν, στο σύνολό τους, τον υπολογισμό της τριβής. Τα μοντέλα τριβής που εμπεριέχονται σε προγράμματα προσομοίωσης της λίπανσης είναι συνάρτηση της θεώρησης που κάνει ο μελετητής ως προς το αν ο μηχανισμός της τριβής είναι σημαντικός ή όχι στο φαινόμενο που εξετάζει.

Η υπολογιστική προσομοίωση της απόδοσης των ελατηρίων περιλαμβάνει μικτές συνθήκες λίπανσης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του ελατηρίου και του κυλίνδρου γίνεται όλο και πιο σημαντική καθώς το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού μειώνεται. Κατά την ελαχιστοποίηση των απωλειών τριβής, το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού μειώνεται προκειμένου η απώλεια τριβής λόγω υδροδυναμικής λειτουργίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Είναι προφανές ότι η επαφή των επιφανειών θα συμβεί για τις περιπτώσεις των λιπαντικών όπου το πάχος της μεμβράνης είναι μικρό. Η επαφή των επιφανειών αυξάνει με τη σειρά της τις απώλειες λόγω τριβής, οπότε μικρές απώλειες λόγω τριβής απαιτούν ένα συμβιβασμό μεταξύ της υδροδυναμικής λειτουργίας και της λειτουργίας επαφής με ολίσθηση. Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας επαφής του ελατηρίου του εμβόλου και του κυλίνδρου είναι εξαιρετικά σημαντικά για τις περιπτώσεις όπου έχουμε μικτή λίπανση, εκεί δηλαδή όπου οι κορυφές των τραχυτήτων των επιφανειών εφάπτονται, αλλά δεν είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός. Μια λεπτή μεμβράνη λιπαντικού υπάρχει μεταξύ των δύο λιπανόμενων επιφανειών, αλλά δεν είναι σε θέση να τις διαχωρίσει πλήρως ώστε να μην υπάρχει επαφή.

Το ιξώδες του λιπαντικού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της διατμητικής τάσης. Το τελευταίο φαινόμενο ονομάζεται στην Αγγλική βιβλιογραφία “**shear thinning**” και ο όρος εκφράζει τη μείωση του ιξώδους του λιπαντικού με την αύξηση της διάτμησης που παραλαμβάνει το λιπαντικό και το οποίο λαμβάνεται υπόψη κατά την προσομοίωση των συνθηκών λίπανσης ενός κινητήρα. Πολλά μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο “**shear thinning**” έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε κώδικες προσομοίωσης λιπαντικών συνθηκών. Το μοντέλο της προσομοίωσης λειτουργεί ως υδροδυναμικό μέχρι το πάχος της μεμβράνης να μειωθεί σε κάποια συγκεκριμένη τιμή, μετά την οποία οι συνθήκες λίπανσης λαμβάνονται ως μικτές και

περιλαμβάνονται στην προσομοίωση. Αυτή η κρίσιμη τιμή του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού μπορεί να υπολογιστεί από το μέγεθος της τραχύτητας των λιπαινόμενων επιφανειών.

Το πρώτο ελατήριο του εμβόλου καταπονείται σε μεγαλύτερες δυνάμεις τριβής, κυρίως λόγω επαφής των επιφανειών (μετωπική ελατηρίου / κυλίνδρου) και λιγότερο λόγω υδροδυναμικής λειτουργίας. Τα αέρια της καύσης δρουν και πάλι στην πίσω πλευρά του ελατηρίου και το πιέζουν προς την πλευρά του κυλίνδρου. Η δύναμη τριβής λόγω ολίσθησης στο πρώτο ελατήριο αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου. Λόγω της στεγανοποιητικής δράσης του πρώτου ελατηρίου του εμβόλου, η πίεση στην πίσω πλευρά του ελατηρίου είναι πολύ μικρή και, έτσι, η δύναμη τριβής δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές του φορτίου (Reipert and Voigt, 2001).

Οι Sui και Ariga έχουν μελετήσει την επίδραση της τοπογραφίας της επιφάνειας του ελατηρίου στο μηχανισμό τριβής μεταξύ του ελατηρίου και της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου. Ανέπτυξαν ένα μοντέλο τριβής για τα ελατήρια που βασίζεται στη μικτή λειτουργία λίπανσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώθηκαν με κατάλληλη διάταξη. Το μοντέλο λίπανσης που χρησιμοποιήθηκε επεκτάθηκε και για μελέτες που αφορούσαν στην τριβή των ελατηρίων σε κινητήρες ανάφλεξης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές αυτές καταδεικνύουν ότι η μείωση των απωλειών λόγω τριβής μέχρι και 9% είναι δυνατή μόνο με τη μεταβολή της τοπογραφίας των λιπαινόμενων επιφανειών. Η μείωση της τριβής οδηγεί σε αύξηση του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού που επίσης τείνει να μειώσει την τριβή κοντά στα νεκρά σημεία. Ακόμη περισσότερο, η τριβή στην οποία υπόκειται το κάτω ελατήριο του εμβόλου φαίνεται να είναι ισχυρά ευαίσθητη στις μεταβολές της τραχύτητας της επιφάνειας (Sui and Ariga, 1993).

Ο Takiguchi και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν έρευνες σε έμβολα δύο ελατηρίων κάνοντας χρήση κινητήρων ανάφλεξης προκειμένου να διαπιστώσουν το χαρακτηριστικό πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού, την τριβή του ελατηρίου και την κατανάλωση του λιπαντικού. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι παρόλο που τα έμβολα με δύο ελατήρια εμφανίζουν πιο έντονο το φαινόμενο **διαφυγής** σε σχέση με έμβολα τριών ελατηρίων, το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού σε έμβολα δύο ελατηρίων μειώνεται, κάτι που τελικά οδηγεί σε μικρή αύξηση της κατανάλωσης του λιπαντικού, σε σχέση και πάλι με έμβολα τριών ελατηρίων. Επίσης, οι συγγραφείς κατέληξαν στο γεγονός ότι η δύναμη που παραλαμβάνεται από τα ελατήρια του εμβόλου μπορεί να μειωθεί ανεξάρτητα από τον αριθμό των ελατηρίων, μειώνοντας την ελαστική δύναμή τους (Takiguchi et al., 1996).

Ο Ronen και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη σχέση μεταξύ της τριβής και του ανάγλυφου της επιφάνειας του κυλίνδρου και του εμβόλου, όπως αυτή προκύπτει με τη χρήση ακτίνας laser. Τα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο, με το πρώτο να περιέχει μηχανισμούς όπως είναι η αδράνεια και η θλίψη της μεμβράνης του λιπαντικού, ενώ το δεύτερο ως πιο απλοϊκό μοντέλο δεν έκανε χρήση αυτών των μηχανισμών. Κατά τη χρήση ενός υπολογιστικού μοντέλου όπου απουσιάζουν φαινόμενα που σχετίζονται με την αδράνεια δεν υπάρχει σημαντικό όφελος υπολογιστικού χρόνου. Αποδείχθηκε ότι τα αποτελέσματα του απλουστευμένου μοντέλου σχετικά με την τιμή των ανοχών και της τριβής διέφεραν σημαντικά (Ronen et al., 2001).

Ο Taylor έχει αναπτύξει ένα μοντέλο για την εκτίμηση της τριβής σε κινητήρες. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν προσομοιώσεις για συνθήκες ψυχρής εκκίνησης και συνθήκες κανονικής λειτουργίας του κινητήρα, όπου αυτός έχει φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η συνολική τριβή της μηχανής αμέσως μετά την ψυχρή εκκίνηση

είναι τέσσερις με πέντε φορές μεγαλύτερη σε σχέση με συνθήκες κανονικής λειτουργίας (Taylor, 1997).

8.1.3 Μετρούμενες δυνάμεις και συντελεστές τριβής

Τα ελατήρια των εμβόλων πρέπει να δοκιμάζονται σε πρότυπους κινητήρες οχημάτων ή πρότυπους κινητήρες ανάφλεξης. Πολλές φορές γίνεται η χρήση μοντέλων κινητήρων υπό κλίμακα για την εκτίμηση των τριβολογιών ιδιοτήτων τους και συγκεκριμένα των επαφών μεταξύ ελατηρίων / κυλίνδρου / συστήματος λίπανσης. Με αυτό τον τρόπο παραμένει χαμηλό το κόστος των δοκιμών και είναι δυνατό να μελετηθούν και να στοχευθούν συγκεκριμένα φαινόμενα χωρίς να αλληλεπιδρούν με άλλα που δρουν παράλληλα με το υπό μελέτη φαινόμενο. Στην **Παράγραφο 8.1.1** έχουν ήδη δοθεί παραδείγματα μετρήσεων της τριβής και πώς αυτά μπορούν να εκφραστούν.

Πειραματικές μετρήσεις από διαφορετικούς ερευνητές πάνω στις τριβολογικές ιδιότητες της επαφής ελατηρίου / κυλίνδρου έχουν γίνει με τη βοήθεια ελατηρίου εμβόλου ή μέρους αυτού που ολισθαίνει παλινδρομικά στο πάνω μέρος της επιφάνειας κυλίνδρου. Οι απλούστερες τριβολογικές δοκιμές βασίζονται σε ιδιοκατασκευές φθοράς τύπου DIN 51 834 και σε διατάξεις τύπου pin-on-disc, ενώ πιο εξειδικευμένες μετρήσεις και μελέτες εφαρμόζουν δοκιμές στις οποίες χρησιμοποιούνται διατάξεις που προσεγγίζουν τις πραγματικές μηχανές ή μηχανές οχημάτων. Για την προσομοίωση της κάθετης ή οριζόντιας παλινδρομικής κίνησης του ελατηρίου του εμβόλου ή του κυλίνδρου σε ιδιοκατασκευές, χρησιμοποιείται ένα στρόφαλο ή ένας μηχανισμός που φέρει έκκεντρα ή ακόμη ένας ηλεκτρομαγνητικός ενεργοποιητής. Σε μερικές περιπτώσεις, τα γραφήματα της τριβής εμφανίζουν χαρακτηριστικές κορυφές στην αρχή και στο τέλος της κίνησης του μηχανισμού, ενώ σε κάποιες άλλες περιπτώσεις μελετητών αυτά τα σημεία απουσιάζουν πλήρως. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη διαφορά της αντίδρασης της δύναμης τριβής στα διάφορα τριβολογικά φαινόμενα που εξετάζονται, σχετικά με τη διάταξη μέτρησής τους (Patterson et al., 1993, Noorman et al., 2000).

Ο Arcoumanis και οι συνεργάτες του έχουν κατασκευάσει μια παλινδρομική διάταξη για τη μελέτη της λίπανσης ενός κινητήρα, στην οποία η κάθετη δύναμη μεταβάλλεται σύμφωνα με το εφαρμοζόμενο φορτίο, τη θέση του ελατηρίου του εμβόλου κατά τη διάρκεια του κύκλου και την ταχύτητα του στροφαλοφόρου άξονα. Οι καμπύλες τριβής που προέκυψαν δείχνουν μέγιστες τιμές μόλις μετά τα ANΣ και ΚΝΣ, υψηλές τιμές της δύναμης τριβής με την αύξηση των ταχυτήτων και υψηλότερες δυνάμεις τριβής αλλά χαμηλότερους συντελεστές τριβής με την αύξηση των φορτίων (Arcoumanis et al., 1995).

Οι Dearlove και Cheng μέτρησαν το συντελεστή τριβής ενός ελατηρίου εμβόλου επικαλυμμένου με χρώμιο, το οποίο είχε βαρελοειδή μορφή προφίλ, καθώς αυτό παλινδρομούσε σε λειασμένη επιφάνεια δείγματος χυτοσιδηρού κυλίνδρου. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί τύποι λιπαντικών σε θερμοκρασία 30°C. Στα συμπεράσματά τους περιέχονται μέσες τιμές του συντελεστή τριβής που φτάνει τα $\mu = 0.07$ στο μέσον περίπου της διαδρομής του εμβόλου καθώς κινείται από το ANΣ προς το ΚΝΣ, σε ταχύτητα περιστροφής της μηχανής ίση με 200 στροφές ανά λεπτό και κάθετη δύναμη ίση με 40-80N. Σε ταχύτητες περιστροφής της μηχανής κοντά στις 400 στροφές ανά λεπτό, ο αντίστοιχος συντελεστής τριβής ήταν $\mu = 0.06$ και στις 600 στροφές ανά λεπτό $\mu = 0.03$. Οι ερευνητές παρουσίασαν ενδείξεις μικτής και υδροδυναμικής λίπανσης. Το κάθετο φορτίο που εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν αρκετά χαμηλό και, έτσι, μπορεί να

ερμηνευθεί η μεγάλη μείωση του συντελεστή τριβής κατά την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής από τις 200 στις 600 στροφές ανά λεπτό (Dearlove και Cheng, 1995). Οι Sui και Ariga παρουσίασαν μια μικρή αύξηση που παρατηρήθηκε στο συντελεστή τριβής στο μέσο του διαστήματος κατά την κίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ ή αντίστροφα, λόγω αυξημένης υδροδυναμικής διατμητικής απώλειας με την αύξηση της ταχύτητας, κατά τη σύγκριση της δύναμης τριβής ενός πακέτου ελατηρίων στις 650 και 1.500 στροφές ανά λεπτό (Sui and Ariga, 1993). Τα παραπάνω αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους Dearlove και Cheng φαίνεται πως παρουσιάζουν συνθήκες λίπανσης κοντά στο αριστερό άκρο του διαγράμματος Stribeck, ενώ τα αποτελέσματα των Sui και Ariga αντιπροσωπεύουν συνθήκες λίπανσης κοντά στην ελάχιστη τιμή του δεξιού άκρου του ίδιου διαγράμματος.

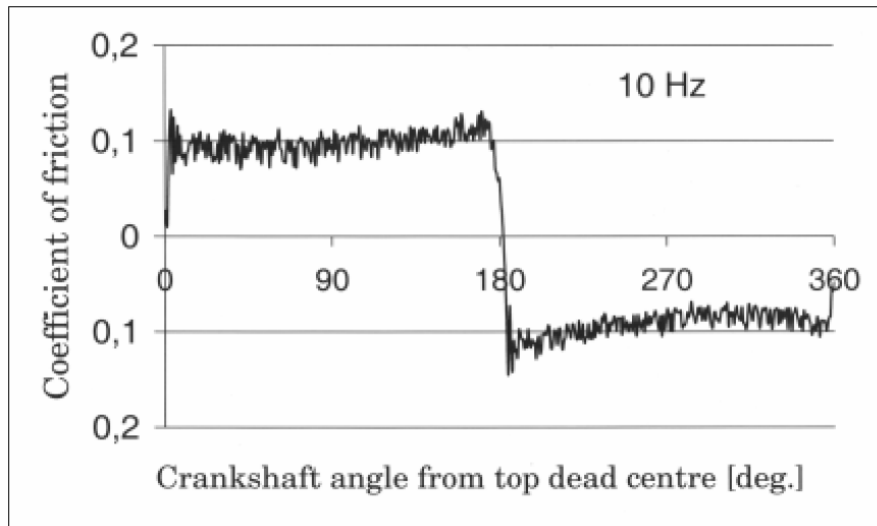
Οι Sui και Ariga μέτρησαν χαμηλότερο συντελεστή τριβής στους 93°C σε σχέση με τους 30°C, λόγω μειωμένου ιξώδους του λιπαντικού (Sui and Ariga, 1993), παρατήρηση που είναι σε συμφωνία με τη μελέτη των Hamatake και των συνεργατών του, οι οποίοι παρουσίασαν χαμηλότερους συντελεστές τριβής όπως αυτοί σχετίζονται με λιπαντικό μικρότερου ιξώδους (Hamatake et al., 2001).

Οι Glidewell και Korcek παρουσίασαν αποτελέσματα που αφορούν σε παλινδρομικές διατάξεις, όπου ο χυτοσίδηρος του ελατηρίου του εμβόλου ήταν επικαλυμμένος με μολυβδαίνιο και ο οποίος ολίσθαινε σε δείγμα κυλίνδρου από χυτοσίδηρο επίσης. Στις μετρήσεις που διεξήχθησαν με διαφορετικά λιπαντικά στους 100°C, ελήφθησαν μέσοι όροι του συντελεστή τριβής στο εύρος τιμών $\mu = 0.10 - 0.11$. Τα λιπαντικά που χρησιμοποιήθηκαν δεν περιείχαν τροποποιητές τριβής, ενώ συντελεστές τριβής στην περιοχή τιμών $\mu = 0.04 - 0.05$ ελήφθησαν από λιπαντικά που περιείχαν MoDTC ως τροποποιητή τριβής. Τα αποτελέσματα των Glidewell και Korcek έδειξαν την αναγκαιότητα της μελέτης της πλήρους σύστασης του λιπαντικού όταν γίνεται ανάλυση αποτελεσμάτων που σχετίζονται με μετρήσεις τριβής στην περιοχή των ελατηρίων εμβόλου (Glidewell and Korcek, 1998).

Ο Galligan και οι συνεργάτες του πήραν μετρήσεις του συντελεστή τριβής σε διάταξη όπου τα ελατήρια του εμβόλου ήταν κατασκευασμένα από χυτοσίδηρο επικαλυμμένο με χρώμιο που ολίσθαινε με παλινδρομικό τρόπο πάνω σε δείγμα από λειασμένο χυτοσίδηρο κύλινδρο, λιπασμένο με διάλυμα 1% στεαρικού οξέος σε άσπρο λιπαντικό. Η τιμή που πήραν ήταν ίση με $\mu = 0.095$ σε θερμοκρασία 100°C και τιμή ίση με $\mu = 0.125$ σε θερμοκρασία 202°C, αν και η ολίσθηση στην τελευταία θερμοκρασία προκάλεσε γραμμώσεις της εσωτερικής επιφάνειας. Όταν το λιπαντικό αντικαταστάθηκε από πλήρως συνθετικό τύπου 15W-50, ο μέσος συντελεστής τριβής ήταν περίπου $\mu = 0.11$ εντός του ίδιου θερμοκρασιακού πεδίου, ενώ και πάλι η ολίσθηση σε περίπου 248°C οδήγησε σε εμφάνιση γραμμώσεων στον κύλινδρο (Galligan et al., 1999a, 1999b).

Οι Akalin και Newaz, Andersson, Glidewell και Korcek, Dearlove και Cheng, και Durga και συνεργάτες του, παρουσίασαν γραφήματα τριβής από δοκιμές με μέρη ελατηρίου του εμβόλου που ολίσθαιναν παλινδρομικά έναντι δειγμάτων από επιφάνειες κυλίνδρων. Οι τιμές του συντελεστή τριβής ήταν ξεκάθαρα μεγαλύτερες στα ΑΝΣ και ΚΝΣ, ενώ συνολικά η μορφή του γραφήματος είναι τύπου **UN** όπως φαίνεται στην **Εικ. 8.1**. Ωστόσο, οι ερευνητές δεν εστίασαν αρκετά στην ανάλυση των διαφορετικών περιοχών λίπανσης εντός των διαγραμμάτων μορφής **UN** (Akalin και Newaz, 1998, Andersson, 2002, Glidewell και Korcek, 1998, Dearlove και Cheng, 1995, Durga et al., 1998). Ο Durga και οι συνεργάτες του αναφέρουν μέγιστες τιμές συντελεστή τριβής στα ΑΝΣ και ΚΝΣ της

τάξης των $\mu = 0.10 - 0.15$, ενώ στα ενδιάμεσα σημεία του κύκλου οι τιμές είναι της τάξης $\mu = 0.05 - 0.10$. Οι αντίστοιχες τιμές εξαρτώνται από το λιπαντικό, την ποιότητα της επιφάνειας και τη φύση του υλικού της επιφάνειας (Durga et al., 1998). Οι Akalin και Newaz έδειξαν μέγιστες τιμές του συντελεστή τριβής $\mu = 0.12 - 0.15$ για το ANΣ και ΚΝΣ αντίστοιχα, για ένα ελατήριο επικαλυμμένο με χρώμιο που ολισθαίνει πάνω σε κυλινδρική επιφάνεια χυτοσιδήρου και λιπαντικό SAE 5W-30 σε θερμοκρασία δωματίου, ενώ για τις ενδιάμεσες θέσεις μεταξύ ANΣ και ΚΝΣ οι τιμές ήταν αντίστοιχα $\mu = 0.02 - 0.03$ (Akalin and Newaz, 1998).



Εικόνα 8.1 - Διάγραμμα τριβής μορφής μ . Η καμπύλη αντιστοιχεί σε περιστροφή του στροφαλοφόρου κατά 360° και σε συχνότητα παλινδρόμησης του ελατηρίου του εμβόλου 10 Hz (after Andersson, 2002)

Οι Tung και Tsergounis διεξήγαγαν πειραματικές μετρήσεις ελατηρίων εμβόλου και δειγμάτων κυλίνδρου κάνοντας χρήση μιας παλινδρομικής διάταξης. Στις μετρήσεις βρέθηκε ότι ο συντελεστής τριβής ήταν περίπου ίσος με $\mu = 0.08$ με λιπαντικά που περιείχαν μικρές ποσότητες προσθέτων, ενώ στις περιπτώσεις όπου έγινε χρήση λιπαντικών με υψηλή συγκέντρωση προσθέτων μολυβδαινίου ή υψηλών συγκεντρώσεων μολυβδαινίου / θείου και μολυβδαινίου / ψευδαργύρου η τιμή ήταν $\mu = 0.03$ (Tung and Tsergounis, 2000).

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τις παραπάνω μετρήσεις είναι ότι η καμπύλη της τριβής προφανώς έχει σχήμα μ , με τις μέγιστες τιμές στο εύρος των $\mu = 0.10 - 0.15$ να εμφανίζονται στα νεκρά σημεία και στις ενδιάμεσες θέσεις να εμφανίζονται τιμές της τάξης $\mu = 0.02 - 0.10$, με μέσους όρους $\mu = 0.04 - 0.11$.

Άλλη μια προσέγγιση για την καλύτερη κατανόηση της λίπανσης του ελατηρίου του εμβόλου έχει παρουσιαστεί από τον Akimoto και τους συνεργάτες του, που μελέτησαν το φαινόμενο **ημιράβδωσης** που εμφανίζεται στο πάνω ελατήριο. Για τη μελέτη του φαινομένου έκαναν χρήση μιας συσκευής οπτικής εισόδου που είχε τη μορφή παραθύρου από γυαλί και ήταν τοποθετημένο στο τοίχωμα του κυλίνδρου στην επιφάνεια δηλαδή του χιτωνίου. Κατά το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται «κλείδωμα» του πρώτου ελατηρίου μέσα στην υποδοχή του στο έμβολο για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο φαίνεται να έχει ως γενεσιουργό αιτία την ύπαρξη πλεοναζόντων εναποθέσεων στο χώρο της καύσης. Το φαινόμενο επιτείνεται σε ελατήρια όπου η γωνία στρέψης

είναι μεγάλη και έχουν μικρή ανοχή (Akimoto et al., 2000). Οι Urabe και συνεργάτες του, καθώς και οι Hamatake και συνεργάτες του, μελέτησαν την επίδραση της ανακύκλωσης του καυσαερίου (EGR). Φαίνεται πως η ανακύκλωση του καυσαερίου αυξάνει τη φθορά του ελατηρίου του εμβόλου και την τιμή του συντελεστή τριβής, ειδικά όταν δεν χρησιμοποιείται παγίδα αιθάλης (Urabe et al., 1998, Hamatake et al., 2001). Η αύξηση της τριβής και της φθοράς εικάζεται ότι προέρχεται από εναποθέσεις άνθρακα στην υποδοχή του ελατηρίου λόγω των αερίων καύσης που επανακυκλοφορούν (Urabe et al., 1998).

8.1.4 Επίδραση της ποιότητας επιφάνειας των ελατηρίων εμβόλου και των επικαλύψεών τους

Στις διάφορες εφαρμογές όπου η τριβή καταπονεί μια επιφάνεια, η ποιότητα της επιφάνειας είναι εξαιρετικής σημασίας για τις συνθήκες λίπανσης και την τριβολογική συμπεριφορά. Για δεκαετίες τώρα, τα ελατήρια των εμβόλων υπόκεινται σε κατεργασίες επικαλύψεων, τόσο για την καταπολέμηση της φθοράς όσο και για να μειωθεί ο συντελεστής τριβής. Οι σκληρές επικαλύψεις χρωμίου των ελατηρίων με πορώδες ή εσωτερικές διόδους μέσα στα οποία μπορεί να εγκλωβίζεται λιπαντικό είναι πολύ καλά παραδείγματα συνηθισμένων επικαλύψεων των ελατηρίων.

Η επίδραση της ποιότητας της επιφάνειας της συνολικής διάταξης του εμβόλου στον ολικό συντελεστή τριβής της μηχανής έχει μελετηθεί από τον Wakuri και τους συνεργάτες του, οι οποίοι έδειξαν πως οι απώλειες λόγω τριβής αυξάνουν όταν τα έμβολα, τα ελατήρια του εμβόλου και το χιτώνιο του κυλίνδρου αντικατασταθούν από νέα εξαρτήματα τα οποία θα πρέπει να «ρονταριστούν» (Wakuri et al., 1995). Ο Ma και οι συνεργάτες του έχουν δείξει ότι ο συντελεστής τριβής μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του «ρονταρίσματος» της μηχανής (Ma et al., 1998) και οι Priest και Taylor έδειξαν το ίδιο αποτέλεσμα σε ότι αφορά την κατανάλωση καυσίμου (Priest and Taylor, 2000). Τα οφέλη από τη μείωση της επιφανειακής τραχύτητας και συγκεκριμένα από τη μείωση της τριβής και της φθοράς κάτω από μικτές συνθήκες λίπανσης, στηρίζονται και από προηγούμενες μελέτες που διεξήγαγαν οι Sui και Ariga (Sui και Ariga, 1993).

Έρευνες από τους Glaeser και Gaydos με κεραμικές επικαλύψεις σε παλινδρομικές διατάξεις με γεωμετρία τύπου **flat-on-flat**, δηλαδή επαφή επιπέδου με επίπεδο, έδειξαν ότι μια επικάλυψη τύπου Cr_2O_3 που εναποτίθεται και στις δύο επιφάνειες ολίσθησης που λιπαίνονται με πολύ-άλφα-ολεφίνη, δίνουν μια τιμή για το συντελεστή τριβής στο εύρος των τιμών $\mu = 0.05 - 0.08$ σε θερμοκρασία 260°C. Η μελέτη τους σχετίζεται με την ανάπτυξη της αδιαβατικής μηχανής ντίζελ (Glaeser και Gaydos, 1993).

8.1.5 Επίδραση της ποιότητας επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου και των επικαλύψεών του

Η καλύτερη λύση για τη λίπανση της συνολικής διάταξης του εμβόλου είναι ένα λειασμένο χιτώνιο το οποίο όμως να περιέχει ένα μεγάλο δίκτυο από βαθιές χαραγές. Η ικανότητα του χιτωνίου να κατακρατά ένα σημαντικό όγκο του λιπαντικού εντός των χαραγών του είναι εξαιρετικά σημαντική για την τριβολογική απόδοση του συστήματος λίπανσης. Για αρκετές δεκαετίες, παράμετροι επιφανειακής τραχύτητας όπως οι R_{Sk} (ασυμμετρία του προφίλ), R_{vk} (βάθος αυλακιών /

χαραγών) και R_a (μέση αριθμητική τιμή) έχουν χρησιμοποιηθεί ως δείκτες της ικανότητας κατακράτησης λιπαντικού από το μοτίβο των χαραγών που έχει παραχθεί στο χιτώνιο.

Ο Durga και οι συνεργάτες του μελέτησαν την επίδραση διαφορετικών τραχυτήτων επιφανείας χυτοσιδηρού χιτωνίου στο συντελεστή τριβή και ανέφεραν τιμές της τάξης $\mu = 0.12$ στα σημεία μεταξύ των ΑΝΣ και ΚΝΣ με τιμή τραχύτητας $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ και τιμή συντελεστή τριβής $\mu = 0.08$ με τιμή τραχύτητας $R_a = 0.07 \mu\text{m}$ κάνοντας χρήση λιπαντικού 5W-30 με ταχύτητες περιστροφής κινητήρα μεταξύ 100 και 450 στροφών ανά λεπτό. Οι επικαλύψεις που έχουν εναποτεθεί με τη χρήση πλάσματος ακόμη και με σχετικά μεγάλη τιμή της τραχύτητας ($R_a = 0.3 \mu\text{m}$), έδωσαν μικρότερο συντελεστή τριβής σε σχέση με τα λειασμένα χιτώνια κάτω από τις ίδιες συνθήκες δοκιμής (Durga et al., 1998).

Σύμφωνα με σχετική μελέτη από τον Galligan και τους συνεργάτες του, ο συντελεστής τριβής στο ξεκίνημα της παλινδρομικής δοκιμής είναι μικρότερος ($\mu = 0.1$ έναντι $\mu = 0.13$) με υπερλειασμένο χιτώνιο σε σχέση με ένα χιτώνιο που έχει υποστεί κανονική κατεργασία λείανσης. Ωστόσο, μετά από συγκεκριμένο διάστημα ολίσθησης η τιμή του συντελεστή τριβής διατηρείται στα ίδια επίπεδα ανεξάρτητα από την αρχική ποιότητα της επιφάνειας (Galligan et al., 1999a).

Όπως θα περιγραφεί παρακάτω, στις παραγράφους που αναφέρονται στις γραμμώσεις, η ποιότητα της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση του κυλίνδρου και του εμβόλου στην εμφάνιση γραμμώσεων, έχοντας ως δεδομένο ότι μια πολύ λεία επιφάνεια χιτωνίου μπορεί να είναι ανεπιθύμητη.

Από τις παραπάνω μελέτες στην επίδραση της ποιότητας της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου στο συντελεστή τριβής της μηχανής μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι η βέλτιστη ποιότητα επιφάνειας θα πρέπει να στοχεύει τόσο στη μείωση του συντελεστή τριβής όσο και στην αύξηση της αντίστασης στην εμφάνιση γραμμώσεων. Η χρήση επικαλύψεων στα χιτώνια των κυλίνδρων μπορεί να προσφέρει ακόμα περισσότερα οφέλη.

8.1.6 Επίδραση της ανοχής κυλινδρικότητας (μορφής) του χιτωνίου του κυλίνδρου

Η απόκλιση στη μορφή της κυλινδρικότητας του χιτωνίου του κυλίνδρου μπορεί να προκαλέσει τοπικές μεταβολές στην επιφανειακή πίεση μεταξύ των ελατηρίων και του κυλίνδρου. Η φθορά του κυλίνδρου και η πιθανότητα τοπικής λείανσής του, καθώς και η πιθανότητα εμφάνισης γραμμώσεων στα ελατήρια του εμβόλου (Munro, 1976), επιτείνονται σε περιοχές που υπόκεινται σε μεγαλύτερες τιμές επιφανειακής πίεσης. Στις περιπτώσεις μεγάλων αποκλίσεων κυλινδρικότητας, στις περιοχές όπου η επιφανειακή πίεση μεταξύ του ελατηρίου και του χιτωνίου μειώνεται σημαντικά, είναι πιθανό να εμφανιστεί το φαινόμενο της **διαφυγής καυσαερίων**, δηλαδή να περάσουν αέρια καύσης από το χώρο καύσης στο χώρο του στροφαλοθαλάμου, ειδικά όταν τα ελατήρια του εμβόλου δεν είναι ελαστικά και η ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου είναι υψηλή.

8.2 Τριβή της ποδιάς του εμβόλου και των ελατηρίων του στην επιφάνεια του χιτωνίου του κυλίνδρου

Η τριβή μεταξύ της ποδιάς του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου καθορίζεται από την ανοχή διαμέτρου με την οποία σχεδιάζεται το έμβολο και τις κλίσεις που παίρνει κατά την κίνησή του ως προς τον κατακόρυφο άξονα, το σχεδιασμό της ποδιάς του εμβόλου, την ποιότητα της επιφάνειας, την επιφανειακή τραχύτητα και τις συνθήκες λίπανσης (Röhrlé, 1995).

Έχουν διεξαχθεί μετρήσεις τριβής των ελατηρίων εμβόλου από διαφορετικούς ερευνητές σε κινητήρες ανάφλεξης, κάνοντας χρήση κινητού χιτωνίου ή πλωτού χιτωνίου. Στις μετρητικές αυτές διατάξεις, το χιτώνιο του κυλίνδρου μπορεί να κινείται κατά την αξονική διεύθυνση σε μια απόσταση που είναι απαραίτητη για τη μέτρηση της δύναμης από το χιτώνιο. Επειδή η κάθετη δύναμη σε συγκεκριμένο ελατήριο του εμβόλου είναι γνωστή μόνο έως ένα βαθμό, μια σαφής καμπύλη του συντελεστή τριβής δε μπορεί να εξαχθεί. Οι μετρήσεις του συντελεστή τριβής και των διαγραμμάτων είναι ωστόσο εξαιρετικά χρήσιμες, καθώς εκφράζουν της απώλειες τριβής της μηχανής και τις μεταβολές της δύναμης τριβής σε πραγματικούς κινητήρες, λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτά τα διαγράμματα και οι μετρήσεις αναφέρονται στα αξονικά φορτία που παραλαμβάνουν τα ελατήρια. Εναλλακτικά, πέρα από τους πρότυπους κινητήρες δοκιμών που κάνουν χρήση του πλωτού χιτωνίου, ο συντελεστής τριβής στην περιοχή του εμβόλου έχει μελετηθεί και σε κινητήρες οχημάτων.

Οι Clarke, Sherrington και Smith αναφέρουν την ανάπτυξη της τεχνικής του πλωτού χιτωνίου και τα συνεπαγόμενα γραφήματα τριβής. Στην τεχνική που χρησιμοποίησαν, το φορτίο παράγεται από συμπιεσμένο αέρα. Οι μέγιστες τιμές της δύναμης τριβής που καταγράφηκαν στα ANΣ και ΚΝΣ της κίνησης του εμβόλου ήταν περίπου δύο φορές μεγαλύτερες από την ομοιόμορφη δύναμη στο μέσο της διαδρομής του εμβόλου σε ταχύτητες περιστροφής 100 στροφές ανά λεπτό. Στις 500 στροφές ανά λεπτό, οι μέγιστες τιμές δεν ήταν ορατές, ίσως γιατί σε αυτό συνέβαλε η αδράνεια της μάζας του πλωτού χιτωνίου (Clarke et al., 1989, 1990).

Ο Wakuri και οι συνεργάτες του αναφέρουν μετρήσεις της δύναμης τριβής με μέγιστες τιμές 570, 420 και 380 N σε διατάξεις κινητήρων ανάφλεξης κάνοντας χρήση λιπαντικού SAE 30 σε θερμοκρασία 70°C και ταχύτητες περιστροφής της μηχανής 500, 700 και 1000 στροφές ανά λεπτό αντίστοιχα. Ο συντελεστής τριβής που μετρήθηκε ήταν $\mu = 0.08$ στις μεσαίες τιμές ταχύτητας περιστροφής. Με τη χρήση λιπαντικού SAE 50 η μέγιστη τιμή της δύναμης τριβής βρέθηκε στα 300 N και με λιπαντικό SAE 10 σε θερμοκρασία 70°C και ταχύτητα περιστροφής 700 στροφών ανά λεπτό η αντίστοιχη τιμή ήταν 560 N. Μεγαλύτερες τιμές της πίεσης (7 MPa) έδωσαν υψηλότερες τιμές της δύναμης τριβής κοντά στα 560 N, ενώ μείωση της πίεσης στα 5 MPa είχε ως αποτέλεσμα και τη μείωση της δύναμης τριβής κοντά στα 310 N. Αυτά τα ευρήματα από τον Wakuri και τους συνεργάτες του καταδεικνύουν ότι το ιξώδες του λιπαντικού είναι τέτοιο που να επιτρέπει το σχηματισμό της μεμβράνης λιπαντικού μεταξύ του εμβόλου και του κυλίνδρου. Φαίνεται επίσης ότι οι υψηλότερες ταχύτητες βελτιώνουν τις συνθήκες υδροδυναμικής λίπανσης, και ότι οι υψηλότερες τιμές πίεσης στον κύλινδρο έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών λόγω τριβής στην επαφή κυλίνδρου / εμβόλου, ειδικά κοντά στην περιοχή της επαφής ελατηρίων / χιτωνίου (Wakuri et al., 1995).

Ο Hamatake και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη δύναμη τριβής σε έμβολο (διαμέτρου \varnothing 105 mm) μηχανής ντίτζελ με πλωτό χιτώνιο και αναφέρουν μέγιστες τιμές δύναμης τριβής της τάξης των 400 N αμέσως μετά τη στιγμή της καύσης, με την πίεση του κυλίνδρου να είναι στα 6 MPa, την ταχύτητα του στροφαλοφόρου στις 1.000 στροφές ανά λεπτό και θερμοκρασία λιπαντικού 70°C, με τύπο λιπαντικού SAE 30. Στην ίδια ταχύτητα περιστροφής, η πίεσης τριβής ήταν περίπου 40 kPa στην περιοχή 0...25 % του πλήρους φορτίου. Η μέγιστη τιμή της δύναμης τριβής βρέθηκε ότι μειώνεται καθώς αυξάνεται το ιξώδες του λιπαντικού, ενώ η πίεσης τριβής βρέθηκε ότι αυξάνει με την αύξηση του ιξώδους του λιπαντικού (Hamatake et al., 2001)..

Σχετικές μελέτες από τον Golloch και τους συνεργάτες του σε έμβολο μηχανής ντίτζελ, διαμέτρου \varnothing 128 mm, έδειξαν ότι η μέγιστη τιμή των δυνάμεων τριβής ήταν έως και 2400 N, έχοντας ως μέση πίεση κυλίνδρου τα 20 bar, μέγιστη τιμή πίεσης κυλίνδρου τα 170 bar και ταχύτητα περιστροφής στροφαλοφόρου άξονα 800 rpm (Golloch et al., 2002). Παρόμοιες εργασίες από τον Urabe και τους συνεργάτες του σε έμβολο κινητήρα ντίτζελ, διαμέτρου \varnothing 108 mm, έδειξε ότι η μέγιστη τιμή της δύναμης τριβής ήταν 320 N, για μέγιστη τιμή της πίεσης του κυλίνδρου τα 60 bar και ταχύτητα περιστροφής τις 200 στροφές ανά λεπτό (Urabe et al., 1998). Η διαφορά μεταξύ των παραπάνω ευρημάτων μπορεί να προέρχεται από διαφορετικές τιμές πίεσης και διαμέτρου των κυλίνδρων και της απόκρισης των δύο πλωτών χιτωνίων στις συχνότητες παλινδρόμησης που εφαρμόστηκαν.

Σε μια ανασκόπηση μοντέλων λίπανσης για κινητήρες, ο Coy παρουσιάζει μέγιστες τιμές της δύναμης τριβής περίπου 450 N και ανάλογες τιμές μέσης πίεσης τριβής της τάξης των 42 kPa, σε κινητήρες δοκιμών με λιπαντικό τύπου 10W-50, θερμοκρασία 70°C, ταχύτητα στροφαλοφόρου 1.000 στροφές ανά λεπτό και φορτίο 25% στον κινητήρα (Coy, 1998).

Ο Durga και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν δοκιμές σε κινητήρες οχημάτων, στους οποίους τα χιτώνια των κυλίνδρων ήταν επικαλυμμένα. Οι μικρότερες τιμές των απωλειών τριβής εμφανίστηκαν για λείες επιφάνειες χυτοσιδηρών χιτωνίων ($R_a = 0.07 \mu\text{m}$) σε αντίθεση με περισσότερο τραχιές επιφάνειες χιτωνίων ($R_a = 0.48 \mu\text{m}$). Οι δοκιμές των κινητήρων έγιναν σε δυναμόμετρο όπου η ταχύτητα περιστροφής ήταν 6.000 στροφές ανά λεπτό και όχι πάνω από αυτή την τιμή (Durga et al., 1998).

8.2.1 Κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας, οι συνθήκες λίπανσης της ποδιάς του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες που επικρατούν στο πακέτο των ελατηρίων, αν και με μικρότερες τιμές της επιφανειακής πίεσης και άρα πιο ευνοϊκές συνθήκες λίπανσης στην περιοχή της ποδιάς του εμβόλου.

8.2.2 Γραμμώσεις

Οι γραμμώσεις του εμβόλου είναι ένα τυχαίο φαινόμενο, που συμβαίνει λόγω τοπικής τήξης, ή προσκόλλησης υλικού, μεταξύ των ελατηρίων του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου. Το φαινόμενο των γραμμώσεων αποτελούσε πολύ μεγαλύτερο πρόβλημα πριν μερικές δεκαετίες (Aue, 1976) απ' ότι σήμερα. Ωστόσο, υπάρχει σημαντικό πρόβλημα από την αύξηση του φαινομένου των γραμμώσεων του χιτωνίου ή / και του ελατηρίου όταν το πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού στην

επαφή εμβόλου / χιτωνίου μειώνεται για λόγους που αφορούν τη μείωση εκπομπής καυσαερίων (Aue, 1976, Lacey και Stockwell, 1999).

Ενδείξεις γραμμώσεων πάνω στην επιφάνεια του ελατηρίου του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου είναι δυνατό να βρεθούν υπό τη μορφή χαραγών λόγω φθοράς, πλαστικής παραμόρφωσης, αποξέσεως, μεταφοράς σωματιδίων του σκληρού χυτοσιδήρου του χιτωνίου στην επικαλυμμένη με χρώμιο επιφάνεια του ελατηρίου του εμβόλου και λευκών περιοχών πάνω στις λιπαινόμενες επιφάνειες που δείχνουν ότι η θερμοκρασία έχει ξεπεράσει τους 750°C (Lacey και Stockwell, 1999). Οι μεταλλουργικές μελέτες από τον Shuster και τους συνεργάτες του σχετικά με την αστοχία λόγω γραμμώσεων έχουν δείξει την ύπαρξη μικρών σιδηρούχων σωματιδίων στη μετωπική επιφάνεια ελατηρίων των εμβόλων η οποία ήταν επικαλυμμένη με μολυβδαίνιο και χρώμιο. Επίσης, παρατηρήθηκε και η ύπαρξη μαρτενσιτικών μετασχηματισμών πάνω στο χιτώνιο του κυλίνδρου (Shuster et al., 1999). Μια από τις πολλές θέσεις του χιτωνίου που είναι οι πλέον επιρρεπείς για εμφάνιση γραμμώσεων είναι μεταξύ του ANΣ και του μέσου της διαδρομής του εμβόλου όπου το γινόμενο της δύναμης επί την ταχύτητα γίνεται μέγιστο (Willn και Brett, 1976).

Το φαινόμενο των γραμμώσεων ακολουθείται από συνθήκες μηδενικής διαβροχής λιπαντικού και την εμφάνιση λευκών περιοχών, οι οποίες υποδεικνύουν σημεία όπου παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες στην επαφή ελατηρίου / χιτωνίου. Η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει στην υπέρμετρη τοπική διαστολή του υλικού του κυλίνδρου (**thermal bump**). Αυτό οδηγεί σε αύξηση της επιφανειακής πίεσης της επαφής ελατηρίου / χιτωνίου. Οι συνθήκες λίπανσης μπορεί να είναι κακές είτε λόγω υψηλής τιμής της επιφανειακής τραχύτητας (μικρή τιμή του λ) ή λόγω λείανσης του χιτωνίου (μικρή τιμή του R_{vk}), που πρακτικά σημαίνει ότι έχουν «σβηστεί» τα αυλάκια πάνω στο χιτώνιο που κατακρατούν λιπαντικό. Η λείανση του χιτωνίου μπορεί να είναι αποτέλεσμα φθοράς σωματιδίων και πλαστικής ροής υλικού στην επαφή ελατηρίων / χιτωνίου (Galligan et al., 1999a, 1999b).

Πειραματικές μετρήσεις από τον Galligan και τους συνεργάτες του έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, του φορτίου και της συχνότητας παλινδρόμησης των δοκιμαστικών δοκιμίων, μειώνουν το χρόνο εμφάνισης γραμμώσεων, ενώ αντίθετα, η επαρκής παροχή λιπαντικού στις λιπαινόμενες επιφάνειες παρατείνει το χρόνο που μεσολαβεί μέχρι την εμφάνιση γραμμώσεων (Galligan et al., 1999a, 1999b).

Εκτεταμένη παρουσία εξανθρακωμάτων στην περιμετρική επιφάνεια του εμβόλου, πάνω από το πρώτο ελατήριο, μπορεί να οδηγήσει σε απόξεση, αφού τα εξανθρακώματα τείνουν να παρασύρουν και να απομακρύνουν το λιπαντικό από συγκεκριμένες περιοχές πάνω στην επιφάνεια του χιτωνίου. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση χαλύβδινων ελατηρίων μικρότερης διαμέτρου, σε σχέση με την εσωτερική διάμετρο του κυλίνδρου στην άνω περιοχή του χιτωνίου. Έτσι, οι εκτεταμένες γραμμώσεις αποφεύγονται καθώς οι εναποθέσεις άνθρακα απομακρύνονται πριν σχηματίσουν μια σκληρή φάση (Amoser, 2001). Εναποθέσεις άνθρακα στα ελατήρια του εμβόλου και στις υποδοχές τους, αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης γραμμώσεων (Munro, 1976).

Από αυτή την άποψη, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι γραμμώσεις του ελατηρίου του εμβόλου είναι πιο πιθανό να συμβούν όταν η τραχύτητα της επιφάνειας είναι είτε πολύ μικρή είτε πολύ μεγάλη. Επίσης, επιφανειακά στρώματα τα οποία είναι ανθεκτικά στη φθορά και ελατήρια που δεν έχουν σωστά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όσον αφορά στα πρώτα στάδια ζωής της μηχανής (στρώσιμο), μπορούν να οδηγήσουν σε γραμμώσεις. Πρόσθετη προστασία ενάντια στο

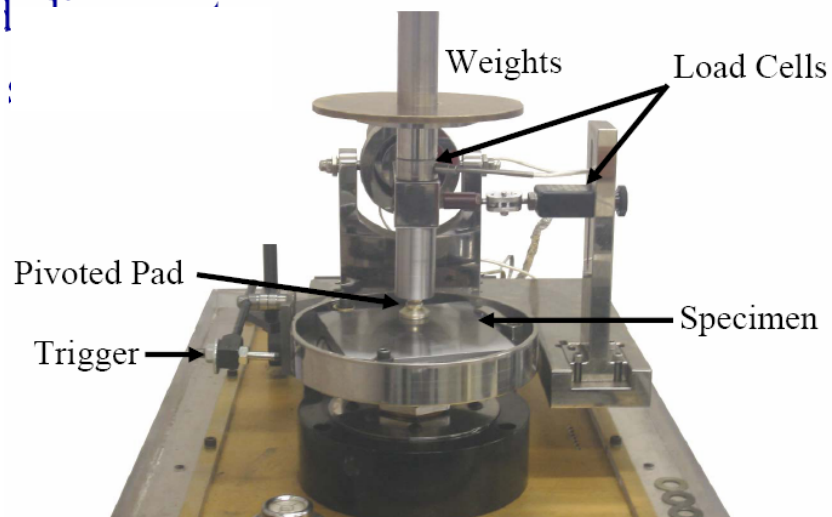
φαινόμενο των γραμμώσεων μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη στο λιπαντικό διαφόρων προσθετικών ουσιών, που συντελούν στο σχηματισμό ενός αποτελεσματικού στρώματος λίπανσης υπό τη μορφή μεμβράνης και έτσι παρεμποδίζουν τις γραμμώσεις. Η αλληλεπίδραση των συνεργαζόμενων επιφανειών ελατηρίου / χιτωνίου είναι προφανής σε πρόσφατες μελέτες (Galligan et al., 1999a, 1999b) με διαφορετικές συνθέσεις λιπαντικών, όπου διαπιστώθηκαν μεγάλες διαφορές στο χρόνο μέχρι την εμφάνιση του φαινομένου, κάτω από ίδιες συνθήκες ολίσθησης. Ωστόσο, για κάθε ένα στρώμα αντίδρασης που σχηματίζεται από πρόσθετα που είναι επιφανειακά ενεργά, υπάρχει μια μέγιστη θερμοκρασία πάνω από την οποία το στρώμα αντίδρασης αποσυντίθεται και η πιθανότητα των γραμμώσεων αυξάνει δραματικά. Άλλο ένα στοιχείο που είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος είναι η πτητικότητα του λιπαντικού στα τοιχώματα του χιτωνίου που ελέγχει την εξάτμιση του λιπαντικού ή μέρους αυτού και των συστατικών του σε υψηλές θερμοκρασίες. Δηλαδή, η πτητικότητα του λιπαντικού ελέγχει και αυτή με τη σειρά της την κατανομή ή ροή του λιπαντικού στην επαφή ελατηρίου / χιτωνίου (Lacey και Stockwell, 1999).

Ο Durga και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν δοκιμές αντοχής στο φαινόμενο των γραμμώσεων (LS-9 Scuff Resistance Tests). Το φαινόμενο φαίνεται να ξεκινά με τιμές συντελεστή τριβής κοντά στην τιμή $\mu = 0.11$ και υψηλότερα, ενώ σε τιμές κοντά στο εύρος $\mu = 0.09 - 0.10$ οι γραμμώσεις αποφεύχθηκαν τελείως (Durga et al., 1998). Πρόσφατες μελέτες στην ανίχνευση του φαινομένου εφαρμόζουν ακουστικές μεθόδους, όπου το φαινόμενο χωρίζεται σε τρία στάδια, δηλαδή, το στάδιο της απαρχής του φαινομένου, μη αντιστρεπτές γραμμώσεις και σοβαρές γραμμώσεις (Shuster et al., 2000).

Για παρόμοιους λόγους με τις γραμμώσεις των ελατηρίων του εμβόλου, οι γραμμώσεις της ποδιάς μπορούν να αποτελέσουν πρόβλημα, ειδικά σε έμβολα αλουμινίου και χιτώνια αλουμινίου. Από τη στιγμή που άρχισε να γίνεται χρήση χιτωνίων αλουμινίου στους κινητήρες εσωτερικής καύσης πριν από τρεις δεκαετίες, η επίστρωση της ποδιάς του εμβόλου με σιδηρούχες ενώσεις αποτελεί τη μόνη λύση για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου. Προσφάτως, οι Wang και Tung έχουν παρουσιάσει αποτελέσματα από μελέτη αντοχής σε γραμμώσεις σε διάφορες υποψήφιες επικαλύψεις για χιτώνια αλουμινίου και ποδιές εμβόλων από αλουμίνιο (Wang and Tung, 1999).

8.2.3 Κόλλημα του εμβόλου

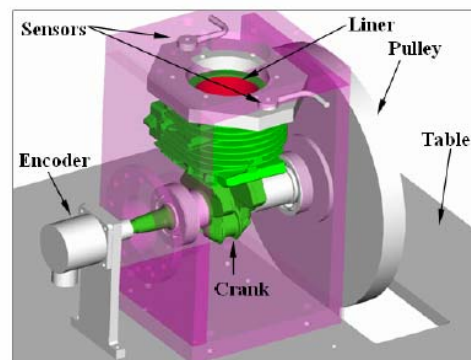
Το κόλλημα του εμβόλου είναι ένα φαινόμενο που δεν έχει προσελκύσει την προσοχή των ερευνητών. Το κόλλημα του εμβόλου έγκειται στο φρακάρισμά του στα τοιχώματα του κυλίνδρου λόγω ισχυρών δυνάμεων προσκόλλησης των υλικών του εμβόλου και του κυλίνδρου. Πρακτικά, το κόλλημα του εμβόλου είναι το αποτέλεσμα τριβολογικών ή θερμικών φορτίων που υπερφορτίζουν τα ελατήρια του εμβόλου, το σώμα και την ποδιά του και μπορεί να προηγηθεί των γραμμώσεων. Εναλλακτικά, και ειδικότερα στην περίπτωση καινούριων κινητήρων, το κόλλημα του εμβόλου μπορεί να είναι το αποτέλεσμα ανεπαρκών ανοχών μεταξύ των διατάξεων εμβόλου / χιτωνίου.



Εικόνα 8.2 Pin on Disk διάταξη (Marko Cater, 2007)



Εικόνα 8.3 Παλινδρομικού τύπου διάταξη (Marko Cater, 2007)



Εικόνα 8.4 Διάταξη με παλινδρομικό έμβολο (Marko Cater, 2007)

9. Φθορά του συστήματος εμβόλου – ελατηρίων – κυλίνδρου

9.1 Φθορά των ελατηρίων εμβόλου

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι η συνολική αποτίμηση της φθοράς των ελατηρίων εμβόλου που προέρχεται από έναν ήπιο μηχανισμό λείανσης, λόγω της συνεργασίας τους με το χιτώνιο του κυλίνδρου, εκφράστηκε ικανοποιητικά από τύπους που παρουσίασαν οι Archard, Archard και Hirst, Preston, Rabinowicz ή Holm, ενώ στην πραγματικότητα ο μηχανισμός φθοράς είναι σημαντικά πολυπλοκότερος (Gurta, 2001, Kauzlarich και Williams, 2001). Η φθορά των ελατηρίων εμβόλου και του χιτωνίου μπορεί να επιταχυνθεί λόγω λείανσης από μικρά λειαντικά σωματίδια που μεταφέρονται με το λιπαντικό. Η ρύπανση των μεταλλικών επιφανειών από την παρουσία αυτών των λειαντικών σωματιδίων που πιθανόν προέρχονται από την ελαιολεκάνη ή από το θάλαμο καύσης πάντοτε είναι πιθανή.

Εκτός από την παρουσία αυτών των μικρών λειαντικών σωματιδίων, ο συνολικός ρυθμός φθοράς μπορεί να επιταχυνθεί τριβοχημικά από την παρουσία άλλων επιβλαβών συστατικών του λιπαντικού που έχουν παγιδευτεί στη ζώνη των ελατηρίων. Τέτοιου είδους επιβλαβή παραπροϊόντα της καύσης σχηματίζονται ιδίως όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Όσον αφορά τις περισσότερες τριβολογικές εφαρμογές, η βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση της τριβοχημικής φθοράς στα ελατήρια του εμβόλου είναι αρκετά περιορισμένη. Πειράματα με επιχρωμιωμένα ελατήρια εμβόλου δείχνουν ότι προσφέρουν ικανοποιητική προστασία ενάντια στη φθορά που προκαλείται από όξινα προϊόντα καύσης (Federal-Mogul, 1998).

Υπό συνθήκες ανεπαρκούς λίπανσης, μπορούν να εμφανιστούν ισχυρές δυνάμεις συγκόλλησης ανάμεσα στα ελατήρια του εμβόλου και στο χιτώνιο και να οδηγήσουν σε απόξεση των ελατηρίων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλών δυνάμεων τριβής, αλλά και το σχηματισμό σοβαρών γραμμώσεων επάνω στις επιφάνειες του εμβόλου, των ελατηρίων και του χιτωνίου.

Όπως παρουσιάστηκε από τον Coy στο δικό του ποιοτικό μοντέλο μετάβασης της φθοράς, δημιουργούνται συνθήκες υδροδυναμικής λίπανσης στο μεσοδιάστημα της περιοχής όπου κινείται το έμβολο, λόγω αύξησης του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης ($\lambda > 5$), και συνεπώς μηδενική φθορά, ενώ η ολίσθηση υπό λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες λίπανσης κοντά στις περιοχές των νεκρών σημείων οδηγεί σε μικτή λίπανση ($\lambda = 1$ έως 5) και η εμφανιζόμενη φθορά είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.

Για χαμηλούς ρυθμούς φθοράς, ο όγκος των ελατηρίων εμβόλου που απομακρύνεται λόγω φθοράς μπορεί να προσδιοριστεί συγκρίνοντας την τραχύτητα μιας επιφάνειας πριν και μετά τις δοκιμές. Εναλλακτικά, η φθορά εκτιμάται από μεταβολές παραμέτρων της σχετικής τραχύτητας των επιφανειών και από παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν ορισμένες αναλογίες της περιοχής επαφής του ελατηρίου (Sherrington και Mercer, 2000). Για υψηλούς ρυθμούς φθοράς, ο όγκος υλικού που απομακρύνεται λόγω φθοράς μπορεί να προσδιοριστεί από μακρογεωμετρικές μεταβολές ή από την απώλεια μάζας.

Εκτός από τη φθορά ολίσθησης, η υποβάθμιση της επιφάνειας των ελατηρίων εμβόλου μπορεί να προέλθει λόγω διαφυγής θερμών καυσαερίων από το θάλαμο καύσης, όπου η θερμοκρασία των καυσαερίων υπερβαίνει τους 2000οC. Η διαφυγή μπορεί να προκαλέσει τοπική τήξη, διάβρωση, ή και γραμμώσεις στα ελατήρια. Στους κινητήρες όπου θεωρείται πιθανή η μείωση της διάστασης των ελατηρίων λόγω φθοράς που οφείλεται στη διαφυγή καυσαερίων, η χρήση μολυβδαινίου ή άλλων επιμεταλλώσεων ανθεκτικών στη θερμότητα είναι απαραίτητη (Brauers και Neuhäuser, 1989).

9.1.1 Φθορά λόγω ρονταρίσματος των ελατηρίων εμβόλου

Η μεγαλύτερη φθορά του πακέτου των ελατηρίων εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου, σε φυσιολογικές συνθήκες, παρουσιάζεται στο στάδιο του ρονταρίσματος του κινητήρα, κατά τη διάρκεια του οποίου οι κορυφές των τραχυτήτων των συνεργαζόμενων επιφανειών φθείρονται και τελικά οι επιφάνειες αποκτούν καλύτερη συνεργασία. Η λειαντική φθορά των ελατηρίων εμβόλου μειώνεται όταν οι ανωμαλίες της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου γίνονται μικρότερες, και η φθορά του χιτωνίου μειώνεται όταν τα ελατήρια του εμβόλου είναι σχετικά λεία λόγω του ρονταρίσματος. Συνεπώς κάτω από ευνοϊκές συνθήκες, αυτή η διεργασία σταθεροποίησης της συνεργασίας των επιφανειών οδηγεί σε μείωση του ρυθμού φθοράς και των ελατηρίων εμβόλου και χιτωνίου κυλίνδρου (Hu et al., 1991, Ma et al., 1998).

Σύμφωνα με πειραματικές μελέτες που παρουσίασε ο Henein και οι συνεργάτες του, ο ρυθμός φθοράς ενός χιτωνίου κυλίνδρου είναι περίπου δώδεκα (12) φορές υψηλότερος κατά τη διάρκεια της πρώτης ώρας λειτουργίας απ' ό,τι κατά τις επόμενες δύο (2) ώρες. Οι δοκιμές φθοράς με ελατήρια εμβόλου τα οποία έχουν υποστεί βομβαρδισμό νετρονίων, σε μηχανές που λειτούργησαν με καύση, και στις οποίες χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος ακτίνων γάμμα, έδειξαν ότι ο ρυθμός φθοράς των ελατηρίων του εμβόλου κατά τη διάρκεια της περιόδου εκκίνησης ήταν μέχρι σαράντα πέντε (45) φορές μεγαλύτερος σε σχέση με το ρυθμό φθοράς που εμφανίστηκε έπειτα από τη δημιουργία σταθερής κατάστασης ολίσθησης, και επίσης, ότι περίπου το 84% της φθοράς του ελατηρίου σημειώθηκε κατά τα πρώτα είκοσι δύο (22) λεπτά λειτουργίας.

9.1.2 Φθορά των ελατηρίων εμβόλου σε σταθερή κατάσταση ολίσθησης

Σε σταθερή κατάσταση ολίσθησης, που δημιουργείται έπειτα από τη διεργασία ρονταρίσματος των ελατηρίων και του χιτωνίου, οι ρυθμοί φθοράς καθενός εκ των συνεργαζόμενων εξαρτημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την ποιότητα των επιφανειών που προέκυψαν μετά το ροντάρισμα. Αυτοί οι χαμηλοί ρυθμοί φθοράς των εξαρτημάτων μπορεί να παρατηρούνται μέχρι τα εξαρτήματα να τεθούν πλέον εκτός λειτουργίας, λόγω μεγάλης αλλά φυσιολογικής φθοράς με το πέρασμα του χρόνου, εκτός βέβαια εάν καταστραφούν τα ελατήρια ή οι επιφάνειές τους λόγω θερμοχημικής κόπωσης.

9.1.3 Φθορά των πλευρικών επιφανειών των ελατηρίων

Λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ των πλευρικών επιφανειών κάθε ελατηρίου και των υποδοχών που είναι διαμορφωμένες στο έμβολο, και λόγω των δυναμικά μεταβαλλόμενων αξονικών φορτίων των ελατηρίων, εμφανίζεται φθορά στις περιοχές επαφής μεταξύ της υποδοχής και του αντίστοιχου ελατηρίου. Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται αναλυτικότερα στην Παράγραφο

9.2, στην οποία δίνονται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη φθορά των υποδοχών των ελατηρίων.

Η φθορά των πλευρικών επιφανειών ενός ελατηρίου μπορεί να μειωθεί με τη χρήση επικαλύψεων επάνω στις επιφάνειες αυτές.

9.1.4 Φθορά των ελατηρίων λαδιού

Η τριβολογία των ελατηρίων λαδιού δεν αναλύεται ξεχωριστά με μεγάλη λεπτομέρεια σε αυτή την Εργασία, κυρίως λόγω της έλλειψης σχετικών πληροφοριών από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Τα ελατήρια λαδιού λειτουργούν με ένα πάχος λιπαντικού στρώματος το οποίο κατά μέσο όρο είναι μικρότερο από το αντίστοιχο πάχος στα ελατήρια συμπίεσης, λόγω των υψηλότερων ελαστικών δυνάμεων που ασκούν συνεχώς τα ελατήρια λαδιού στη λιπαντική μεμβράνη και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να αγνοηθεί η φθορά των ελατηρίων λαδιού. Κάποιο ποσοστό φθοράς λόγω δευτερευόντων αιτιών εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφόρων τμημάτων σύνθετων ελατηρίων λαδιού (που δεν είναι ενιαία) (Federal-Mogul, 1998). Τα σκληρά σωματίδια άνθρακα που προκύπτουν από τη διεργασία της καύσης παρατηρείται ότι προκαλούν φθορά στο πρόσθετο ελατηριωτό τμήμα (spring expander) των ελατηρίων λαδιού που αποτελούνται από τρία κομμάτια. Η εναζώτωση των επιφανειών αποτελεί ένα μέσο παρεμπόδισης της φθοράς των ελατηρίων λαδιού (Esser, 2002).

9.1.5 Προσομοίωση φθοράς των ελατηρίων εμβόλου

Ο ρυθμός φθοράς μπορεί να προσδιοριστεί μαθηματικά χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Archard:

$$V=kWxs \quad (9.1)$$

όπου:

k ο συντελεστής φθοράς,

W το κάθετο φορτίο,

xs η απόσταση ολίσθησης, και

V ο όγκος που αφαιρέθηκε λόγω φθοράς.

Ο συντελεστής φθοράς k, από την άλλη πλευρά, είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των επιφανειών, του λιπαντικού και των συνθηκών λειτουργίας. Ο συντελεστής φθοράς προσδιορίζεται από εμπειρικές μεθόδους, για παράδειγμα μέσω δοκιμών.

Η φθορά των ελατηρίων εμβόλου και του κυλίνδρου είναι ίσως το πιο δύσκολο φαινόμενο που προσπαθούμε να υλοποιήσουμε σε ένα υπολογιστικό μοντέλο. Ειδικά οι παράμετροι που αφορούν τη φθορά απαιτούν κυρίως εμπειρικά δεδομένα. Ο χρόνος που απαιτείται για την προσομοίωση αυξάνει όταν διάφορα μοντέλα φθοράς περιλαμβάνονται στο λογισμικό της προσομοίωσης. Σε ότι αφορά την προσομοίωση, οι παράμετροι που επηρεάζουν τη φθορά περιλαμβάνουν λιγότερο κατανοητά φαινόμενα σε σχέση με την τριβής ή τη λίπανση. Ακόμη και αν η φθορά θεωρηθεί ως

παράγοντας μικρότερης σημασίας στα υπολογιστικά μοντέλα, πρέπει να θυμόμαστε πάντοτε ότι η φθορά ενός ελατηρίου εμβόλου μεταβάλλει το προφίλ του ελατηρίου. Συνεπώς, η φθορά είναι ένα φαινόμενο που πρέπει να περιλαμβάνεται σε ένα ρεαλιστικό υπολογιστικό μοντέλο. Οι Priest και Taylor διεξήγαγαν μελέτες σχετικά με τη μοντελοποίηση της φθοράς των ελατηρίων εμβόλου και επισημαίνουν ότι όταν δίνεται μεγάλη έμφαση στην κατασκευαστική διαμόρφωση των ελατηρίων εμβόλου με σκοπό να μειωθεί η φθορά τους θα πρέπει να δίνεται έμφαση και στις συνθήκες λίπανσης των ελατηρίων και στις ιδιότητες τριβής (Priest και Taylor, 2000).

Οι ίδιοι ερευνητές εξέτασαν τη συσχέτιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των μετρημένων αποτελεσμάτων σε ότι αφορά τη φθορά. Μοντελοποίησαν το πρώτο ελατήριο σε έναν κινητήρα τύπου Caterpillar 1Y73 και σύγκριναν τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από 120 ώρες λειτουργίας του κινητήρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η φθορά δεν ήταν όμοια σε όλες τις περιοχές κατά μήκος της περιφέρειας του ελατηρίου. Οι κλίσεις που παίρνει το ελατήριο κατά τη λειτουργία του αποτελούν επίσης έναν πολύ σημαντικό παράγοντα που αφορά τη μοντελοποίηση της φθοράς, και οι ερευνητές συμπέραναν ότι το προφίλ λόγω φθοράς που προέκυψε ειδικά για το πρώτο ελατήριο ήταν πολύ σημαντικό κατά τη διάρκεια της δοκιμής που διήρκεσε 120 ώρες. Εξαιτίας της φθοράς, η επιφανειακή τραχύτητα των ελατηρίων και του κυλίνδρου μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας δοκιμής (Priest και Taylor, 2000).

Η φθορά είναι ελάχιστη σε συνθήκες πλήρους υδροδυναμικής ή ελαστοϋδροδυναμικής (EHD) λίπανσης, καθώς οι κορυφές των τραχυτήτων δεν έχουν σχεδόν καμία επαφή. Σε συνθήκες υδροδυναμικής ή ελαστοϋδροδυναμικής λίπανσης δεν είναι αναγκαίο να θεωρηθεί ότι οι επιφάνειες ολίσθησης έρχονται σε επαφή. Εάν, όμως, οι συνθήκες λίπανσης μεταβληθούν σε αυτές της μικτής λίπανσης, όπου υπάρχει μια μικρή επαφή των τραχυτήτων των επιφανειών, το μοντέλο φθοράς γίνεται πιο απαιτητικό, όπως έχει αποδειχθεί από τον Coy (Coy, 1998). Αυτό, αντίστροφα, οδηγεί σε μεταβολές της τριβής των ελατηρίων. Κατά συνέπεια, το προφίλ ενός ελατηρίου πρέπει να διατηρείται με την πάροδο του χρόνου για να κρατά την τριβή του ελατηρίου σε επιθυμητό επίπεδο. Ο Sui και οι συνεργάτες του προτείνουν ότι ο καλύτερος τρόπος για να διατηρηθεί το προφίλ του ελατηρίου είναι η εξέταση των επιπτώσεων του ανάγλυφου της επιφάνειάς του στο αρχικό στάδιο της σχεδίασης του ελατηρίου (Sui και Ariga, 1993).

Με τη βοήθεια ενός μοντέλου μεταβατικής φθοράς, ο Coy μελέτησε τη φθορά του πρώτου ελατηρίου σε σχέση με την απόσταση από το ΑΝΣ. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ο ρυθμός φθοράς είναι μέγιστος στο ΑΝΣ και μειώνεται καθώς το έμβολο κινείται προς το ΚΝΣ. Όταν το έμβολο ξεπεράσει το ήμισυ της διαδρομής του και πλησιάζει στο ΚΝΣ, ο ρυθμός φθοράς αυξάνεται και πάλι. Οι περιοχές όπου εμφανίζεται ο υψηλότερος ρυθμός φθοράς αντιστοιχούν στις περιοχές όπου εμφανίζονται συνθήκες μικτής, ή ενδεχομένως, και οριακής λίπανσης (Coy, 1998).

Η φθορά του προφίλ του ελατηρίου εμβόλου ερευνήθηκε από τον Priest και τους συνεργάτες του. Το μοντέλο λίπανσης που εφαρμόστηκε δεν προσδιορίζει τις περιοδικές μεταβολές της γωνίας κλίσης λόγω στρέψης του ελατηρίου. Ωστόσο, είχε ληφθεί υπόψη κάποιο πρότυπο κλίσης του ελατηρίου με βάση ορισμένες προβλέψεις σχετικά με τις γωνίες κλίσης αυτού. Σε αυτό το μοντέλο φθοράς έλαβαν υπόψη τη φθορά του προφίλ του ελατηρίου και την αποικοδόμηση του λιπαντικού που λάμβανε χώρα κατά τη διάρκεια της δοκιμής 120 ωρών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπήρχε

ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και των πειραματικών δεδομένων (Priest et al., 1999).

Τα εμπορικά λογισμικά προσομοίωσης έχουν περιορισμούς σε ότι αφορά το ρυθμό φθοράς, και απαιτούν ένα συντελεστή φθοράς που να αντικατοπτρίζει τη φθορά και των δύο συνεργαζόμενων επιφανειών. Η μεταβολή στο προφίλ του ελατηρίου λόγω επιφανειακής φθοράς συνήθως αγνοείται και ο κύριος λόγος είναι η αύξηση του χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων που οφείλεται στον παράγοντα αυτόν.

9.2 Φθορά της υποδοχής του ελατηρίου εμβόλου

Η φθορά των παράλληλων επιφανειών στις υποδοχές των ελατηρίων παρατηρείται κυρίως στην υποδοχή του πρώτου ελατηρίου. Ο κύριος λόγος που παρατηρείται φθορά είναι ο συνδυασμός της επίδρασης των δυνάμεων των αερίων και της ακτινικής κίνησης του ελατηρίου, και η διεργασία της φθοράς επιταχύνεται όταν υπάρχει ανεπαρκής λίπανση και υψηλές θερμοκρασίες. Οι λόγοι για τους οποίους παρατηρείται ακτινική κίνηση του ελατηρίου είναι η παραμόρφωση του κυλίνδρου, η δευτερεύουσα κίνηση του εμβόλου και οι κλίσεις που παίρνει το έμβολο κατά τη λειτουργία του λόγω του διακένου μεταξύ αυτού και του κυλίνδρου. Οι μαζικές (αδρανειακές) δυνάμεις, οι δυνάμεις τριβής, η αξονική κίνηση του ελατηρίου καθώς και η περιστροφή του αυξάνουν τη φθορά της υποδοχής του. Η μεταβαλλόμενη πίεση των αερίων καθώς και η μικρή διαφυγή τους προς το στροφαλοθάλαμο, προκαλούν ορισμένες φορές ακτινικές δονήσεις στο ελατήριο, οι οποίες επιταχύνουν τη φθορά της υποδοχής του στις επιφάνειες επαφής με το ελατήριο (Röhrle, 1995, Affenzeller και Gläser, 1996, Federal Mogul, 1998 Mollenhauer, 1997).

Ως αποτέλεσμα της φθοράς, παρατηρείται ότι η επάνω και η κάτω επιφάνεια της υποδοχής του ελατηρίου γίνονται τραχιές και δημιουργείται μια καμπυλότητα στις ακμές τους (Röhrle, 1995, Affenzeller και Gläser, 1996). Εκτός από την παραμόρφωση της υποδοχής που προκύπτει ως συνέπεια της φθοράς, το πλάτος της υποδοχής αυξάνει, οπότε αυξάνει και το πλευρικό (αξονικό) διάκενο μεταξύ του ελατηρίου και της υποδοχής του.

Εκτός των όσων αναφέρθηκαν, το σύστημα τριβής ελατηρίου – υποδοχής μπορεί να επιδεινωθεί και από ενδεχόμενη τήξη του ελατηρίου ως συνέπεια της υπερθέρμανσης του πρώτου ελατηρίου ή από μερικό «άρπαγμα» του εμβόλου λόγω ανεπαρκούς λίπανσης (Willcock, 1996).

Σε ορισμένους κινητήρες ντήζελ επιβατηγών αυτοκινήτων και σε όλους τους προηγμένους πετρελαιοκινητήρες επαγγελματικών οχημάτων, η φθορά των υποδοχών των ελατηρίων σε έμβολα αλουμινίου παρεμποδίζεται από έναν φορέα του ελατηρίου κατασκευασμένο από ωστενιτικό χυτοχάλυβα τύπου Niresist ή άλλα παρόμοια υλικά ανθεκτικά στη φθορά, ο οποίος τοποθετείται στο έμβολο κατά τη διαδικασία της χύτευσης (Mollenhauer, 1997, Röhrle, 1995).

9.3 Φθορά της ποδιάς του εμβόλου

9.3.1 Ήπια φθορά της ποδιάς του εμβόλου

Στο πλαίσιο της διεργασίας του ρονταρίσματος της όλης διάταξης του εμβόλου, μπορεί να παρατηρηθεί φυσιολογική ήπια φθορά στις ωστικές πλευρές της ποδιάς του εμβόλου. Σε συνεχείς συνθήκες λειτουργίας, η φθορά της ποδιάς του εμβόλου είναι συνήθως ασήμαντη, μιας και οι συνθήκες υδροδυναμικής λίπανσης διαταράσσονται μόνο κατά την αντιστροφή της κίνησης στο ΑΝΣ και ΚΝΣ. Η φθορά της ποδιάς του εμβόλου συνήθως παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, παρά τη μείωση της σκληρότητας του υλικού του εμβόλου σε θερμοκρασία λειτουργίας. Για τη βελτίωση των ιδιοτήτων ρονταρίσματος της ποδιάς και για την επίτευξη συνθηκών υδροδυναμικής λίπανσης και χαμηλής φθοράς, οι επιφάνειες της ποδιάς του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις σχετικά με την υφή τους. Τιμές επιφανειακής τραχύτητας της τάξεως των 1,5 ... 3 μm είναι χαρακτηριστικές για την ποδιά του εμβόλου (Röhrlé, 1995). Μαλακές επικαλύψεις πάνω στην ποδιά του εμβόλου μπορούν να εφαρμοστούν για την υποστήριξη μιας ήπιας φθοράς κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του ρονταρίσματος του ζεύγους εμβόλου – κυλίνδρου.

9.3.2 Λειαντική φθορά της ποδιάς εμβόλου

Όταν εισέρχονται λειαντικά σωματίδια (αιθάλη, σκόνη ή μεταλλικά σωματίδια από φθορά) στην ανοχή μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης της ποδιάς του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου, μπορεί να εμφανιστεί σοβαρή λειαντική φθορά της ποδιάς. Αυτού του είδους η φθορά συνήθως συνοδεύεται και με λειαντική φθορά στην επιφάνεια του χιτωνίου του κυλίνδρου. Για τη μείωση της φθοράς της ποδιάς του εμβόλου σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοστεί επικάλυψη αυτής με ένα σκληρό επίστρωμα.

9.4 Φθορά του χιτωνίου του κυλίνδρου

Η φθορά του χιτωνίου του κυλίνδρου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη λειτουργία των ελατηρίων του εμβόλου. Πρακτικές παρατηρήσεις και θεωρητικές αναλύσεις συσχετίζουν το σημαντικότερο ποσοστό της φθοράς στην περιοχή κοντά στο άκρο της διαδρομής του πρώτου ελατηρίου, όπου οι θερμικές, χημικές, διαβρωτικές και λειαντικές συνθήκες είναι σοβαρότερες. Η υψηλή περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο μπορεί να αυξήσει σημαντικά το ποσοστό της τριβοχημικής φθοράς του χιτωνίου, κυρίως σε χαμηλές θερμοκρασίες της επιφάνειας. Η υψηλή φθορά του χιτωνίου του κυλίνδρου συνδέεται επίσης και με το άνω σημείο αντιστροφής της κίνησης του δεύτερου ελατηρίου εμβόλου και, σε μικρότερο βαθμό, με τα κάτω σημεία αντιστροφής της κίνησης όλων των ελατηρίων του εμβόλου. Εναποθέσεις άνθρακα στο έμβολο πάνω από το σετ των ελατηρίων ενδέχεται να αυξήσουν σημαντικά τη φθορά του χιτωνίου του κυλίνδρου στην περιοχή κοντά στο ΑΝΣ (Affenzeller και Gläser, 1996).

Το γυάλισμα της εσωτερικής επιφάνειας του κυλίνδρου, το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελαφρύ, μέσο και προχωρημένο, είναι το πρώτο σύμπτωμα της φθοράς σε έναν κύλινδρο. Το

γυάλισμα του κυλίνδρου σε μικρό βαθμό, αυξάνει την κατανάλωση λιπαντικού. Όταν όμως προχωρήσει σε σημαντικό βαθμό, το μεγαλύτερο μέρος του αναγλύφου της επιφάνειας που προσδίδεται κατά το εσωτερικό ρεκτιφιέ έχει χαθεί, και ο κίνδυνος έλλειψης λιπαντικού και δημιουργίας γραμμώσεων είναι πλέον εμφανής (Dong et al., 1995).

Τα θερμικά φορτία προκαλούν υποβάθμιση του λιπαντικού. Τα χημικά φορτία περιλαμβάνουν αραίωση από καύσιμο, παρουσία όξινων προϊόντων καύσης και υδρατμούς που προέρχονται από τη διαδικασία της καύσης. Η φθορά του κυλίνδρου επιταχύνεται επιπλέον από στερεά σωματίδια άνθρακα που προέρχονται από τη διαδικασία της καύσης, και, ενδεχομένως, από σκόνη στον εισερχόμενο αέρα που μπορεί να συμβάλει στην πρόκληση λειαντικής φθοράς. Φθορά του χιτωνίου του κυλίνδρου παρατηρείται και στο μεσοδιάστημα της διαδρομής των ελατηρίων εμβόλου. Η φθορά του κυλίνδρου είναι υψηλότερη στη δευτερεύουσα ωστική πλευρά σε σχέση με την κύρια ωστική πλευρά, και αυτό οφείλεται στον τρόπο που κατανέμονται οι ωστικές δυνάμεις κατά τη διάρκεια διαφόρων κύκλων του κινητήρα (Dong et al., 1995, Priest και Taylor, 2000).

Διάφορες δοκιμές έχουν δείξει ότι η φθορά ενός χιτωνίου κυλίνδρου παρατηρείται κυρίως στην αρχή της διαδικασίας του ρονταρίσματος (Ma et al., 1998), με τους ρυθμούς φθοράς κατά τη διάρκεια της πρώτης ώρας λειτουργίας να είναι περίπου 12 φορές υψηλότεροι σε σχέση με αυτούς που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της δεύτερης ή τρίτης ώρας λειτουργίας, και επίσης η σημαντικότερη φθορά παρατηρείται κοντά στην περιοχή αντιστροφής κίνησης του πρώτου ελατηρίου (Henein et al., 1998). Σύμφωνα με δοκιμές που έγιναν από τον Ma και τους συνεργάτες του, ο ρυθμός φθοράς ενός χιτωνίου κυλίνδρου σταθεροποιείται μετά από 3,5 ώρες. (Ma et al., 1998). Στα Κεφάλαια 4 και 10 παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι μείωσης της φθοράς του χιτωνίου του κυλίνδρου.

10. Τεχνολογίες κατεργασίας επιφανειών

10.1 Τεχνικές επικάλυψης και κατεργασίας επιφανειών

Διάφορες τεχνικές επικαλύψεων και κατεργασίας των επιφανειών προσφέρουν πολλές δυνατότητες βελτίωσης των ιδιοτήτων ολίσθησης των μεταλλικών επιφανειών. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης, επικαλύψεις και τεχνικές κατεργασίας των επιφανειών χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα ή περισσότερα εξαρτήματα του συστήματος εμβόλου – ελατηρίων – χιτωνίου.

Οι τρέχουσες ποικιλίες επικαλύψεων και κατεργασίες επιφανειών που χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα μηχανών καλύπτουν ένα εύρος διαφόρων επικαλύψεων και αναπτυσσόμενων τεχνικών. Διάφοροι τύποι επιφανειακών επικαλύψεων και τεχνικές κατεργασίας αναπτύσσονται συνεχώς και καινούριες ομάδες επικαλύψεων παρουσιάζονται στην αγορά, και ακόμη περισσότερες μέθοδοι κατεργασίας αναπτύσσονται και αποτιμούνται πειραματικά. Δύο διαφορετικές ομάδες από τεχνικές χρησιμοποιούνται σήμερα σε εμπορικές εφαρμογές για την επίστρωση αντιτριβικών επικαλύψεων των ελατηρίων εμβόλου και ονομάζονται η μία ως θερμικός ψεκασμός και η άλλη ως γαλβανική επικάλυψη. Μία τρίτη, ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος επιφανειακής κατεργασίας των ελατηρίων εμβόλου, είναι η εναζώτωση της επιφάνειας, που είναι ένας συνδυασμός σκλήρυνσης και κατεργασίας επικάλυψης για την παραγωγή μιας σύνθετης δομής σιδήρου-αζώτου στην επιφάνεια του ελατηρίου (δηλαδή είναι μια διαδικασία σκλήρυνσης επιφανειών που διεξάγεται κατά τη θέρμανση σιδηρικού κράματος σε μια υποκρίσιμη θερμοκρασία και σε ατμόσφαιρα αμμωνίας ή άλλης χημικής ένωσης του αζώτου). Επιπρόσθετα με αυτά, εφαρμόζονται και μαλακές επικαλύψεις για τη μείωση της τριβής. Νέοι τύποι επικαλύψεων αναπτύσσονται συνεχώς σε εργαστηριακό περιβάλλον και υπάρχουν προβλέψεις ότι τελικά θα χρησιμοποιηθούν σε μηχανές παραγωγής.

Επικαλύψεις στην επιφάνεια επαφής ενός ελατηρίου μπορεί να αποδειχθούν ευαίσθητες σε αποφλοίωση στις ακμές της γεωμετρίας του, και συνεπώς για το λόγο αυτό λαμβάνονται προφυλάξεις όπως η δημιουργία καμπυλότητας στις ακμές (πριν ή μετά την κατεργασία επικάλυψης), και η χρήση επικάλυψης μέρους της επιφάνειας επαφής και όχι ολόκληρης (ISO 6621-4).



Θερμικός ψεκασμός

Ψεκασμός με πλάσμα και άλλοι τύποι θερμικών ψεκασμών επικάλυψης συνήθως χρησιμοποιούνται στα ελατήρια μηχανών diesel με μεγάλες διαμέτρους κυλίνδρων. Οι επικαλύψεις δημιουργούνται υπό μορφή κόνεως (σκόνης) η οποία θερμαίνεται και εκτοξεύεται πάνω στο πρόσωπο του ελατηρίου. Η θερμοκρασία της σκόνης, και η αύξηση της θερμοκρασίας που οφείλεται στον διασκορπισμό της θερμικής ενέργειας κατά την σύγκρουση των σωματιδίων της σκόνης επάνω στο πρόσωπο του ελατηρίου, προκαλεί τήξη των σωματιδίων και προσκόλλησή τους στο πρόσωπο του ελατηρίου. Κατεργασίες που απαιτούν υψηλότερα ποσά ενέργειας συμπεριλαμβάνουν τον ψεκασμό με πλάσμα, τον ψεκασμό με ειδική εκτονωτική συσκευή και μια μέθοδο όπου χρησιμοποιείται οξυγόνο σε υψηλή ταχύτητα (HVOF) (Holmberg και Matthews, 1994). Για επικαλύψεις θερμικού ψεκασμού, χρησιμοποιούνται συνήθως σκόνες με καρβίδια του σιδήρου με μια μεταλλική συνδετική φάση, ή απλή φάση ή σύνθετες κεραμικές σκόνες. Η μέθοδος ψεκασμού με εκτίναξη χρησιμοποιείται για την επίστρωση επικαλύψεων τύπου Fe-Mo (Durga et al., 1998.).

Ελατήρια επικαλυμμένα με μολυβδαίνιο, με επικάλυψη μολυβδαινίου σε ολόκληρο το πλάτος του προσώπου ή σαν εσωτερική ενισχυτική επικάλυψη τμήματος του πλάτους του ελατηρίου, χρησιμοποιούνται από πολλούς κατασκευαστές μηχανών diesel (ISO 6621-4). Η επικάλυψη από μολυβδαίνιο είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρεμπόδιση της διάβρωσης από τα καυσαέρια που προκαλεί φθορά στην επιφάνεια του προσώπου του ελατηρίου, και η οποία συμβαίνει κατά τη διάρκεια διαφυγής καυσαερίων από το θάλαμο καύσης (Affenzeler και Glaser, 1996, Brauers και Neuhauser, 1989). Το μολυβδαίνιο είναι ένα υλικό αντιτριβής που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (Glaeser, 1992). Η αντίσταση της επικάλυψης μολυβδαινίου έναντι της προσκόλλησης άλλων σωματιδίων επάνω της (π.χ. εξανθρακώματα), μπορεί να προσδιοριστεί με την τυποποιημένη δοκιμή ASTM D633, και ελέγχεται από παραμέτρους της διαδικασίας επικάλυψης (Babu et al., 1996).

Σε μία πρόσφατη μελέτη, ο Harrison περιγράφει επικαλύψεις με ψεκασμό θερμικού πλάσματος σε ατμοσφαιρική πίεση για επιφάνειες κυλίνδρων σε αλουμινένια μπλοκ μηχανών παραγωγής, και αναφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα που έχουν επιτευχθεί με κράματα Fe-C που εν μέρει οξειδώνονται κατά τη διαδικασία της εναπόθεσης, σχηματίζοντας ολισθηρά οξειδία του σιδήρου όπως Fe-O και Fe₃O₄. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και με τη χρήση κραμάτων με βάση σιδήρου, ανθεκτικών στη διάβρωση και στην επίδραση του θείου, που περιείχαν χρώμιο και μολυβδαίνιο (Harrison, 2002). Για παρόμοιου είδους εφαρμογές, ενθαρρυντικά αποτελέσματα έχουν προκύψει με θερμικό ψεκασμό επικαλύψεων οξειδίων του τιτανίου (TiO₂ ή TiO_x) σε υποστρώματα αλουμινίου (Buchmann και Gadow, 2001). Μία εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης της τριβολογικής απόδοσης των μηχανών με αλουμινένια μπλοκ είναι η χρήση εμβόλων που διαθέτουν επικαλύψεις.

Για αδιαβατικές μηχανές diesel, ο Gaydos και οι συνεργάτες του έχουν επιτυχώς μελετήσει την χρήση επικάλυψης οξειδίων του χρωμίου (Cr₂O₃) επάνω σε χιτώνιο κυλίνδρου σε συνεργασία με μια επικάλυψη ελατηρίου εμβόλου από δισεληνίου του βολφραμίου (WSe₂) (Glaeser και Gaydos, 1993). Για παρεμφερείς εφαρμογές, π.χ μηχανές diesel με μικρή απαγωγή θερμότητας από το θάλαμο καύσης, οι Haselkorn και Kelley έχουν μελετήσει την τριβολογική απόδοση αντιπροσωπευτικών τύπων ελατηρίων και χιτωνίων επικαλυπτόμενα με ψεκαζόμενο θερμικό πλάσμα με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα – σίδηρο – μολυβδαίνιο και επικαλύψεις με ψεκαζόμενο θερμικό πλάσμα οξειδίων χρωμίου – πυριτίου, και συμπέραναν πως οι επικαλύψεις αυτές είναι πολύ ικανοποιητικές για χρήση επάνω στις επιφάνειες ολίσθησης των χιτωνίων ή της ποδιάς των εμβόλων (Haselkorn και Kelley, 1992).

Επικαλύψεις με ψεκασμό καρβιδίου του χρωμίου με τη μέθοδο HVOF, προτείνονται από τον Shuster και τους συνεργάτες του ως μια αποτελεσματική μέθοδος προστασίας έναντι απόξεσης και φθοράς λόγω τριβής (Shuster et al., 1999). Μελέτες που έγιναν από τον Durga και τους συνεργάτες του έδειξαν μία μείωση στο συντελεστή τριβής όταν εφαρμόστηκε ψεκαζόμενο θερμικό πλάσμα πορώδους FFS (Ανοξειδωτός χάλυβας + Ni-BN) ή επικαλύψεις τύπου M-1P (Fe-FeO-C), κατά τη σύγκριση επιφανειών με ίδια επιφανειακή τραχύτητα, και ακόμη χαμηλότερους συντελεστές τριβής με τη χρήση πορώδους και εσωτερικά ρεκτιφιαρισμένης επιφάνειας (Durga et al., 1998). Πειραματικές μελέτες από τον Ahn και τους συνεργάτες του, επάνω στη χρήση ψεκαζόμενου θερμικού πλάσματος από οξείδιο του ζirkονίου σε συνεργασία με επιχρωμιωμένο χάλυβα και σε παλινδρομικές, μη λιπασμένες επιφάνειες υπό θερμοκρασία 200°C, έδειξαν ότι η αντίσταση των επικαλύψεων στη φθορά λόγω τριβής ήταν εμφανώς καλύτερη από την αντίστοιχη του χυτοσιδήρου

στους ίδιους τύπους δοκιμών. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο σχηματισμό ενός στρώματος μικροσωματιδίων που προκύπτουν λόγω αρχικής φθοράς, και το οποίο στη συνέχεια δρα προστατευτικά έναντι περαιτέρω φθοράς (Ahn et al., 1997). Δοκιμές μηχανών με προηγμένες επικαλύψεις καρβιδίου του χρωμίου (Cr_2C_3) έδειξαν τις δυνατότητες αυτής της ομάδας επικαλύψεων, ιδίως όταν περιλαμβάνεται μολυβδαίνιο στη σύσταση των επικαλύψεων (Rastegar και Richardson, 1997). Δοκιμές μηχανών (υπό κανονική κλίμακα) με χυτοσιδηρά ελατήρια εμβόλων που διέθεταν επικάλυψη από συνδυασμό αλουμινίου και μπρούντζου επάνω σε χιτώνια με επικάλυψη τύπου Cr_3C_2 , καθώς επίσης και μηχανές με χυτοσιδηρά ελατήρια εμβόλων και χυτοσιδηρούς κυλίνδρους που αμφοτέρω διέθεταν επικαλύψεις τύπου Cr_2O_3 , έχουν δώσει ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε ότι αφορά την ευαισθησία από άποψη τριβής και λίπανσης (Miyake et al., 2001).

Τα στρώματα επικαλύψεων με τη μέθοδο του θερμικά ψεκαζόμενου πλάσματος ή άλλης μεθόδου θερμικού ψεκασμού στην επιφάνεια επαφής ενός ελατηρίου μπορούν να εφαρμοστούν ως ένα ενιαίο (με μικρή απόκλιση) στρώμα ή σαν μία ενίσχυση στην υποδοχή, που σημαίνει ότι το αποτελεσματικό πλάτος του μέρους που επικαλύπτεται είναι λιγότερο από το πραγματικό πλάτος του προσώπου του ελατηρίου (Federal Mogul, 1998, Mollenhauer, 1997, ISO 6621-4).

Οι επιστρώσεις από θερμικά ψεκαζόμενο κεραμικό ή από σύνθετες ενώσεις κεραμικού-μετάλλου πρέπει να επιστρωθούν, να κατεργαστούν με εσωτερικό ρεκτιφιέ ή να λειανθούν πριν τεθούν σε χρήση οι επιφάνειες, και το φινίρισμα των επιφανειών πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά και ξεχωριστά για κάθε ένα σύστημα επικάλυψης (Radil, 2001).



Ηλεκτροχημική επικάλυψη

Οι γαλβανικές, ή ηλεκτροχημικές, επικαλύψεις βασίζονται σε έναν δότη ανόδου, έναν ηλεκτρολύτη και σε μία πηγή ηλεκτρικής ισχύος. Κατά τη διαδικασία επικάλυψης, μεταλλικά ιόντα από την άνοδο κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη προς το υπόστρωμα με ρυθμό που καθορίζεται από την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (Holmberg και Matthews, 1994). Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη γαλβανική επικάλυψη για την προστασία από τη φθορά των ελατηρίων είναι η σκληρή επιμετάλλωση χρωμίου.

Σε ηλεκτροχημικές επιμεταλλώσεις χρωμίου, το χρωμικό οξύ (H_2CrO_4), ή το υδατικό διάλυμα του τριοξειδίου του χρωμίου (CrO_3), ενεργούν σαν δότες χρωμίου, ενώ χρησιμοποιείται και μία αδρανής άνοδος (Newby, 2000). Στις ηλεκτροχημικές επιμεταλλώσεις, τα στοιχεία που θα επιμεταλλωθούν λειτουργούν σαν κάθοδοι, και σαν περιοχές σχηματισμού αερίου υδρογόνου. Προφυλάξεις κατά τη διαδικασία εναπόθεσης, ή μετά την διαδικασία μπορεί να κριθούν απαραίτητες για την αποφυγή διάσπασης του υδρογόνου πάνω στην επιφάνεια του επικαλυπτόμενου υλικού.

Από το 1940 σκληρές επικαλύψεις χρωμίου, συχνά έχουν παραχθεί ως πορώδεις υλικό. Αρχικά η πορώδης επικάλυψη χρωμίου αναπτύχθηκε για εφαρμογές σε ελατήρια και σε αλουμινένιους κυλίνδρους αεροσκαφών και μηχανών ντήζελ. Διάφορες μηχανικές και χημικές τεχνικές εφαρμόζονται για την επίτευξη της πορώδους επιφάνειας. Επειδή η επικαλυπτόμενη με σκληρό χρώμιο επιφάνεια είναι σχετικά τραχιά, συνήθως απαιτείται εσωτερικό ρεκτιφιέ, μηχανουργική κατεργασία φινιρίσματος, ή στίλβωση και ακολουθεί καθαρισμός προτού τεθεί σε λειτουργία (Newby, 2000). Πρακτικά, όλα τα επιμεταλλωμένα με χρώμιο ελατήρια υφίστανται εσωτερικό ρεκτιφιέ ή γυάλισμα μετά την απόθεση της επίστρωσης, αλλά και κατά τη διάρκεια αυτής, κατά την

οποία ταυτόχρονα δίδεται βαρελοειδές ή άλλο προφίλ στο πρόσωπο των ελατηρίων. Ένα τυπικό χαρακτηριστικό των επικαλύψεων σκληρού χρωμίου στα ελατήρια είναι το δίκτυο από λεπτές ρωγμές που καλύπτουν την επιφάνεια και προβλέπει σημεία συγκράτησης του λιπαντικού. Από περιβαλλοντικής άποψης, η χρήση επιμεταλλωμένων με χρώμιο ελατήρια είναι λιγότερο επιθυμητή απ' ό,τι η χρήση μη επιμεταλλωμένων με χρώμιο χαλύβδινων ελατηρίων (Affenzeller and Glaser, 1996).

Τα επιμεταλλωμένα με χρώμιο ελατήρια έχουν αποδεδειγμένη αντοχή σε μακροχρόνια χρήση. Σοβαρή φθορά λόγω τριβής των επιμεταλλωμένων με χρώμιο ελατηρίων μπορεί, παρ' όλα αυτά, να προκύψει λόγω ανεπαρκούς ποσότητας λιπαντικού στην επιφάνεια του χιτωνίου του κυλίνδρου, λόγω δημιουργίας μαρτενσίτη στην επιφάνεια του χιτωνίου του κυλίνδρου, ή θερμομηχανικής κόπωσης της επικάλυψης (Shuster et al., 1999). Η αντίσταση στη λειαντική φθορά ενός ελατηρίου με επικάλυψη σκληρού χρωμίου μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη σκληρών κεραμικών σωματιδίων στην επικάλυψη κατά τη διάρκεια της εναπόθεσής της (Federal Mogul, 1998). Επικαλύψεις σκληρού χρωμίου έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της αντίστασης στην φθορά λόγω τριβής στις υποδοχές των ελατηρίων σε κεφαλές εμβόλων από σύνθετες ενώσεις χάλυβα (Röhrle, 1995).

Γαλβανικά (ηλεκτροχημικά) υλικά επικαλύψεων τα οποία επιπλέον περιέχουν χαλκό (Cu) και κασσίτερο (Sn) χρησιμοποιούνται επίσης σαν επικαλύψεις για τη μείωση της τριβής των επιφανειών επαφής των ελατηρίων (Federal Mogul, 1998).

Επίσης, βελτιωμένη αντίσταση στη φθορά λόγω τριβής και στη δημιουργία γραμμώσεων σε έμβολα από αλουμίνιο, τα οποία συνεργάζονται με χιτώνια κυλίνδρων από υπερειθηκτικά κράματα αλουμινίου-πυριτίου, μπορεί να προκύψει με χρήση φερριτικών επιμεταλλώσεων στην ποδιά του εμβόλου (Affenzeller και Claser, 1996). Πειράματα σχετικά με τη δημιουργία γραμμώσεων από τους Wang και Tung με διάφορες επικαλύψεις επάνω σε ποδιές εμβόλων και σε αλουμινένια χιτώνια κυλίνδρων, έδειξαν ότι μια επιλεκτική επιμετάλλωση Ni-W και μια επιμετάλλωση κεραμικών σωματιδίων Ni-P-BN μπορούν να προσφέρουν τα ίδια τριβολογικά πλεονεκτήματα με μια επικάλυψη σιδήρου (Wang και Tung, 1999).



Εναζώτωση και ανθρακοεναζώτωση

Η επιφανειακή εναζώτωση και η ανθρακοεναζώτωση είναι διαδικασίες παραγωγής σκληρυμένων επιφανειών αποτελούμενων από νιτρίδιο του σιδήρου, ή ένα σκληρότερο ανθρακονιτρίδιο του σιδήρου, στην περιοχή του υλικού του ελατηρίου, και μίας ζώνης διάχυσης μεταξύ του στρώματος νιτρίδιου και του υποστρώματος του υλικού. Κατά τη διάρκεια της επιφανειακής κατεργασίας, το υλικό του χάλυβα εκτίθεται είτε σε ατμόσφαιρα που περιέχει άζωτο, είτε σε λουτρό τηγμένου άλατος ή σε κατεργασία με θερμικό πλάσμα σε υψηλή θερμοκρασία (450...610°C ανάλογα με την κατεργασία), και με τον τρόπο αυτό προκαλείται διάχυση του αζώτου (και του άνθρακα) μέσα στη δομή του χάλυβα, και ταυτόχρονα δημιουργία αντιδράσεων μεταξύ των ατόμων του σιδήρου, του αζώτου και του άνθρακα. Η διαδικασία τελειώνει με ψύξη σε ρυθμό που δίνει τις επιθυμητές ιδιότητες σε σκληρότητα και αντοχή. Στις διαδικασίες με λουτρό τηγμένου άλατος, χρησιμοποιούνται συνήθως κυανιούχα και κυανικά άλατα. Η εναζώτωση με αέριο πραγματοποιείται

με αμμωνία, με την προσθήκη διοξειδίου του άνθρακα ή μονοξειδίου του άνθρακα, εάν είναι επιθυμητή η ανθρακοεναζώτωση. Η εναζώτωση με θερμικό πλάσμα χρησιμοποιεί ένα μίγμα οξυγόνου και αζώτου σαν ένα δότη αζώτου, και η διαδικασία ενεργοποιείται από ηλεκτρικές εκκενώσεις σε έναν μονωμένο θάλαμο. Η κινητική των αντιδράσεων, το βάθος της διάχυσης των ατόμων αζώτου στη δομή του χάλυβα και το βάθος της σκληρότητας, ελέγχονται από το είδος της κατεργασίας που ακολουθείται, από τη θερμοκρασία και τη χρονική διάρκεια. Η εναζώτωση με αέριο απαιτεί το μεγαλύτερο χρόνο κατεργασίας, δηλαδή 20...100 ώρες, ενώ το λουτρό τηγμένου άλατος απαιτεί τη μικρότερη διάρκεια, από 10 λεπτά έως 4 ώρες. Το πάχος του στρώματος νιτριδίου και το πάχος της ζώνης διάχυσης εξαρτάται από την κατεργασία και το υπόστρωμα του υλικού. Η επιφανειακή σκληρότητα που λαμβάνεται από την κατεργασία εναζώτωσης εξαρτάται από το υλικό, με αντιπροσωπευτική τιμή τα 1300 HV ως ένας τυπικός μέσος όρος των διαφόρων υλικών ελατηρίων από χάλυβα και χυτοσίδηρο (Brauers και Neuhäuser, 1989, Federal Mogul, 1998).

Η φθορά των ελατηρίων που έχουν υποστεί ανθρακοεναζώτωση και που έχουν κατασκευαστεί από ειδικό χάλυβα έχει διαπιστωθεί σχεδόν ίδια σε δοκιμές με υψηλή θερμοκρασία, ανεξάρτητα από το είδος της κατεργασίας εναζώτωσης. Η ανταπόκριση των διαφόρων υλικών των ελατηρίων στην εναζώτωση είναι εμφανής από τις διαφορές του ρυθμού φθοράς λόγω τριβής σε δοκιμές μηχανών, όπου ανθρακοεναζωτωμένα κράματα χρωμιούχων χαλύβων είναι ανθεκτικότερα σε σχέση με εναζωτωμένους χυτοσιδήρους ή χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα άλλων στοιχείων σε ότι αφορά την αντίσταση στη φθορά. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι κλασσικές επιμεταλλώσεις χρωμίου στα ελατήρια αποδείχθηκαν εξίσου ή περισσότερο ανθεκτικές στη φθορά απ' ότι τα εναζωτωμένα ελατήρια (σε δοκιμές μηχανών). Για μικρότερες μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν υπό χαμηλότερα φορτία και για τις οποίες δεν συνιστώνται ελατήρια με επιμεταλλώσεις χρωμίου ή μολυβδαινίου, τα ανθρακοεναζωτωμένα ελατήρια μπορούν άνετα να χρησιμοποιηθούν, όπως συμβαίνει στην πλειοψηφία των μηχανών παραγωγής. Σε δοκιμές μηχανών, ο μηχανισμός φθοράς λόγω τριβής στην επιφάνεια επαφής και στην υποδοχή του ελατηρίου ήταν ίσος ή μεγαλύτερος σε σχέση με την περίπτωση απλών χυτοσιδηρών ελατηρίων. Η διαβρωτική προσβολή των ανθρακοεναζωτωμένων ελατηρίων είναι σημαντική και ο ρόλος της στη συνολική φθορά των ελατηρίων μπορεί να είναι σημαντικός, ιδιαίτερα σε μηχανές μικρότερης διάρκειας ζωής (Brauers και Neuhäuser, 1989).

Χαλύβδινες επιφάνειες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, οι οποίες έχουν υποστεί κατεργασία με αλουμίνιο πριν εναζωτωθούν, παρουσιάζουν υψηλότερη σκληρότητα απ' ότι η απλή εναζώτωση χαλύβδινων επιφανειών με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, που εν μέρει οφείλεται στο σχηματισμό νιτριδίου του αλουμινίου (AlN) στη δομή της επιφάνειας (Bindoumadhavan et al., 1998).

Η διαδικασία εναζώτωσης, υπόκειται σε συνεχείς προσπάθειες ανάπτυξης, όπως για παράδειγμα προσφάτως έχει μελετηθεί η εναζώτωση φαιού χυτοσιδήρου με τη βοήθεια οξυγόνου-θείου (Baranowska, 1998).



Οξείδωση του σιδήρου

Η οξείδωση του σιδήρου μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις επιφάνειες ενός μη επικαλυμμένου ελατηρίου (ISO 6621-4).



Επικαλύψεις γραφίτη

Οι επικαλύψεις γραφίτη εφαρμόζονται στις αλουμινένιες και χυτοσιδηρές επιφάνειες ποδιών εμβόλου σαν ρητίνη που περιέχει χρωστικές ουσίες. Η μέθοδος που ονομάζεται Grafal[®] βασίζεται σε μία φαινολική ρητίνη με κολλοειδή γραφίτη. Η συγκόλληση των επικαλύψεων από γραφίτη μπορεί να βελτιωθεί εφαρμόζοντας ένα μεταλλικό φωσφορικό στρώμα στην επιφάνεια πριν την εφαρμογή της επικάλυψης (Röhrlle, 1995, Mollenhauer, 1997). Μία εξατομικευμένη επικάλυψη με ψεκάσμο, αποτελούμενη από εποξική ρητίνη (συνθετικές ρητίνες που σχηματίζονται από την συμπίκνωση επιχλωροϋδρίνης και διφαινόλης Α), νιτρίδιο του βορίου, διθειούχο μολυβδαίνιο και γραφίτη επάνω στις ποδιές των εμβόλων και στα χιτώνια κυλίνδρων, έχουν μελετηθεί από τον Durga και τους συνεργάτες του, όπου ανακάλυψαν ότι το νιτρίδιο του βορίου πρέπει να διατηρείται κάτω από ένα ορισμένο όριο, προκειμένου να κατασταλεί η φθορά λόγω τριβής στο χιτώνιο του κυλίνδρου (Durga et al., 1998).



Αντιδράσεις εναλλαγής ιόντων

Λεπτά στρώματα μολύβδου (Pb) και κασσιτέρου (Sn) παράγονται επάνω στις επιφάνειες της ποδιάς του εμβόλου από αντιδράσεις εναλλαγής ιόντων, εφαρμόζοντας άλατα Pb και Sn επάνω στις επιφάνειες για έναν ορισμένο χρόνο αντίδρασης. Αυτά τα λεπτά στρώματα Pb και Sn είναι μαλακά και βελτιώνουν τις ιδιότητες ολίσθησης στις περιοχές επαφής της ποδιάς του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου, και έχουν χρησιμοποιηθεί εμπορικά σε μεγάλο βαθμό (Röhrlle, 1995).



Επικαλύψεις φωσφορικού άλατος

Μία φωσφορική επικάλυψη (φωσφορικού ψευδαργύρου ή φωσφορικού μαγγανίου) μπορεί να σχηματιστεί επάνω στα ελατήρια από χημική αντίδραση με φωσφορικούς κρυστάλλους. Το φωσφορικό στρώμα είναι πιο μαλακό από ότι το υλικό του ελατηρίου και βοηθά στο ροντάρισμα. Επίσης, βοηθά στην αποφυγή σχηματισμού γραμμώσεων (Federal Mogul, 1998, ISO 6621-4).



Ανοδίωση

Ανοδίωση είναι η ονομασία που δόθηκε σε μία ελεγχόμενη ηλεκτροχημική διαδικασία για την επίτευξη πυκνών οξειδίων του αργιλίου στην επιφάνεια του αλουμινένιου στοιχείου. Με μια σκληρή κατεργασία ανόδου μπορούν να επιτευχθούν παχύτερα στρώματα. Η ανοδίωση έχει μελετηθεί αναφορικά με τη χρήση της στις ποδιές των εμβόλων, που συνεργάζονται με τα χιτώνια των κυλίνδρων, αλλά αποδείχτηκε μία λιγότερο επιτυχής λύση (Wang και Tung, 1999). Σκληρή ανοδίωση έχει εφαρμοστεί περιστασιακά στην άνω επιφάνεια των ελατηρίων για προστασίας από υψηλά θερμικά φορτία (Röhrlle, 1995).



Εμφύτευση ιόντων

Υπάρχει μια κατεργασία κατά την οποία εκτίθεται η μεταλλική επιφάνεια σε μεταλλικά ιόντα που έχουν επιταχυνθεί, όπως π.χ. ιόντα αζώτου ή τιτανίου, που διαχέονται μέσα σε ένα ορισμένο βάθος του υλικού. Η κατεργασία αυτή ονομάζεται «εμφύτευση ιόντων». Η εμφύτευση ιόντων αυξάνει τη σκληρότητα των μετάλλων χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τη μικρογεωμετρία της επιφάνειας. Η

κατεργασία αυτή έχει αποδειχτεί επιτυχής σε πολλές εφαρμογές. Παρόλα αυτά, μελέτες από τον Qui και τους συνεργάτες του έχουν δείξει έπειτα από δοκιμές ότι η εμφύτευση ιόντων αζώτου από μόνη της δεν επαρκεί για τη βελτίωση της τριβολογικής απόδοσης των υλικών που χρησιμοποιούνται στα έμβολα αλουμινίου (Qui et al., 1996).



Μέθοδοι κενού

Οι νέες τεχνικές επιφανειακής επικάλυψης που φαίνεται να βρίσκουν εφαρμογή στα ελατήρια εμβόλου, συγκαταλέγονται μεταξύ εκείνων των επικαλύψεων άνθρακα που η σκληρότητά τους πλησιάζει αυτή του διαμαντιού, επικαλύψεων νιτριδίων του τιτανίου, νιτριδίων του χρωμίου, και άλλων τύπων επικαλύψεων PVD και CVD που παράγονται υπό μερικό κενό.

Οι σκληρές επικαλύψεις άνθρακα (DLC) των οποίων η σκληρότητα πλησιάζει αυτή του διαμαντιού, καταδεικνύουν ευνοϊκές επιπτώσεις στην τριβή και στις ιδιότητες φθοράς σε τριβολογικές μελέτες (Ronkainen, 2001). Αυτή η ομάδα επικαλύψεων προσφέρει δυνατότητες για τη χρήση επικαλύψεων στα ελατήρια. Πειράματα σχετικά με τη δημιουργία γραμμώσεων από τους Wang και Tung σε διάφορες επικαλύψεις ποδιάς εμβόλων και σε χιτώνια κυλίνδρων από αλουμίνιο, έδειξαν ότι μία επικάλυψη τύπου PVD και DLC με ένα ενδιάμεσο στρώμα πυριτίου μπορεί να προσφέρει χαμηλότερη τριβή, αλλά προκαλεί μεγαλύτερη φθορά απ' ό,τι οι τρέχουσες επικαλύψεις σιδήρου (Wang και Tung, 1999). Δοκιμές υπό κλίμακα (με μικρότερα μοντέλα κινητήρων) με δείγματα ελατηρίων που διέθεταν επικαλύψεις τύπου DLC σε παλινδρομικές διατάξεις, έδειξαν ότι αυτή η ομάδα επικαλύψεων μπορεί να προσφέρει μείωση της τριβής και της φθοράς, ιδιαίτερα όταν η επικάλυψη τύπου DLC ενισχύεται με κατάλληλα μεταλλικά ιόντα (Aps et al., 1996). Τα τριβολογικά οφέλη από την εφαρμογή μιας σκληρής επικάλυψης άνθρακα τύπου a-C:HMe με μεταλλικές προσμίξεις, επάνω σε έμβολα που συνεργάζονται με υδραυλικούς κυλίνδρους, σε ότι αφορά τη μείωση της φθοράς και της τριβής, παρουσιάστηκαν από τους Vetter και Nevoigt (Vetter και Nevoigt, 1999). Για την υλοποίηση των τελευταίων αποτελεσμάτων σε μηχανές εσωτερικής καύσης θα απαιτηθεί να ληφθούν υπόψη και συμπληρωματικές έρευνες.

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση πολλαπλών στρωμάτων τιτανίου – νιτριδίου του τιτανίου (Ti/TiN) σε σύγκριση με αυτά της ηλεκτρολυτικής εναπόθεσης επικαλύψεων Cr και της χρήσης φωσφορικών αλάτων στις επιφάνειες ελατηρίων, έχουν επίσης αποδειχθεί από τον Zhuo και τους συνεργάτες του με τη βοήθεια πειραμάτων σε μοντέλα τμημάτων (τομέων) ελατηρίου και χιτωνίου κυλίνδρου, όπου οι επικαλύψεις όλων των παραπάνω τύπων παρουσίασαν λιγότερες φθορές, ειδικά αυτές των Ti/TiN. (Zhuo et al., 2000).

Επικαλύψεις νιτριδίων του χρωμίου (CrN and Cr₂N) έχουν μελετηθεί μέσω δοκιμών μοντέλων σχετικά με φθορές από τον Broszeit, τον Friedrich και τους συνεργάτες του, όπου ανακάλυψαν ότι αυτές οι επικαλύψεις μειώνουν τη φθορά περίπου στο ένα δέκατο της φθοράς που εμφανίστηκε με την κατεργασία ηλεκτρολυτικής εναπόθεσης χρωμίου, ενώ ο συντελεστής τριβής είναι παρόμοιος με αυτόν που προέκυψε από επικαλύψεις τύπου Cr_xN και Cr. Η ανάγκη επανασχεδιασμού ολόκληρου του συστήματος τριβής με αναφορά στις σκληρές λεπτές επιστρώσεις επισημαίνεται από τους μελετητές (Friedrich et al., 1997, Broszeit et al., 1999). Οι Haselkorn και Kelley μελέτησαν την τριβολογική συμπεριφορά δειγμάτων ελατηρίου και χιτωνίου που διέθεταν επικαλύψεις CrN των οποίων η εναπόθεση έγινε με χαμηλής θερμοκρασίας τόξο ατμών και βρήκαν τις επικαλύψεις αυτές

ιδιαίτερα χρήσιμες για τις περιοχές της ποδιάς του εμβόλου και του χιτωνίου του κυλίνδρου (Haselkorn και Kelley, 1992).

10.2 Επιφανειακή τραχύτητα

Οι αποκλίσεις από την απόλυτη μαθηματική γεωμετρία μπορούν να εκφραστούν ως αποκλίσεις μορφής, αποκλίσεις επιφανειακής τραχύτητας και επιφανειακών κυματισμών. Οι διάφορες θεωρήσεις παραπέμπουν στο ύψος της κυματοειδούς μορφής των αποκλίσεων από την απόλυτη μορφή, με τις ατέλειες μορφής να εκπροσωπούν το μεγαλύτερο μέρος των αποκλίσεων και την επιφανειακή τραχύτητα το μικρότερο μέρος των αποκλίσεων (Ohlsson, 1996). Κάθε μια από τις παραπάνω παραμέτρους επιδρά στην τριβολογική συμπεριφορά του ζεύγους έμβολο-κύλινδρος. Οι ατέλειες μορφής, κυματοειδής επιφάνειες και επιφανειακή τραχύτητα των εμβόλων και των χιτωνίων του κυλίνδρου (Lenhof και Zwein, 2002) μπορούν να προσδιοριστούν μετρητικά από μετρήσεις της κυκλικότητας και της επιφανειακής τραχύτητας. Για τα ελατήρια, τα οποία είναι ελαστικά, η πρωταρχική ανάγκη είναι να προσδιοριστεί η επιφανειακή τραχύτητα.

Η επιφανειακή τραχύτητα των ελατηρίων, των ποδιών των εμβόλων και των χιτωνίων του κυλίνδρου έχει ληφθεί ιδιαίτερα υπόψη στην ανάπτυξη τεχνικών μέτρησης της τραχύτητας επιφανειών και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων ως παράμετροι της επιφανειακής τραχύτητας.

10.2.1 Βασικές αρχές της επιφανειακής τραχύτητας

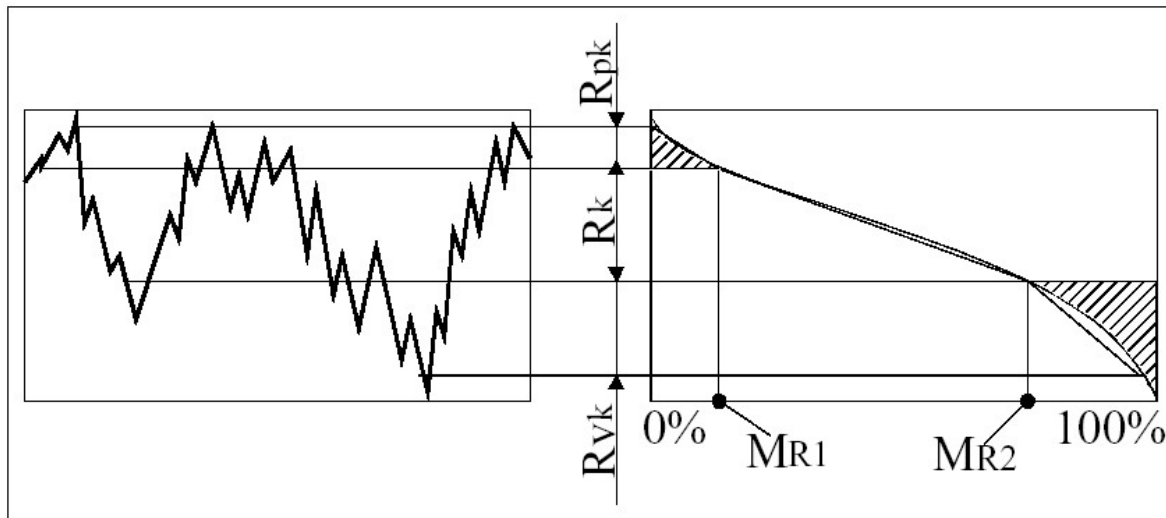
Παραδοσιακά, οι μετρήσεις επιφανειακής τραχύτητας που διενεργούνται κατά μήκος γραμμών, οδηγούν σε παραμέτρους τραχύτητας δισδιάστατων επιφανειών. Σήμερα, με τη βοήθεια εξελιγμένου εξοπλισμού, προσφέρεται η δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων επιφανειακής τραχύτητας για την απόκτηση τρισδιάστατων παραμέτρων της. Σχετικά με τη διάκριση μεταξύ δισδιάστατων και τρισδιάστατων παραμέτρων επιφανειακής τραχύτητας, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, γίνεται χρήση των συμβόλων $R_{(δείκτης)}$ και $S_{(δείκτης)}$ αντίστοιχα.

Κοινές παράμετροι επιφανειακής τραχύτητας είναι ο αριθμητικός μέσος όρος επιφανειακής τραχύτητας (R_a ή S_a) και η ασυμμετρία του προφίλ (R_{sk} ή S_{sk}). Για τις επιφάνειες του εμβόλου, των ελατηρίων και του χιτωνίου του κυλίνδρου, ορισμένες παράμετροι ύψους επιφανειακής υψής αναπτύχθηκαν μερικές δεκαετίες πριν, ενώ νέες παράμετροι συνεχώς τίθενται σε χρήση. Οι παράμετροι ύψους επιφανειακής υψής μας δίνουν πληροφορίες που προσομοιώνουν καμπύλες σε περιοχές τριβών (η καμπύλη Abbot), και είναι στατιστικώς αντιπροσωπευτικά δείγματα με τους ακόλουθους ορισμούς (συγκρίνετε με Παράγραφο 10.1) (Ohlsson, 1996, Shuster et al., 1999):

- R_{pk} ή S_{pk} , είναι το μειωμένο μέγιστο ύψος των τραχυτήτων, ή αλλιώς το ύψος των κορυφών του προφίλ της επιφάνειας που μειώθηκε κατά το «ροντάρισμα».
- R_k ή S_k , είναι το βάθος της τραχύτητας, που καθορίζει τη διάρκεια ζωής του στοιχείου.
- R_{vk} ή S_{vk} , είναι το μειωμένο βάθος των γραμμώσεων που προσδίδονται κατά το ρεκτιφιέ, που εκφράζει την ικανότητα διατήρησης του λιπαντικού στο μοτίβο των γραμμώσεων του εσωτερικού ρεκτιφιέ της επιφάνειας.

- MR1 (ή S_{r1}) και MR2 (ή S_{r2}), είναι η σύσταση των υλικών (σε ποσοστό %) που προσδιορίζονται για την γραμμή της τομής που συμπίπτει με τα ανώτερα και κατώτερα όρια του προφίλ της τραχύτητας.
- Rvk/Rk , αυτός ο λόγος εκφράζει την περιοχή κόρου του διαγράμματος της υψής του χιτωνίου του κυλίνδρου; μία περιοχή κόρου του διαγράμματος της επιφάνειας έχει λόγο Rvk/Rk περίπου τρία.

Η επιφανειακή τραχύτητα μπορεί να προσδιοριστεί από μια ποικιλία μεθόδων και εξοπλισμού. Μέχρι κάποιο βαθμό, κάθε μέθοδος και τύπος εξοπλισμού δίνει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στις παραμέτρους της επιφανειακής τραχύτητας, που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα είναι εν μέρει μόνο συγκρίσιμα μεταξύ τους (Ohlsson, 1996).



Εικόνα 10.1 – Γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων ύψους του ανάγλυφου της επιφάνειας για μία διαδιάστατη μέτρηση.

10.2.2 Τοπογραφία και ανάγλυφο

Το μέγεθος της επιφανειακής τραχύτητας, η οποία μπορεί να εκφραστεί μέσω των παραμέτρων της, καθώς και το ανάγλυφο το οποίο δείχνει πώς οι ανωμαλίες της επιφάνειας επαναλαμβάνονται σε αυτήν, είναι θεμελιώδους σημασίας στην τριβολογική απόδοση της επιφάνειας, για παράδειγμα, στην περιοχή επαφής μεταξύ του ελατηρίου και του χιτωνίου του κυλίνδρου. Τα μηχανικά διαμορφωμένα μοτίβα του ανάγλυφου του χιτωνίου του κυλίνδρου (για παράδειγμα έπειτα από εσωτερικό ρεκτιφιέ) είναι ένα πολύ καλό παράδειγμα βελτίωσης της τριβολογικής συμπεριφοράς με την πρόσδοση συγκεκριμένου ανάγλυφου στην επιφάνεια. Κατά παρόμοιο τρόπο, επιμεταλλωμένα με χρώμιο ελατήρια μπορούν να υποστούν ειδική κατεργασία στην επιφάνεια προκειμένου να γίνει η εναπόθεση της επικάλυψης. Το ανάγλυφο που σχηματίζεται από ένα δίκτυο καναλιών λιπαντικού για ορισμένο τύπο επιμεταλλωμένων με χρώμιο ελατηρίων, είναι εξίσου ωφέλιμο όπως το ανάγλυφο του εσωτερικού ρεκτιφιέ στο χιτώνιο του κυλίνδρου (Federal-Mogul, 1998). Πρόσφατα πειράματα από τον Galligan και τους συνεργάτες του για ακόμη μία φορά έδειξαν τη σημασία της πρόσδοσης ανάγλυφου με ειδικές γραμμώσεις κατακράτησης λιπαντικού επάνω στο χιτώνιο του κυλίνδρου

προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία σοβαρών γραμμώσεων στο ελατήριο (Ronen et al., 2001, Steinhoff et al., 2001).

10.2.3 Επιφάνειες με ανάγλυφο

Προσφάτως, έχουν αναπτυχθεί μετεπεξεργασμένες επικαλυπτόμενες (ή μη επικαλυπτόμενες) επιφάνειες ελατηρίων μέσω της εισαγωγής ειδικής τεχνικής επεξεργασίας αναγλύφου με λέιζερ, όπου επιτρέπει την παραγωγή οποιασδήποτε μορφής κοιλοτήτων επάνω στο ελατήριο ή άλλης επιφάνειας ολίσθησης (Ronen et al., 2001, Steinhoff et al., 2001).

11. Περίληψη και συμπεράσματα

Το έμβολο ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι το πρώτο εξάρτημα του μηχανισμού που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Η θερμότητα που παράγεται από την καύση του καυσίμου, ένα μεγάλο μέρος της οποίας μεταφέρεται λόγω αγωγιμότητας στα τοιχώματα του κυλίνδρου μέσω των ελατηρίων του εμβόλου, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της σκληρότητας και της αντοχής σε φθορά του υλικού του εμβόλου και των ελατηρίων, ενώ προκαλεί οξείδωση και εξάτμιση του λιπαντικού στα ανώτερα τοιχώματα του κυλίνδρου. Οι υδρατμοί, τα όξινα προϊόντα της καύσης, οι εναποθέσεις άνθρακα και τα σωματίδια που προέρχονται από την καύση, συντελούν στη μείωση της αντοχής σε φθορά του εμβόλου, των ελατηρίων και των τοιχωμάτων του κυλίνδρου. Όταν τα προϊόντα της καύσης και τα σωματίδια που προκαλούν φθορά αναμιχθούν με το λιπαντικό κοντά στην περιοχή των ελατηρίων, προκύπτει ο σχηματισμός λιπαντικού με υποβαθμισμένες λιπαντικές ιδιότητες.

Το έμβολο δρα ως στεγανοποιητικό μεταξύ του θαλάμου καύσης του κυλίνδρου και του στροφαλοθαλάμου και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπόκειται σε μεταβαλλόμενες πιέσεις με μεγάλες διακυμάνσεις. Η βαθμίδα πίεσης κατά μήκος του εμβόλου χρησιμοποιείται ώστε να αυξηθεί η πίεση επαφής μεταξύ του πρώτου και, μερικώς, του δεύτερου ελατηρίου έναντι της επιφάνειας του χιτωνίου του κυλίνδρου, επιτρέποντας στην πίεση του θαλάμου καύσης να δράσει στην πίσω πλευρά των ελατηρίων. Τα φορτία λόγω ελαστικότητας των ελατηρίων είναι υπεύθυνα για το υπόλοιπο μέρος της τιμής της πίεσης επαφής. Το ελατήριο λαδιού είναι επιφορτισμένο με μεγαλύτερη ελαστική δύναμη και λειτουργεί με μικρότερα πάχη μεμβράνης του λιπαντικού σε σχέση με το δεύτερο και το πρώτο ελατήριο. Το φαινόμενο διαρροής, δηλαδή της διαφυγής αερίων καύσης από το χώρο καύσης προς το χώρο του στροφαλοθαλάμου, επιτρέπεται σε μικρή κλίμακα για λόγους που σχετίζονται με τις ανοχές των ελατηρίων λόγω τοποθέτησης και λόγω διαστολής, αλλά και προκειμένου να διατηρείται η φόρτιση των ελατηρίων από τα αέρια της καύσης. Ωστόσο, η διαφυγή αερίων μπορεί να διαρρήξει το σχηματισμό της μεμβράνης στην περιοχή επαφής ελατηρίου / κυλίνδρου και κάτω από ανεπιθύμητες συνθήκες είναι δυνατό να έχουμε καταστροφή των ελατηρίων λόγω διάβρωσης από τα θερμά διαφυγόντα καυσαέρια.

Οι συνθήκες λίπανσης στην περιοχή επαφής ελατηρίου / κυλίνδρου εξαρτώνται από την ποιότητα του λιπαντικού, τη ροή του, την αλληλεπίδραση των γειτονικών ελατηρίων μεταξύ τους, τα υλικά κατασκευής των επιφανειών ή τυχόν επιφανειακές επικαλύψεις, την ποιότητα κατεργασίας της επιφάνειας και το ανάγλυφό της καθώς και το βαθμό λείανσης, τις σχετικές ταχύτητες ολίσθησης, τις ακτινικές δυνάμεις των ελατηρίων, τη γεωμετρία επαφής και τις μεταβολές της λόγω της κλίσης των ελατηρίων και την αξονική ή και ακτινική κίνηση των ελατηρίων και την παραμόρφωση του κυλίνδρου. Για υψηλού επιπέδου προηγμένες προσομοιώσεις των συνθηκών λίπανσης στην επαφή ελατηρίου / κυλίνδρου είναι δυνατό να συμπεριληφθούν οι περισσότερες από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τις πιο σημαντικές παραμέτρους να είναι οι συνθήκες υδροδυναμικής, μικτής ή οριακής λίπανσης των ελατηρίων. Μετρήσεις του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού στην περιοχή επαφής ελατηρίου / κυλίνδρου παρέχουν ένα πολύτιμο εργαλείο για τριβολογικού τύπου αναλύσεις των ελατηρίων και των συνθηκών λίπανσής τους. Το ελάχιστο πάχος της μεμβράνης του λιπαντικού παρατηρείται κοντά στα νεκρά σημεία του κύκλου λειτουργίας του εμβόλου, και ιδιαίτερα στο ΑΝΣ. Καθώς το λιπαντικό αναμιγνύεται με τα καυσαέρια αυξάνονται οι εκπομπές ρύπων της

μηχανής και γι αυτό το λόγο οι αυστηρές προδιαγραφές εκπομπών ρύπων απαιτούν τη μείωση του πάχους της μεμβράνης του λιπαντικού καθ' όλη την περιοχή επαφής μεταξύ ελατηρίων / κυλίνδρου.

Ο συντελεστής τριβής και η δύναμη τριβής μεταξύ των εξαρτημάτων της διάταξης του εμβόλου και των τοιχωμάτων του κυλίνδρου αντικατοπτρίζουν την κατανάλωση ενέργειας των παλινδρομικών εξαρτημάτων της μηχανής, υποδηλώνουν την πιθανότητα εμφάνισης φθοράς των επιφανειών ολίσθησης και φανερώνουν τις συνθήκες λίπανσης κατά μήκος της διαδρομής του εμβόλου. Στα σημεία αντιστροφής της κίνησης του εμβόλου, όπου η ταχύτητα ολίσθησης είναι ελάχιστη, ο συντελεστής τριβής παίρνει τις μεγαλύτερες του τιμές, ειδικά στο ΑΝΣ όπου η πίεση των αερίων της καύσης φτάνει επίσης στη μέγιστή της τιμή. Λόγω των παραπάνω συνθηκών, η επαφή μεταξύ ελατηρίου / κυλίνδρου γίνεται κάτω από συνθήκες μικτής ή οριακής λίπανσης κοντά στα νεκρά σημεία του κύκλου και κάτω από συνθήκες υδροδυναμικής λίπανσης στο μέσο της διαδρομής του εμβόλου από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ ή αντιστροφα. Οι μαλακές επικαλύψεις έχουν ως στόχο να μειώσουν το συντελεστή τριβής κάτω από συνθήκες οριακής λίπανσης και εφαρμόζονται στην ποδιά του εμβόλου και στα ελατήρια προκειμένου να μειωθεί η τριβή κατά την περίοδο «ρονταρίσματος» της μηχανής.

Μετά την περίοδο «ρονταρίσματος» της μηχανής η φθορά των επιφανειών ολίσθησης της διάταξης του εμβόλου και του κυλίνδρου αρχίζει να φτάνει σε ένα σταθερό επίπεδο. Ο μηχανισμός φθοράς που εμφανίζεται στο πρώτο στάδιο της ζωής ενός κινητήρα, οφείλεται στην απόξεση σωματιδίων, ως αποτέλεσμα της επαφής των κορυφών των τραχυτήτων των επιφανειών ολίσθησης. Το μεγαλύτερο μέρος της φθοράς σημειώνεται κοντά στο ΑΝΣ και στο ΚΝΣ όπου η φθορά του κυλίνδρου είναι επίσης σημαντική. Κάτω από ατυχείς συγκυρίες, όπως είναι για παράδειγμα η λείανση της επιφάνειας του κυλίνδρου που «σβήνει» το ανάγλυφο της επιφάνειας, η φθορά λόγω στεγνής επαφής μεταξύ των ελατηρίων και του κυλίνδρου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την απόξεση και το σχηματισμό γραμμώσεων του εμβόλου. Λιπαντικά που περιέχουν μεγάλο αριθμό ρύπων είναι επίσης πιθανό να δημιουργήσουν φθορά λόγω απόξεσης μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης. Οι σκληρές επικαλύψεις των εμβόλων και των ελατηρίων τους, όπως είναι ηλεκτροχημική επιμετάλλωση χρωμίου, η θερμική επιμετάλλωση μολυβδαινίου ή εναζώτωση, εφαρμόζονται συστηματικά ώστε να προστατευθούν τα ελατήρια του εμβόλου από λειαντική φθορά, αστοχία λόγω διάβρωσης από τα καυσαέρια και αστοχία λόγω κόπωσης.